



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

LUIZ CARLOS RAMOS JUNIOR

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA ETAPA DE ADENSAMENTO DO CONCENTRADO
FOSFÁTICO DE ARAXÁ POR HIDROCICLONE UTILIZANDO O MODELO DE
PLITT**

ARAXÁ/MG
2019

LUIZ CARLOS RAMOS JUNIOR

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA ETAPA DE ADENSAMENTO DO CONCENTRADO
FOSFÁTICO DE ARAXÁ POR HIDROCICLONE UTILIZANDO O MODELO DE
PLITT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva.

Coorientador: Engenheiro Marcus Vinícius Turíbio Rodrigues

ARAXÁ/MG
2019

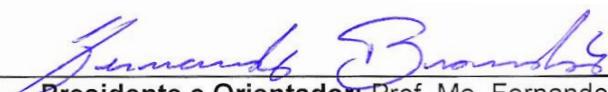
LUIZ CARLOS RAMOS JUNIOR

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA ETAPA DE ADENSAMENTO DO CONCENTRADO FOSFÁTICO DE ARAXÁ POR HIDROCICLONE UTILIZANDO O MODELO DE PLITT

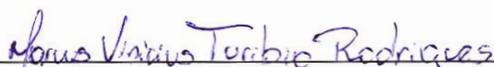
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 28 de junho de 2019.

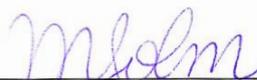
BANCA EXAMINADORA



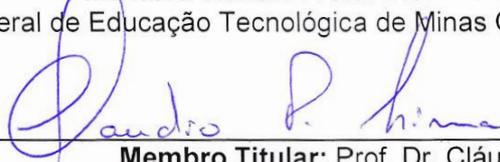
Presidente e Orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular e Coorientador: Engenheiro Marcus Vinicius Turbilio Rodrigues
Mosaic Fertilizantes P&K LTDA.



Membro Titular: Profa. Dra. Michelly Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Cláudio Pereira Lima
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Luiz Carlos Ramos e Simone Angélica de Paula, que nunca mediram esforços para a realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por ter me dado força e paciência nos momentos mais difíceis, fazendo-me seguir em frente e chegar até aqui.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, por ter acreditado nos meus sonhos, por todo o apoio dado desde o início e por toda a paciência que tiveram comigo ao longo desses anos.

Aos meus familiares, amigos e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, estiveram comigo nessa caminhada.

Ao CEFET-MG e a todos os mestres pelo conhecimento e pela inspiração.

À Vale Fertilizantes, à Mosaic Fertilizantes e aos meus companheiros de trabalho, que me deram as primeiras oportunidades de atuar, aprender e crescer profissionalmente.

“A persistência é o caminho do êxito”

Charles Chaplin

RESUMO

A falta de padronização das atuações na etapa de adensamento, por hidrociclone, tem proporcionado um aumento da granulometria do concentrado apatítico fino do Complexo Mineraloquímico de Araxá. Tendo em vista que o crescimento populacional associado à demanda por alimentos fomenta a produção de fertilizantes, faz-se necessário otimizar os processos atuais. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar os efeitos da porcentagem de sólidos e pressão de alimentação, bem como da geometria do *apex*, na granulometria de corte, partição, porcentagem de sólidos do *underflow* e *by pass* dos hidrociclones da etapa de adensamento, por meio do modelo matemático de Plitt, visando identificar as adequações necessárias que atendam as especificações e maximize a recuperação da etapa. De acordo com as análises dos resultados alcançados, a configuração que satisfaz todas as especificações é: dois hidrociclones com porcentagem de sólidos de 20%, sob uma pressão de 1,75 Kgf/cm², com diâmetro de *apex* de 2,5".

Palavras-Chave: Hidrociclone, Otimização de Processo, Plitt.

ABSTRACT

The lack of standardization of the actions in the densification stage, by hydrocyclone, has provided an increase in the granulometry of the fine apatite concentrate of the Araxá Mining Complex. Considering that the population growth associated with the demand for food stimulates the production of fertilizers, it is necessary to optimize the current processes. In this context, the present work has the objective of evaluating the effects of solids percentage and feed pressure, as well as the apex geometry, on the grain size, partition, percentage of underflow solids and bypass of the hydrocyclones of the densification stage, using the mathematical model of Plitt, to identify the necessary adaptations that meet the specifications and maximize the recovery of the stage. According to the analyzes of the results achieved, the configuration that meets all specifications is: two hydrocyclones with 20% solids percentage under a pressure of 24.89 lbf/in² with a diameter of 2.5in.

Keywords: Hydrocyclone, Process Optimization, Plitt.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização do Complexo Mineroquímico de Araxá.....	18
Figura 2 - Fluxograma da rota de processo do minério fosfático de Araxá.	20
Figura 3 - Fluxograma dos produtos das Flotações.	21
Figura 4 - Hidrociclone.	22
Figura 5 - Forças atuantes na órbita de equilíbrio da partícula em um hidrociclone.	23
Figura 6 - Fluxograma de caracterização.	31
Figura 7 - Bateria de hidrociclones da etapa de adensamento.	33
Figura 8 - (a) Pilha Cônica. (b) Pilha Alongada. (c) Quarteador Jones. (d) Alíquotas.	34
Figura 9 - Peneirador suspenso.	35
Figura 10 - Picnômetro.	36
Figura 11 - Distribuição granulométrica da alimentação e dos produtos do adensamento.....	41
Figura 12 - Distribuição granulométrica do FCA e de seus constituintes.	41
Figura 13 - Comparativo da granulometria dos produtos amostrados e simulados...44	
Figura 14 - Gráfico de efeitos principais para a partição, variando pressão (a), diâmetro de apex (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).	46
Figura 15 - Gráfico de efeitos principais para o by pass, variando pressão (a), diâmetro de apex (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).	47
Figura 16 - Gráfico de efeitos principais para a porcentagem de sólidos no underflow, variando pressão (a), diâmetro de apex (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).	48
Figura 17 - Gráfico de efeitos principais para a porcentagem retida acumulada na malha 100# no underflow, variando pressão (a), diâmetro de apex (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).	49
Figura 18 - Gráfico de efeitos principais para a porcentagem retida acumulada na malha 325# no overflow, variando pressão (a), diâmetro de apex (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resposta dos produtos em função do nível de atuação no hidrociclone..	25
Tabela 2 - Variáveis dependentes e independentes do modelo de Plitt.....	27
Tabela 3 - Características operacionais da etapa de adensamento.....	32
Tabela 4 - Planejamento fatorial das simulações para otimização da etapa de adensamento.....	38
Tabela 5 - Resumo das variáveis fixadas nas simulações.....	39
Tabela 6 - Porcentagem de sólidos da alimentação e dos produtos da etapa de adensamento.....	40
Tabela 7 - Ensaio de picnometria.....	42
Tabela 8 - Balanço de massa da etapa de adensamento.....	43
Tabela 9 - Comparativo dos principais resultados de amostragem e simulação.....	44
Tabela 10 - Resultados otimizados.....	50
Tabela AP 1 - Resultados das simulações.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Massa da alimentação
a	Teor da alimentação
A_1	Massa do picnômetro
A_2	Massa do picnômetro + amostra
A_3	Massa do picnômetro + amostra + água
A_4	Massa do picnômetro + água
C	Massa do concentrado
c	Teor do concentrado
d_{50c}	Diâmetro de corte corrigido
D_c	Diâmetro do hidrociclone
D_i	Diâmetro do <i>inlet</i>
D_o	Diâmetro do <i>vortex</i>
D_u	Diâmetro do <i>apex</i>
$E_{a. total}$	Erro total de amostragem
E_{a1}	Erro de ponderação
E_{a2}	Erro de integração
E_{a3}	Erro de periodicidade
E_{a4}	Erro fundamental
E_{a5}	Erro de segregação
E_{a6}	Erro de delimitação
E_{a7}	Erro de extração
$E_{p. total}$	Erro total de preparação
E_{p1}	Erro de perda de partículas da amostra
E_{p2}	Erro de contaminação da amostra com material estranho
E_{p3}	Erro de alteração não intencional da característica a ser medida
E_{p4}	Erro não intencional do operador
E_{p5}	Erro de alteração intencional da característica a ser medida
Fe_2O_3	Óxido de Ferro III
h	Altura livre do hidrociclone
H	Pressão de operação
m	Eficiência da separação

$M_{\text{água}}$	Massa de água
M_s	Massa de sólidos
P	Pressão de operação
P_2O_5	Pentóxido de fósforo
Q	Vazão volumétrica de polpa na alimentação
$Q_{A \text{ Alim}}$	Vazão volumétrica de água na alimentação
$Q_{A \text{ U/F}}$	Vazão volumétrica de água no <i>underflow</i>
Q_M	Vazão mássica
$Q_{S \text{ Alim}}$	Vazão mássica de sólidos na alimentação
$Q_{S \text{ U/F}}$	Vazão mássica de sólidos no <i>underflow</i>
R	Massa do rejeito
r	Teor do rejeito
r'	Coefficiente de Correlação de Pearson
R_p	Massa específica da polpa
S	Relação entre vazão volumétrica de polpa no <i>underflow</i> e no <i>overflow</i>
Y_i	Fração do material na classe granulométrica i reportado ao <i>underflow</i>
μ	Viscosidade dinâmica da polpa
ρ_l	Massa específica do fluido
ρ_s	Massa específica das partículas
\emptyset	Concentração volumétrica de sólidos na alimentação
$\#$	<i>Mesh</i> , unidade de abertura das telas de peneiras

LISTA DE ABREVIATURAS

CMA	Complexo Minerquímico de Araxá
CONC	Concentrado
FCA	Concentrado apatítico fino
GCA	Concentrado apatítico grosso
MAG	Produto magnético
N MAG	Produto não magnético
O/F	<i>Overflow</i>
REJ	Rejeito
Ret Acum	Retido acumulado
SMBI	Separação magnética de baixa intensidade
Sól. _{Alim.}	Sólidos da alimentação
Sól. _{O/F}	Sólidos do <i>overflow</i>
Sól. _{U/F}	Sólidos do <i>underflow</i>
U/F	<i>Underflow</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1.	MINÉRIO FOSFÁTICO.....	17
2.2.	COMPLEXO MINEROQUÍMICO DE ARAXÁ	18
2.2.1.	ROTA DE PROCESSO.....	19
2.3.	HIDROCICLONES.....	22
2.3.1.	EQUIPAMENTO	22
2.3.2.	EFICIÊNCIA OPERACIONAL	24
2.3.3.	MODELO DE PREVISIBILIDADE DE PLITT	26
2.4.	ERROS DE AMOSTRAGEM.....	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1.	AMOSTRAGEM INDUSTRIAL	31
3.2.	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO.....	33
3.2.1.	PORCENTAGEM DE SÓLIDOS	33
3.2.2.	HOMOGENEIZAÇÃO E QUARTEAMENTO.....	34
3.2.3.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	34
3.2.4.	DENSIDADE DO MINÉRIO	35
3.3.	BALANÇO DE MASSA.....	36
3.4.	SIMULAÇÕES SEGUNDO O MODELO DE PLITT	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO.....	40
4.1.1.	PORCENTAGEM DE SÓLIDOS	40
4.1.2.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	40
4.1.3.	DENSIDADE DO MINÉRIO	42
4.2.	BALANÇO DE MASSA.....	42
4.3.	SIMULAÇÃO COM O MODELO DE PLITT	43
4.3.1.	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	43
4.3.2.	ANÁLISE DOS EFEITOS PRINCIPAIS.....	45
4.3.2.1.	PARTIÇÃO	45
4.3.2.2.	<i>BY PASS</i>	46
4.3.2.3.	PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NO <i>UNDERFLOW</i>	47
4.3.2.4.	GRANULOMETRIA	48
4.3.3.	OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS.....	53
	APÊNDICE.....	56

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população mundial, associado à responsabilidade com o desenvolvimento da agricultura, impulsiona o desafio das empresas em produzir e comercializar mais fertilizantes, compostos essencialmente por três macro elementos: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Como consequência, é primordial o aumento da produção de concentrado fosfático – única fonte viável de fósforo – que implica na ampliação da capacidade das plantas de beneficiamento, otimização das rotas e dos processos atuais.

A usina de concentração do Complexo Mineroquímico de Araxá, destinada a produzir concentrado de rocha fosfática, possui três circuitos independentes de flotação, sendo eles: grossos, finos naturais e finos gerados. Para cada circuito, é obtido um concentrado. O concentrado do circuito de grossos é adensado, filtrado e compõe o produto final grosso, denominado GCA (Concentrado Apatítico Grosso). Já os concentrados dos circuitos finos naturais e finos gerados, juntamente com a parte da fração fina obtida no adensamento do concentrado dos grossos, são espessados, filtrados e geram o produto final fino, denominado FCA (Concentrado Apatítico Fino). Os produtos finais do beneficiamento mineral são destinados às plantas químicas para a produção de fertilizantes fosfatados.

Amostragens recentes evidenciaram o aumento da granulometria da malha de controle do FCA, associado a um corte mais grosseiro, o qual tem ocorrido na etapa de adensamento. O baixo desempenho dessa etapa se deve à falta de padronização das atuações nas porcentagens de sólidos e pressão de alimentação, bem como na ajustagem dos *apex* dos hidrociclones. Os *apex* são reguláveis e permitem o ajuste fino da porcentagem de sólidos do *underflow*, variável de suma importância para o bom desempenho do filtro. Essa é uma etapa considerada crítica, uma vez que aproximadamente 30% do FCA é constituído pela fração fina proveniente do *overflow* da etapa de adensamento, impactando significativamente nas características granulométricas do produto fino final, que possui especificação de, no máximo, 18% retido acumulado na malha 325#. O não atendimento às especificações impacta na eficiência das reações químicas, podendo ocasionar o aumento dos custos operacionais para a produção de fertilizantes. Considerando que o Concentrado Apatítico Grosso (GCA) é o concentrado de maior valor

agregado para a companhia, ressalta-se a importância de se obter eficiência máxima na etapa de adensamento.

Sendo assim, mediante à necessidade de otimizar o processo de adensamento, fez-se necessário conhecer as características do minério, bem como o comportamento desse na etapa de adensamento, visando identificar adequações que possibilitarão um corte mais fino, uma partição mais elevada e a porcentagem de sólidos no *underflow* especificada para a alimentação do filtro (mínima de 60% de sólidos).

Para tanto, propõe-se, com este trabalho, realizar simulações, lançando mão do mais utilizado modelo matemático, aquele desenvolvido por Plitt, por meio do qual é possível prever a partição de fluxos em hidrociclones e avaliar os efeitos das variáveis porcentagens de sólidos e pressão de alimentação, bem como a geometria do *apex* dos hidrociclones na etapa de adensamento.

Outrossim, são objetivos específicos:

- I. Obter amostras representativas para os ensaios de caracterização;
- II. Analisar as principais características físicas do minério – granulometria, densidade e concentração de sólidos – e realizar o balanço de massa da etapa de adensamento, gerando informações necessárias para a aplicação do modelo matemático de Plitt;
- III. Investigar os efeitos das variáveis porcentagens de sólidos e pressão de alimentação, bem como a geometria do *apex* na granulometria de corte, partição, porcentagem de sólidos no *underflow* e *by pass* dos hidrociclones; e
- IV. Determinar os valores das variáveis em estudo que maximizam a recuperação e atendam às especificações de processo das etapas subsequentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada ao tema tratado, de modo a melhor delimitá-lo e circunstanciá-lo.

2.1. MINÉRIO FOSFÁTICO

O ritmo de crescimento demográfico mundial das últimas décadas reforça o desafio da sociedade em aumentar a produção de fertilizantes, os quais são fundamentais para a agricultura. Para produzir a quantidade de alimentos de que o mundo precisa e com melhor qualidade nutricional, as plantas necessitam de nutrientes em determinadas quantidades, os quais, muitas vezes, não estão presentes nos solos.

O Fósforo (P), um dos macronutrientes primários que são absorvidos em maiores quantidades pelas culturas, é um elemento mal distribuído e pouco abundante na crosta terrestre (CHAVES; OBA, 2004). Ele é encontrado nas rochas fosfáticas, sob a forma do mineral denominado apatita (ZAPATA; ROY, 2004), e sua principal aplicação, cerca de 90% da sua produção, consiste na fabricação de ácido fosfórico para a produção de fertilizantes. Em sendo assim, apenas 10% se destinam a outras aplicações (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2005).

As rochas fosfáticas – única fonte viável de fósforo (SOUZA; FONSECA, 2009) –, contidas em jazidas sedimentares, são as mais comuns. Estima-se que 80% são desse tipo. Já as de origem magmáticas, apesar de mais raras, são as mais importantes fontes de fósforo em alguns países, principalmente, no Brasil (CHAVES; OBA, 2004).

No Brasil, aproximadamente 80% das jazidas de fosfato são de origem magmática. Os complexos minerais de Araxá-MG, Tapira-MG e Catalão-GO ocupam posições de destaque na produção de rocha fosfática nacional, visto que são três das maiores jazidas de fosfato do país (SANTANA, 2007). Em Araxá-MG, o minério é constituído principalmente por apatita, argilo-minerais, magnetita, barita, minerais hidratados de ferro, fosfatos secundários de alumínio e de ferro, minerais de titânio e outros (GUIMARÃES, 1997 apud SANTANA, 2007). Em consequência de sua complexa mineralogia, com baixo teor de apatita (em torno de 13%) e presença

de múltiplos minerais de ganga e de contaminantes, o minério de Araxá requer processos industriais de beneficiamento sofisticados e onerosos, para que se obtenham os concentrados com as especificações exigidas pelo mercado (SANTANA, 2011).

Com a necessidade de aumentar a produção de alimentos, tendo ciência da complexidade de beneficiamento e da vida útil estimada das reservas de fosfato brasileiras, é imprescindível o desenvolvimento de rotas e de processos para o melhor aproveitamento e obtenção de produtos com maior qualidade e em quantidades adequadas para atender a demanda nacional (SILVA, 2016).

2.2. COMPLEXO MINEROQUÍMICO DE ARAXÁ

O Complexo Minerquímico de Araxá (CMA) está localizado no sudoeste do estado de Minas Gerais, no município de Araxá, a 366 Km a oeste da capital do estado, conforme Figura 1. Esse complexo engloba operações de lavra, beneficiamento e produção de concentrado de rocha fosfática, superfosfato simples e ácido sulfúrico (ROCHA, 2013).

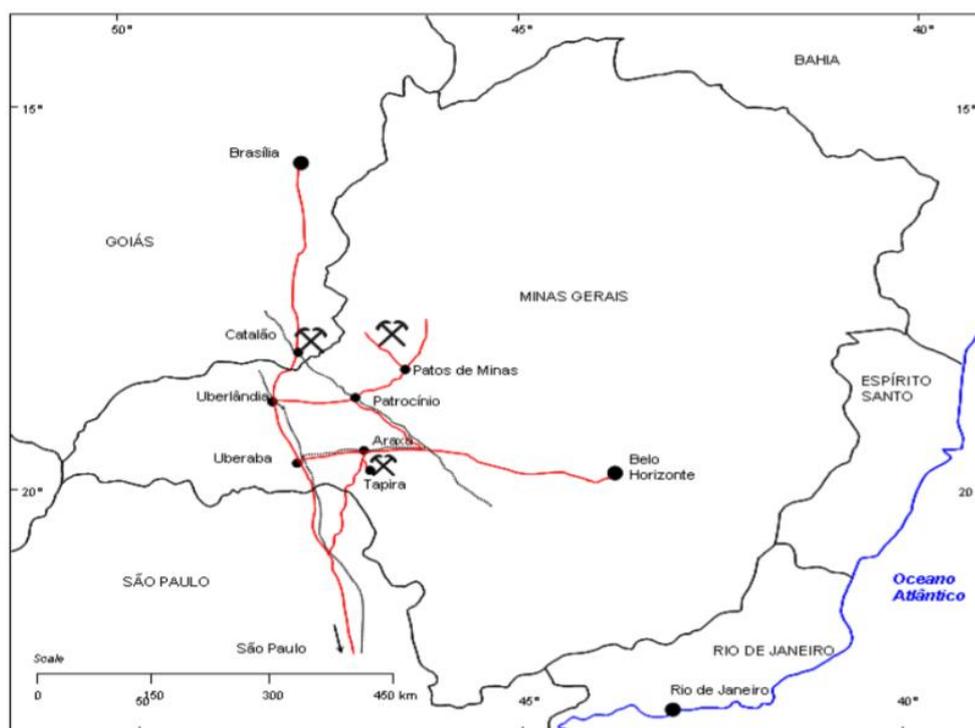


Figura 1 - Mapa de localização do Complexo Minerquímico de Araxá.
Fonte: REIS (2010, p. 23).

A usina de concentração de minério fosfático de Araxá processa, atualmente, minérios da Mina de Patrocínio e do Barreiro, elevando o teor do minério de 11,0% para 34,5% de P_2O_5 , recuperando o máximo possível da apatita alimentada e atendendo às especificações da matéria-prima para a fabricação de fertilizantes. São produzidos, simultaneamente, dois produtos: o Concentrado Apatítico Grosso e o Concentrado Apatítico Fino, denominados GCA e FCA, respectivamente.

O GCA corresponde a aproximadamente 67% da produção total e suas especificações são:

- Granulometria: $\leq 20\%$ retido na malha 100#.
- Teor de P_2O_5 : $\geq 35,0\%$
- Teor de Fe_2O_3 $\leq 3,5\%$

Já o FCA, responsável pelos outros 33%, possui especificações de:

- Granulometria: $\leq 18\%$ retido na malha 325#.
- Teor de P_2O_5 : $\geq 33,0\%$
- Teor de Fe_2O_3 $\leq 6,5\%$

Os índices de recuperação mássica e metalúrgica da usina de concentração são da ordem de 20% e 60%, respectivamente.

2.2.1. ROTA DE PROCESSO

Inicialmente, antes de alimentar a usina de concentração, o minério lavrado é britado e empilhado em pátios de homogeneização. Das pilhas formadas, o minério homogêneo é recuperado por um retomador de roda de caçamba e enviado, através de correias transportadoras, para as instalações da usina, iniciando as etapas de beneficiamento.

A rota de processos do minério fosfático de Araxá é composta da mais completa junção de etapas de beneficiamento mineral, a saber: moagem, classificação, separação magnética de baixa intensidade (SMBI), deslamagem, condicionamento e flotação. A Figura 2 apresenta as etapas mencionadas anteriormente.

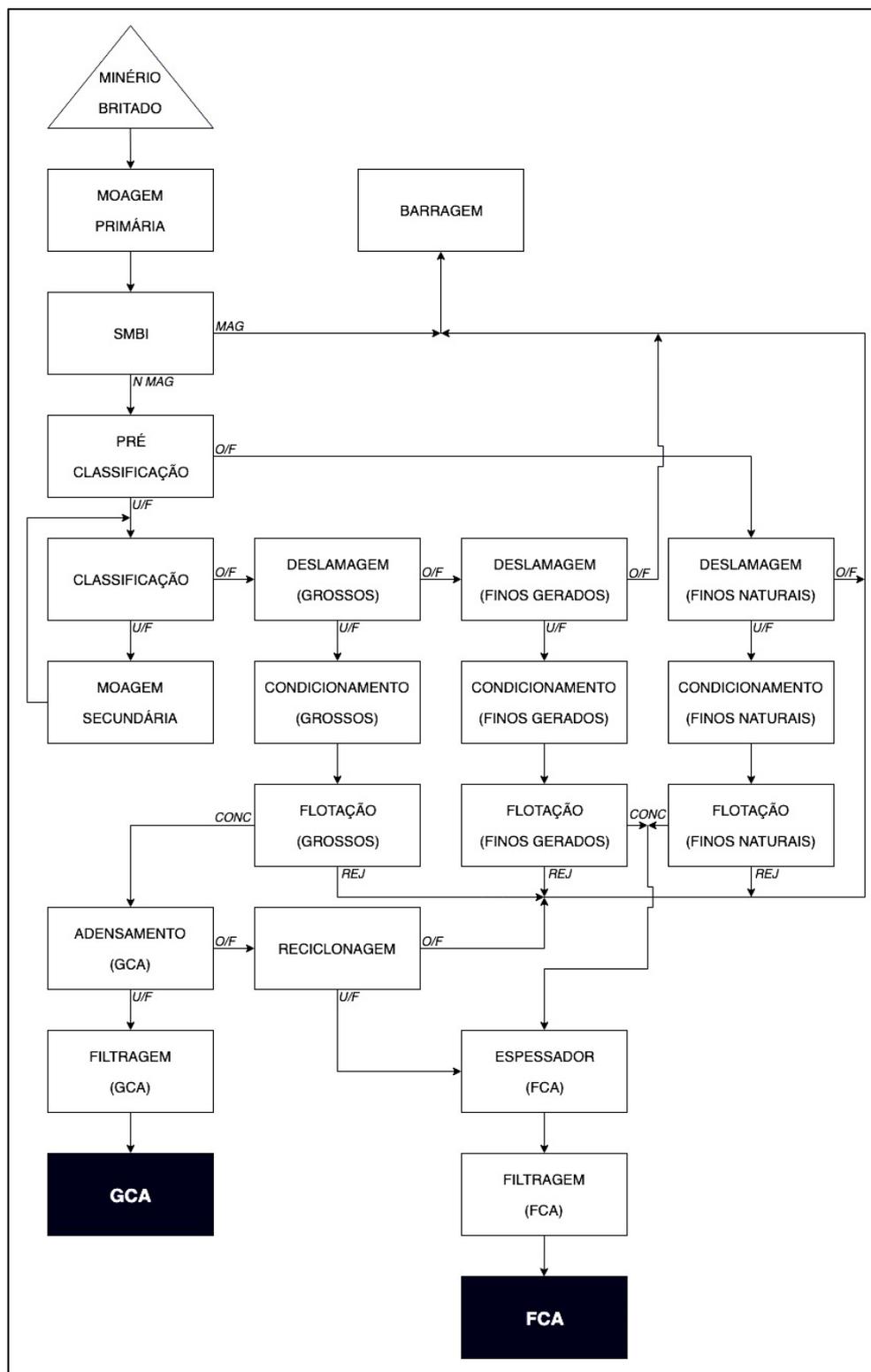


Figura 2 - Fluxograma da rota de processo do minério fosfático de Araxá.
 Fonte: Adaptado de VALE FERTILIZANTES (2011, p. 8).

Atualmente, a flotação de apatita é realizada em circuitos independentes e em um único estágio (*rougner*), e os rejeitos são bombeados para as barragens de decantação.

Os concentrados das flotações de finos naturais e finos gerados compõem o concentrado apatítico fino (FCA), que é espessado e filtrado em filtros de tambor, sendo posteriormente estocado em pilhas cônicas no galpão de FCA. Já o concentrado da flotação de grossos, é bombeado para a área de filtragem, onde é adensado e filtrado.

O adensamento ocorre em uma bateria de ciclones de 20", na qual o *underflow* é filtrado em Filtro Plano Horizontal. A massa filtrada constitui o GCA, principal produto do beneficiamento mineral da rocha fosfática de Araxá, que é transportado por correias transportadoras e depositado em pilhas cônicas no galpão de GCA.

De acordo com a Vale Fertilizantes (2012), o *overflow* dos ciclones de 20", que representa a fração fina menor que 325# originada do arraste dos finos na flotação de grossos, apresenta características químicas e granulométricas de FCA. Esse produto é, então, submetido a uma reclassificação em bateria de microciclones de 2" para recuperação dessa fração fina, e seu *underflow* é direcionado ao espessador, incorporando ao FCA. O *overflow* segue para a barragem, onde ocorre a deposição dos sólidos e o reaproveitamento da água. Os circuitos mencionados anteriormente são apresentados na Figura 3.

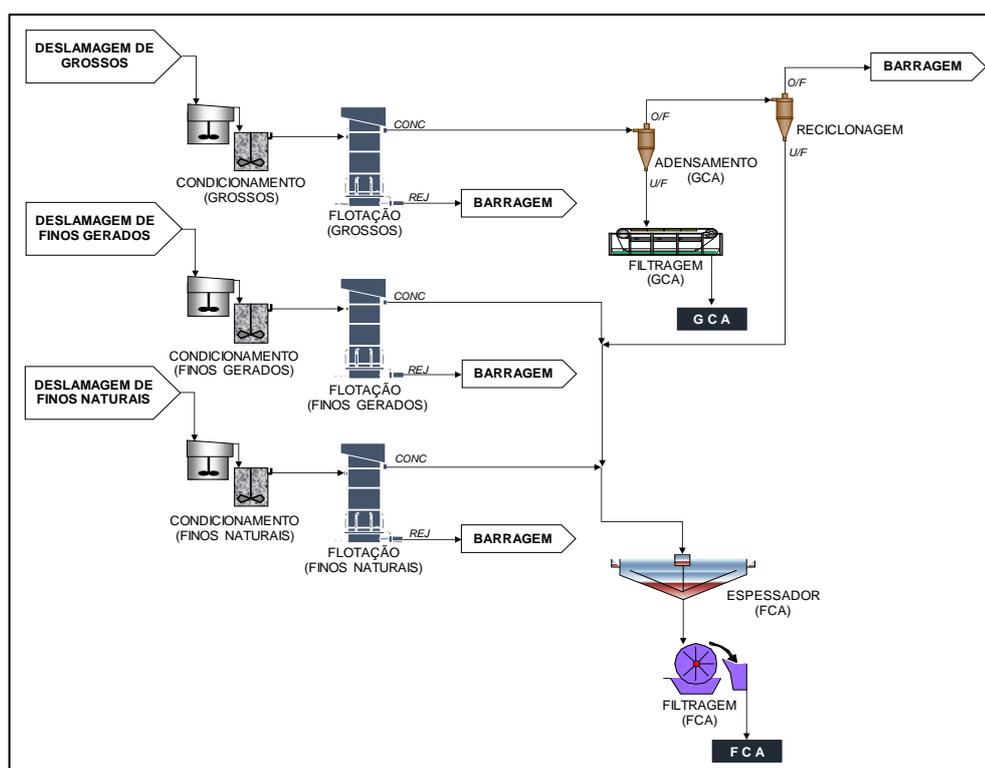


Figura 3 - Fluxograma dos produtos das Flotações.

2.3. HIDROCICLONES

2.3.1. EQUIPAMENTO

De aplicação versátil, os hidrociclones são os equipamentos mais comuns nas plantas de beneficiamento mineral (NAGESWARARAO; WISEMAN; NAPIER-MUNN, 2004). Embora muito empregados em circuitos fechados de moagem, também são amplamente utilizados em etapas de deslamagem e adensamento (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006). Segundo Beraldo (1987), a principal razão de sua boa aceitação industrial se deve a uma série de vantagens que os hidrociclones apresentam, sendo elas:

- Elevada capacidade em relação a seu volume e área ocupada;
- Controle operacional relativamente simples;
- Operação mais ou menos estável;
- Baixo custo de investimento; e
- Elevada disponibilidade, pois é comum haver equipamentos reservas (*stand-by*).

O hidrociclone convencional não possui partes móveis, consistindo basicamente de uma câmara cilíndrico-cônica com entrada tangencial e duas saídas, como pode ser observado na Figura 4 (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

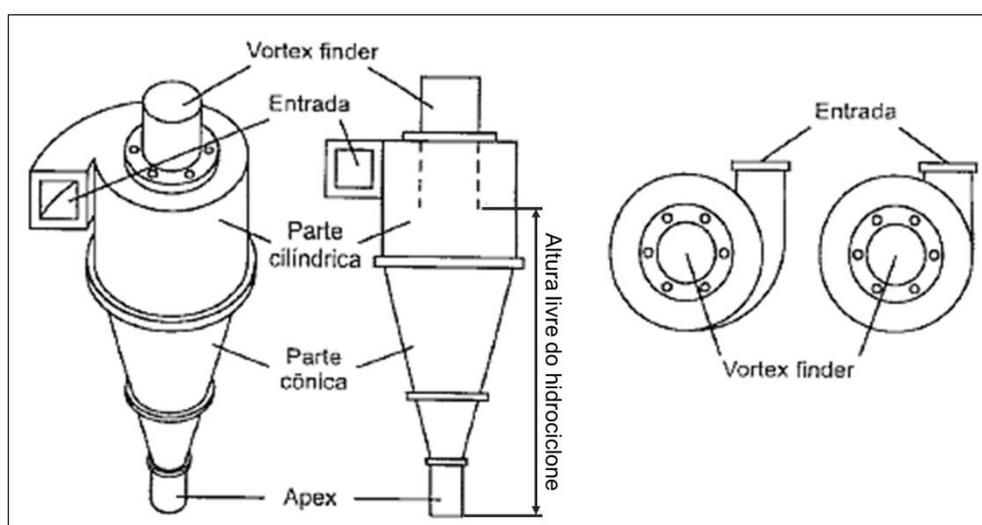


Figura 4 - Hidrociclone.

Fonte: Adaptado de CHAVES (2002, p. 167).

A polpa mineral é alimentada sob pressão através do orifício de entrada denominado *inlet*. Essa entrada pode ocorrer de duas formas, tangencialmente ou em voluta, sendo que a última apresenta maior capacidade e melhor performance (BERALDO, 1987). A geometria interna do hidrociclone é fundamental para a geração do movimento de rotação e da força centrífuga que atua nas partículas.

De acordo com Wills e Napier-Munn (2006), a teoria clássica considera que as partículas são submetidas a duas forças opostas, uma força centrífuga e uma de arraste, conforme mostra-se na Figura 5.

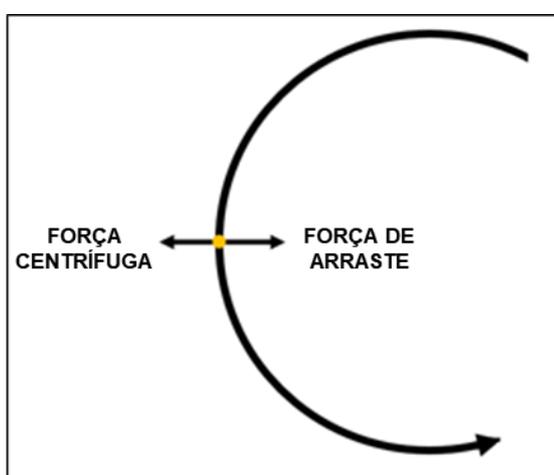


Figura 5 - Forças atuantes na órbita de equilíbrio da partícula em um hidrociclone.
Fonte: Adaptado de WILLS e NAPIER-MUNN (2006, p. 212).

A força centrífuga é responsável pela aceleração da velocidade de sedimentação das partículas, segregando-as de acordo com o tamanho, a forma e a massa específica. Partículas de sedimentação mais rápidas movem-se para a parede do ciclone que, em movimento descendente, se descarregam pela parte inferior, na qual está instalado o *apex*. Esse fluxo, denominado *underflow*, é composto predominantemente por partículas grossas. Já as partículas de sedimentação mais lentas, em função da força de arraste, movem-se em direção à zona de baixa pressão e são conduzidas para cima, sendo descarregadas na parte superior, na qual está instalado o *vortex*. Esse fluxo, denominado *overflow*, é composto predominantemente por partículas finas (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

2.3.2. EFICIÊNCIA OPERACIONAL

Mesmo bem dimensionado e operando corretamente, os hidrociclones não apresentam a mesma eficiência de uma peneira, por efeito do *by pass*, que é o fenômeno no qual as partículas são direcionadas erroneamente aos dois fluxos de produtos. A razão do *by pass* é o arraste, tanto de finos pela parcela de líquido que se reporta ao *underflow*, quanto de grossos para o *overflow* (LUZ, 2005). Segundo Melo (2010), somente o *by pass* de partículas finas no *underflow* é significativo, podendo ser calculado através da equação I.

$$\text{Equação I} \quad \text{By pass} = \left(\frac{Q_{A \text{ U/F}}}{Q_{A \text{ Alim}}} \right) \times 100$$

Onde:

$Q_{A \text{ Alim}}$ = vazão de água na alimentação (m³/h); e

$Q_{A \text{ U/F}}$ = vazão de água no *underflow* (m³/h).

O controle das variáveis do hidrociclone e de processo são essenciais para o bom desempenho do equipamento. As principais variáveis de controle de processo são:

- Diâmetro do *apex*;
- Diâmetro do *vortex*;
- Pressão de operação; e
- Porcentagem de sólidos da alimentação.

De acordo com Chaves (2002), a variação de quaisquer mecanismos de processo ou do próprio hidrociclone afeta o resultado dos produtos, da seguinte forma:

- A diminuição do diâmetro do *apex* desfavorece a vazão de polpa capaz de sair por esse orifício. Em razão do peso das partículas, que dificulta seu arraste para o *overflow*, a parcela de água que iria para o *underflow* é encaminhada para o *overflow*. Com isso, a porcentagem de sólidos do *underflow* aumenta e o *by pass* diminui. Entretanto, a diminuição excessiva do *apex* pode fazer com que além da água, as partículas moderadamente grossas sejam arrastadas para o *overflow*, engrossando o diâmetro de corte;

- O aumento do diâmetro do *vortex* favorece o escoamento por esse orifício. Em consequência, o *overflow* arrasta mais partículas, aumentando o diâmetro de corte;
- O aumento da pressão de operação implica no aumento da força centrífuga e, conseqüentemente, na aceleração da velocidade de sedimentação das partículas mais finas, reduzindo o diâmetro de corte;
- Diminuir a porcentagem de sólidos da alimentação resulta na diminuição da densidade da polpa, bem como da viscosidade, favorecendo a sedimentação das partículas no campo centrífugo e diminuindo o diâmetro de corte.

A Tabela 1 resume os resultados dos produtos em função das atuações nos hidrociclones.

Tabela 1 - Resposta dos produtos em função do nível de atuação no hidrociclone.

		d_{50c}	By pass finos	% Sólidos <i>underflow</i>	% Sólidos <i>overflow</i>
↑	Diâmetro <i>vortex</i>	↑	↓	↑	↓
↓	Diâmetro <i>apex</i>	↑	↓	↓	↑
↑	Pressão	↓	↓	↑	↓
↓	% Sólidos alimentação	↓	↓	↓	↓

A partição também é um importante parâmetro que caracteriza a eficiência dos hidrociclones. Ela determina a porcentagem de massa da alimentação que é direcionada para *underflow* (MACHACA, 2010), podendo ser calculada pela equação II.

Equação II

$$\text{Partição} = \left(\frac{Q_{S \text{ U/F}}}{Q_{S \text{ Alim}}} \right) \times 100$$

Onde:

$Q_{S \text{ Alim}}$ = vazão mássica de sólidos na alimentação (t/h); e

$Q_{S\ U/F}$ = vazão mássica de sólidos no *underflow* (t/h).

2.3.3. MODELO DE PREVISIBILIDADE DE PLITT

Os modelos matemáticos empíricos são descrições simplificadas de um determinado processo, baseados em conhecimentos prévios e dados experimentais (POSSA, 2000 apud MELO, 2010). Tais modelos, em especial os classificadores granulométricos de hidrociclones, têm sido empregados intensivamente nas indústrias (LUZ, 2005). Suas equações de previsibilidade convertem dados imputados em resultados que auxiliam no desenvolvimento e na otimização dos processos.

De acordo com Melo (2010), as características comuns dos modelos de previsibilidade para hidrociclones são as determinações dos seguintes parâmetros:

- Tamanho de corte corrigido (d_{50c});
- Relação entre pressão e vazão da alimentação;
- Distribuição de água dos produtos; e
- Relação entre os fluxos de polpa no *underflow* e no *overflow* (S).

Em razão do *by pass*, os modelos preveem correção no tamanho de corte, eliminando a fração de partículas finas que foram arrastadas pela água ao *underflow*.

O modelo de Plitt dispõe de uma completa previsão de processos, correlacionando variáveis de projeto e operação (MACHACA, 2010), sendo o mais empregado e de maior destaque dentre os modelos empíricos de dimensionamento de hidrociclones (SILVA; SILVA; MATOS, 2012). Plitt formulou seu modelo embasado nos dados experimentais obtidos por Lynch e Rao (PLITT, 1976). Foram 297 ensaios individuais, dos quais 123 ensaios foram realizados por Lynch e Rao em hidrociclones Krebs de 20" de diâmetro, trabalhando com lamas e porcentagem de sólido variando de 15% a 70% (LYNCH, 1975 apud SILVA; SILVA; MATOS, 2012). Segundo Plitt (1976), o modelo engloba variáveis dependentes e independentes, definidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis dependentes e independentes do modelo de Plitt.

DEPENDENTES	INDEPENDENTES
Tamanho de corte corrigido (d_{50c})	Diâmetro do ciclone (D_c)
Vazão volumétrica de polpa na alimentação (Q)	Diâmetro do <i>vortex</i> (D_o)
Parâmetro de eficiência de classificação (m)	Diâmetro do <i>apex</i> (D_u)
Relação entre os fluxos para os produtos (S)	Diâmetro do <i>inlet</i> (D_i)
	Altura livre do hidrociclone (h)

Fonte: Adaptado de MELO (2010, p. 28).

No que concerne à modelagem de hidrociclones, de acordo com Beraldo (1987), as expressões desenvolvidas por Plitt são:

$$\text{Equação III} \quad d_{50c} = 39,7 \frac{D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} \mu^{0,5} \exp(0,063\phi)}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q^{0,45} \left[\frac{\rho_s - \rho_l}{1,6} \right]^{0,5}}$$

$$\text{Equação IV} \quad P = 1,88 \frac{Q^{1,78} \exp(0,0055\phi)}{D_c^{0,37} D_i^{0,94} h^{0,28} (D_u^2 + D_o^2)^{0,87}}$$

$$\text{Equação V} \quad Q = 0,7 D_c^{0,21} D_i^{0,53} (D_o^2 + D_u^2)^{0,49} h^{0,16} \exp(-0,0055\phi) P^{0,56}$$

$$\text{Equação VI} \quad H = \frac{P}{9,80313 R_p}$$

$$\text{Equação VII} \quad S = 1,9 \frac{\left(\frac{D_u}{D_o} \right)^{3,31} h^{0,54} \left[1 + \left(\frac{D_u}{D_o} \right)^2 \right]^{0,36} D_o^{0,72}}{H^{0,24} D_c^{1,11}} \exp(0,0054\phi)$$

Equação VIII
$$m = 1,94 \exp \left[-1,58 \frac{S}{1 + S} \right] \left[\frac{D_c^2 h}{Q} \right]^{0,15}$$

Equação IX
$$Y_i = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{D_i}{d_{50c}} \right)^m \right]$$

Onde:

d_{50c} = diâmetro de corte corrigido (μm);

D_c = diâmetro do hidrociclone (cm);

D_i = diâmetro do *inlet* (cm);

D_o = diâmetro do *vortex* (cm);

D_u = diâmetro do *apex* (cm);

h = altura livre do hidrociclone (cm);

H = pressão de operação (mcp);

m = eficiência da separação;

P = pressão de operação (kPa);

Q = vazão volumétrica de polpa na alimentação (l/min);

R_p = massa específica da polpa (g/cm^3);

S = relação entre vazão volumétrica de polpa no *underflow* e no *overflow* (%);

Y_i = fração do material na classe granulométrica i reportado ao *underflow* (%);

μ = viscosidade dinâmica da polpa (cP);

ρ_l = massa específica do fluido (g/cm^3);

ρ_s = massa específica das partículas (g/cm^3); e

\emptyset = concentração volumétrica de sólidos na alimentação (%).

A variável m , descrita como eficiência de separação, apresenta usualmente valores de 1,5 a 3,0, sendo que m superior a 3,0 indica alta eficiência, enquanto que inferior a 2,0, baixa eficiência (BERALDO, 1987).

2.4. ERROS DE AMOSTRAGEM

Assim como as mais importantes decisões na mineração, as simulações com o modelo matemático de Plitt, em estudo, são baseadas em resultados e em informações obtidas através do processo de amostragem. De acordo com Goés, Luz e Possa (2004), a amostragem consiste na retirada de quantidades moduladas de material que represente o todo, de forma sistemática.

Embora as técnicas de amostragem industriais tenham se desenvolvido nos últimos anos, sérios erros ainda ocorrem, o que demonstra que a amostragem ainda não recebe o seu devido valor e importância (OLIVEIRA; AQUINO, 2007). Goés, Luz e Possa (2004), baseados na teoria de Pierry Gy, expressam o erro total de amostragem num somatório de 7 tipos de erros, conforme a equação X e as definições em sequência.

$$\text{Equação X} \quad E_{a. \text{ total}} = E_{a1} + E_{a2} + E_{a3} + E_{a4} + E_{a5} + E_{a6} + E_{a7}$$

E_{a1} = é o erro de ponderação, resultante da não uniformidade da densidade e da vazão do material coletado;

E_{a2} = é o erro de integração, resultante de erros nos incrementos retirados de instalações contínuas;

E_{a3} = é o erro de periodicidade, resultante das variações periódicas na quantidade ou na qualidade dos incrementos;

E_{a4} = é o erro fundamental, que ocorre devido à heterogeneidade de constituição do material;

E_{a5} = é o erro de segregação, que ocorre, principalmente, quando não há homogeneidade do material;

E_{a6} = é o erro de delimitação, que ocorre quando não há o dimensionamento correto dos incrementos; e

E_{a7} = é o erro de extração, que ocorre durante a coleta dos incrementos.

O material, depois de amostrado, segue para as etapas de preparação e de análise, nas quais são gerados os resultados. Essas etapas também são passíveis de erro. Na equação XI, Goés, Luz e Possa (2004) expressam os 5 erros de preparação.

Equação XI
$$E_{p. \text{ total}} = E_{p1} + E_{p2} + E_{p3} + E_{p4} + E_{p5}$$

E_{p1} = é o erro de perda de partículas da amostra;

E_{p2} = é o erro de contaminação da amostra com material estranho;

E_{p3} = é o erro de alteração não intencional da característica a ser medida do material;

E_{p4} = é o erro não intencional do operador; e

E_{p5} = é o erro de alteração intencional da característica a ser medida do material.

São diversas as fontes de erros num processo de amostragem, o que ressalta a importância de elaborar previamente um bom plano, definir as metodologias que serão adotadas, e realizar todas as etapas de forma sistêmica, pois uma decisão só será boa se a amostra embasada também o for, do contrário, o processo pode ser comprometido.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os procedimentos e os métodos empregados para a obtenção de amostras, caracterização do minério e da etapa de adensamento, bem como o plano de trabalho estabelecido para a realização de simulações e de otimização do processo. A parte experimental desta pesquisa, ilustrada na Figura 6, foi realizada no Complexo Minerquímico de Araxá.

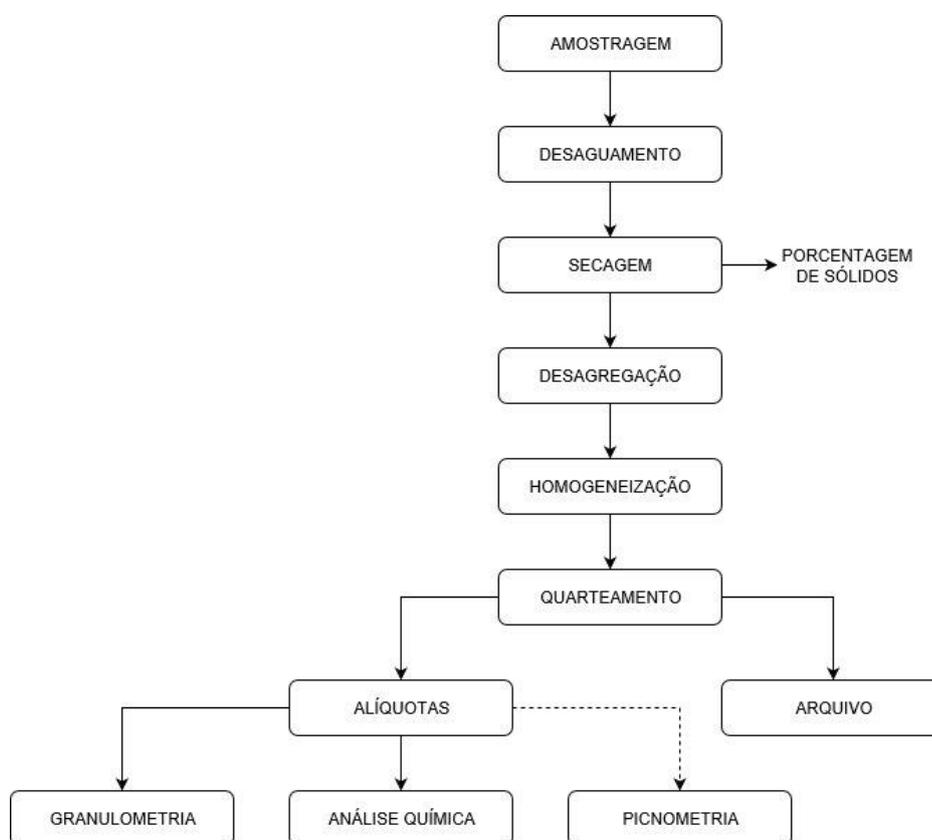


Figura 6 - Fluxograma de caracterização.

3.1. AMOSTRAGEM INDUSTRIAL

As amostras de polpa e as informações operacionais que embasam esta pesquisa foram obtidas por meio de uma amostragem global da usina de beneficiamento do CMA, na qual foram amostrados todos os fluxos das etapas de beneficiamento ilustrados na Figura 2.

A amostragem foi realizada de forma manual, em intervalos regulares pré-definidos e em quantidades moduladas, pela equipe de Processo Mineral. Para cada fluxo, foram coletados 7 incrementos, espaçados por um período de 10 minutos, com o intuito de obter uma quantidade de massa mínima para compor a amostra primária, bem como mitigar possíveis erros em função da variação e/ou da instabilidade momentânea da usina. As amostras primárias foram acondicionadas em baldes, previamente identificados, e enviadas à Planta Piloto para as etapas de preparação e de caracterização.

A usina de beneficiamento apontava taxa de alimentação de 444,6 t/h, base seca. A etapa de adensamento (Figura 7), que opera com hidrociclones *Krebs*, modelo D20B, apresentava as características operacionais descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características operacionais da etapa de adensamento.

Hidrociclones em operação (disponível)	2 (4)
Pressão de operação	1,52 kgf/cm ²
Diâmetro do <i>apex</i> (D_u)	2,60"
Diâmetro do <i>inlet</i> (D_i)	5,17"
Diâmetro do <i>vortex</i> (D_o)	4,50"

Dentre as variáveis geométricas dos hidrociclones da etapa de adensamento listadas na Tabela 3, o diâmetro do *apex* (D_u) é a única que permite ajustes no decorrer da operação. Esse ajuste é, usualmente, realizado para adequar a concentração de sólidos na descarga do *underflow*, e para restringi-lo, deve-se imprimir pressão de ar. A redução do diâmetro do *apex* será tanto maior, quanto for a pressão de ar empregada. Alterado seu tamanho padrão, o mesmo é medido com o auxílio de um compasso e um paquímetro. Por essa razão, o valor apresentado na Tabela 3 corresponde à medida utilizada na amostragem citada. Há de se observar, entretanto, que o seu tamanho padrão é de 3,5".



Figura 7 - Bateria de hidrociclones da etapa de adensamento.

3.2. PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO

3.2.1. PORCENTAGEM DE SÓLIDOS

As amostras primárias, ainda sob a forma de polpa, foram pesadas e seguiram para desaguamento – pelo método de sifonação –, cujo objetivo é a retirada do excesso de água. Posteriormente, foram transferidas às bandejas de alumínio, identificadas e postas para secar em estufa a 100°C. Após verificação da ausência de umidade, as amostras foram novamente pesadas e, através da Equação XII descrita por CHAVES (2002), foram determinadas as porcentagens de sólidos da alimentação e dos produtos da etapa de adensamento.

$$\text{Equação XII} \quad \% \text{ sólidos} = \left(\frac{M_s}{M_s + M_{\text{água}}} \right) \times 100$$

Onde:

$M_{\text{água}}$ = massa de água; e

M_s = massa de sólidos.

3.2.2. HOMOGENEIZAÇÃO E QUARTEAMENTO

As amostras secas foram desagregadas e homogeneizadas em pilha cônica e, em seguida, em pilha alongada, na qual foram fracionadas em alíquotas de 500g, sendo o restante arquivado para possíveis reanálises. As frações de 500g foram reduzidas a pequenas alíquotas homogêneas, em quarteador *Jones*, para análises granulométricas, químicas e densitárias. A Figura 8 ilustra as etapas de homogeneização das amostras e preparação das alíquotas.

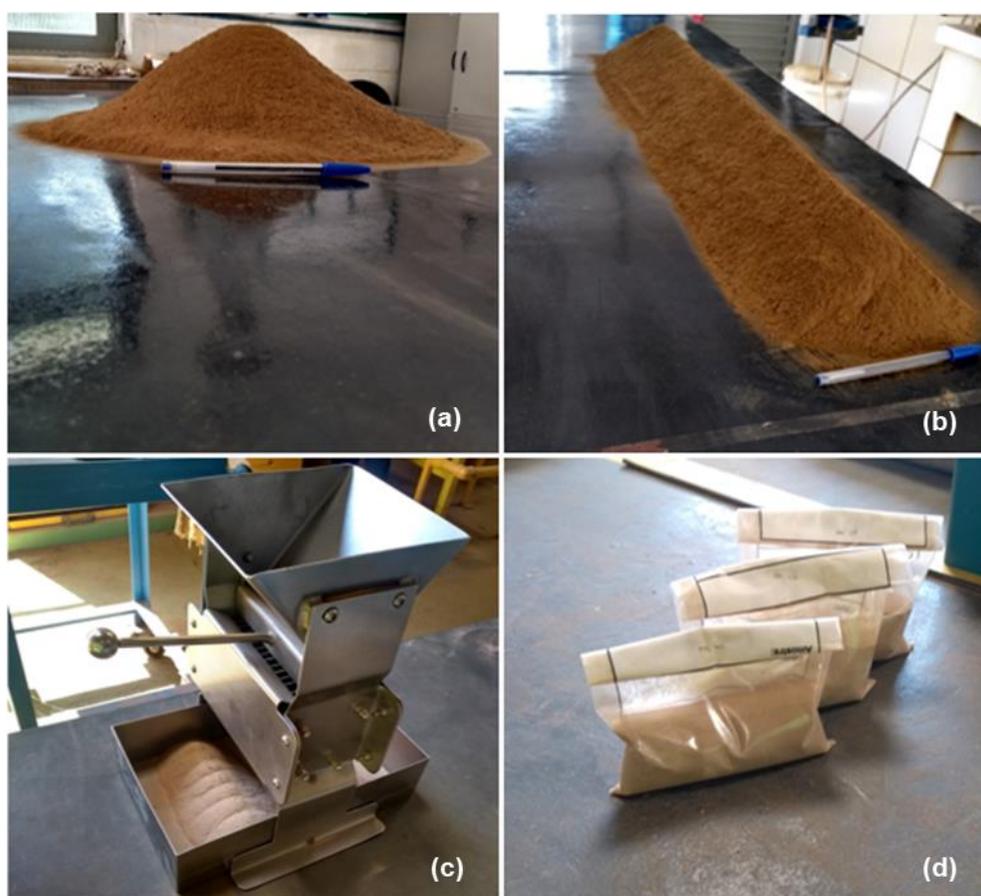


Figura 8 - (a) Pilha Cônica. (b) Pilha Alongada. (c) Quarteador *Jones*. (d) Alíquotas.

3.2.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica das amostras foi determinada através do peneiramento, realizado a úmido, no peneirador suspenso da Figura 9. Foram utilizadas as seguintes malhas da série Tyler: 48#, 65#, 100#, 150#, 200#, 270#, 325#, 400# e 635#.

As amostras, preparadas à 50% de sólidos, foram peneiradas até que a água coletada na descarga estivesse tão límpida quanto à água adicionada no peneirador e não houvessem assim, partículas de minério passando pela malha de menor abertura.



Figura 9 - Peneirador suspenso.

3.2.4. DENSIDADE DO MINÉRIO

A densidade do minério que alimenta o hidrociclone é um importante parâmetro para a utilização do modelo matemático em estudo. De acordo com Sampaio, França e Braga (2007), a picnometria é o método mais prático para sua determinação, através do qual se determina a densidade do minério, pesando-o cuidadosamente e, em seguida, medindo seu volume em função do volume que o mesmo desloca um líquido conhecido, nesse caso, a água.

A densidade da amostra em estudo foi calculada com base na Equação XIII, descrita por SAMPAIO, FRANÇA e BRAGA (2007) e utilizando um picnômetro semelhante ao da Figura 10.

Equação XIII

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)}$$

Onde:

A_1 = massa do picnômetro;

A_2 = massa do picnômetro + amostra;

A_3 = massa do picnômetro + amostra + água; e

A_4 = massa do picnômetro + água.



Figura 10 - Picnômetro.

3.3. BALANÇO DE MASSA

Em função da ausência de medidores de vazão na usina, a amostragem global e a realização de análises químicas permitiram obter informações necessárias para o desenvolvimento do balanço de massa da usina, assim como calcular a vazão mássica que alimenta a etapa de adensamento, variável de suma importância para a simulação de otimização da etapa.

As equações XIV, XV e XVI, que correspondem à conservação de massa, partição em hidrociclones e recuperação mássica em etapas de concentração e/ou purificação, respectivamente, foram as premissas para os cálculos do balanço de massa.

Equação XIV $A = C + R$

Equação XV $\% \text{ Partição} = \left(\frac{\% \text{ Sól.}_{U/F} \times (\% \text{ Sól.}_{\text{Alim.}} - \% \text{ Sól.}_{O/F})}{\% \text{ Sól.}_{O/F} \times (\% \text{ Sól.}_{U/F} - \% \text{ Sól.}_{O/F})} \right) \times 100$

Equação XVI $\text{Recuperação Mássica} = \left(\frac{(a - r)}{(c - r)} \right) \times 100$

Onde:

A = massa da alimentação (t/h);

a = teor de P_2O_5 da alimentação para etapas de flotação ou teor de Fe_2O_3 da alimentação para etapas de SMBI (%);

C = massa do concentrado (t/h);

c = teor de P_2O_5 do concentrado para etapas de flotação ou teor de Fe_2O_3 do concentrado para etapas de SMBI (%);

R = massa do rejeito (t/h);

r = teor de P_2O_5 do rejeito para etapas de flotação ou teor de Fe_2O_3 do rejeito para etapas de SMBI (%);

$\% \text{ Sól.}_{\text{Alim.}}$ = porcentagem de sólidos da alimentação (%);

$\% \text{ Sól.}_{O/F}$ = porcentagem de sólidos do *overflow* (%); e

$\% \text{ Sól.}_{U/F}$ = porcentagem de sólidos do *underflow* (%).

3.4. SIMULAÇÕES SEGUNDO O MODELO DE PLITT

As simulações de previsibilidade, segundo o modelo matemático de Plitt empregadas nesta pesquisa, consistiram em: a) imputar os dados e os parâmetros obtidos na amostragem e nos ensaios experimentais e b) ajustar os parâmetros de porcentagem de sólidos e de pressão de alimentação, bem como o do diâmetro do

apex, de modo a otimizar os parâmetros de eficiência m , partição, granulometria do *overflow* e porcentagem de sólidos do *underflow*.

A delimitação das simulações foi baseada na metodologia do planejamento fatorial do tipo 3^3 , por meio da qual se investiga cada fator em três níveis de interesse. As variáveis analisadas e os seus respectivos níveis reais e codificados estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Planejamento fatorial das simulações para otimização da etapa de adensamento.

SIMULAÇÃO	X_1 Sól. aqim.(%)	X_2 Du(")	X_3 Pressão (kgf/cm ²)	X_1	X_2	X_3
1	20,00	2,50	1,25	-1	-1	-1
2	22,50	2,50	1,25	0	-1	-1
3	25,00	2,50	1,25	1	-1	-1
4	20,00	2,75	1,25	-1	0	-1
5	22,50	2,75	1,25	0	0	-1
6	25,00	2,75	1,25	1	0	-1
7	20,00	3,00	1,25	-1	1	-1
8	22,50	3,00	1,25	0	1	-1
9	25,00	3,00	1,25	1	1	-1
10	20,00	2,50	1,5	-1	-1	0
11	22,50	2,50	1,5	0	-1	0
12	25,00	2,50	1,5	1	-1	0
13	20,00	2,75	1,5	-1	0	0
14	22,50	2,75	1,5	0	0	0
15	25,00	2,75	1,5	1	0	0
16	20,00	3,00	1,5	-1	1	0
17	22,50	3,00	1,5	0	1	0
18	25,00	3,00	1,5	1	1	0
19	20,00	2,50	1,75	-1	-1	1
20	22,50	2,50	1,75	0	-1	1
21	25,00	2,50	1,75	1	-1	1
22	20,00	2,75	1,75	-1	0	1
23	22,50	2,75	1,75	0	0	1
24	25,00	2,75	1,75	1	0	1
25	20,00	3,00	1,75	-1	1	1
26	22,50	3,00	1,75	0	1	1
27	25,00	3,00	1,75	1	1	1

As demais condições operacionais foram fixadas da forma como foram empregadas na amostragem, com exceção do número de hidrociclones que, por ser função do diâmetro do *apex* e da pressão, será obtido pelo modelo de Plitt. As condições operacionais mencionadas acima são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo das variáveis fixadas nas simulações.

Diâmetro do ciclone (D_c)	20,00"
Diâmetro do <i>inlet</i> (D_i)	5,17"
Diâmetro do <i>vortex</i> (D_o)	4,50"
Altura livre do hidrociclone (h)	74,80"
Vazão _{MÁSSICA} (Q_M)	57,91 t/h
Massa específica das partículas (ρ_s)	3,15 g/cm ³
Massa específica do fluido (ρ_f)	1,00 g/cm ³

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresenta-se a análise dos resultados alcançados na caracterização do minério, no balanço de massa da etapa de adensamento e nas simulações. O software *Minitab*® foi utilizado para investigar estatisticamente a relação entre as variáveis em estudo e suas respostas – através dos gráficos de efeitos principais e do coeficiente de correlação de *Pearson* (r') –, bem como para identificar a combinação de variáveis que otimizem os resultados dentro do limite especificado para cada produto –, por meio do modelo de otimização de resposta.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO

4.1.1. PORCENTAGEM DE SÓLIDOS

A Tabela 6 apresenta os resultados das porcentagens de sólidos determinadas para a alimentação e os produtos da etapa de adensamento. Observa-se que a porcentagem de sólidos no *underflow* atende à especificação mínima para a alimentação do filtro, que é de 60%.

Tabela 6 - Porcentagem de sólidos da alimentação e dos produtos da etapa de adensamento.

Alimentação	23,42%
<i>Underflow</i>	61,27%
<i>Overflow</i>	8,37%

4.1.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As distribuições de tamanho das partículas da alimentação e dos produtos da etapa de adensamento são apresentadas na Figura 11, enquanto as do produto fino final, FCA, e seus constituintes, na Figura 12.

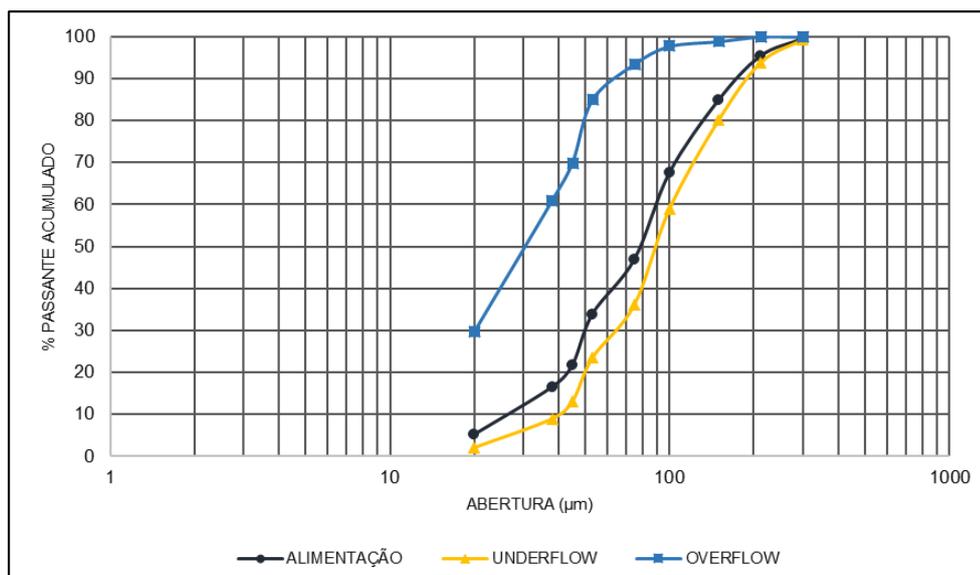


Figura 11 - Distribuição granulométrica da alimentação e dos produtos do adensamento.

Os resultados da Figura 11 indicam que aproximadamente 30,1% das partículas do *overflow* estão retidas na malha de 325# (45μm), ou seja, está praticamente 67% acima dos 18% considerados na especificação máxima do produto fino final. Por outro lado, o *underflow* está dentro de sua especificação granulométrica máxima, de 20% retido na malha 100# (150μm).

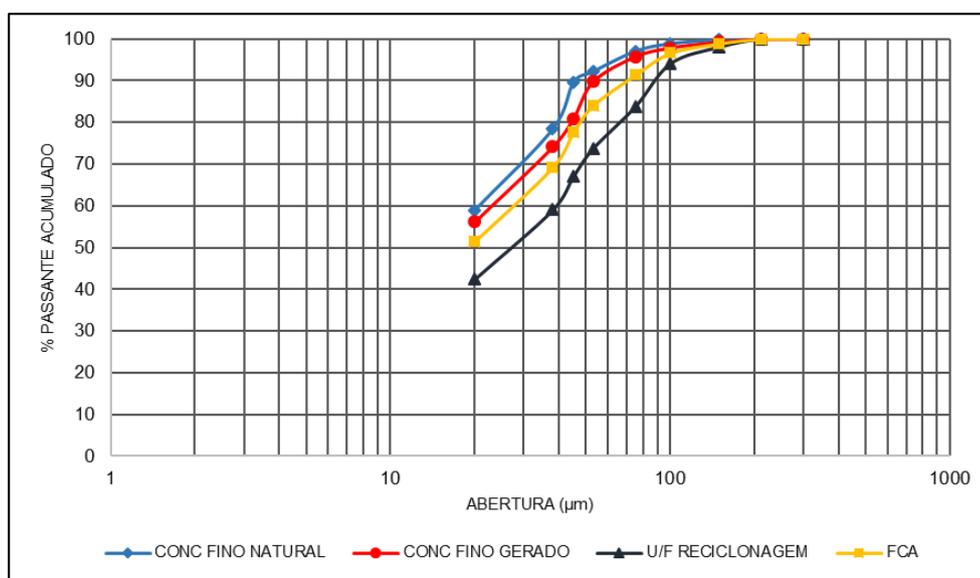


Figura 12 - Distribuição granulométrica do FCA e de seus constituintes.

A Figura 12 reforça o impacto da granulometria grosseira do *overflow* da etapa de adensamento sobre o FCA, o qual é incorporado através do *underflow* da

reciclonagem. O FCA está com 22,4% de partículas retidas na malha de 325#, aproximadamente 24% acima de sua especificação granulométrica, que é de 18%.

Vale ressaltar que apenas o concentrado fino natural está de acordo com a especificação, visto que o gerado está ligeiramente acima, com 19,0%. No entanto, é nítido que o impacto do produto fino do adensamento foi o mais expressivo sobre o FCA, uma vez que esse representa aproximadamente um terço do produto final e os seus valores estão muito destoantes do recomendado.

4.1.3. DENSIDADE DO MINÉRIO

A metodologia descrita no tópico 3.2.4 foi realizada em triplicata. O resultado médio da densidade do minério foi de 3,15 g/cm³, com um desvio padrão de 0,04 g/cm³. As massas aferidas, bem como as densidades calculadas para cada ensaio, estão dispostas na Tabela 7.

Tabela 7 - Ensaio de picnometria.

	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3
A ₁	35,32	35,32	35,32
A ₂	39,21	38,09	39,80
A ₃	94,87	94,13	95,27
A ₄	92,23	92,23	92,21
ρ_s (g/cm³)	3,11	3,18	3,15

4.2. BALANÇO DE MASSA

Segundo o balanço de massa da etapa de adensamento, descritos na Tabela 8, o *by pass* foi de 14,39% e a partição de 74,43%, obtidos através das equações I e II, respectivamente. Já a vazão volumétrica de polpa estipulada foi de 104,28 m³/h

para cada hidrociclone, sendo condizente com a capacidade máxima, segundo a Equação V, que é de aproximadamente 171,02 m³/h.

Tabela 8 - Balanço de massa da etapa de adensamento.

		ALIMENTAÇÃO	UNDERFLOW	OVERFLOW
	VAZÃO_{MÁSSICA} (t/h)	57,91	43,10	14,81
MINÉRIO	VAZÃO_{VOLUMÉTRICA} (m³/h)	18,38	13,68	4,70
	DENSIDADE (g/cm³)	3,15	3,15	3,15
	VAZÃO_{MÁSSICA} (t/h)	189,35	27,24	162,11
ÁGUA	VAZÃO_{VOLUMÉTRICA} (m³/h)	190,18	27,36	162,82
	DENSIDADE (g/cm³)	1,00	1,00	1,00
	VAZÃO_{MÁSSICA} (t/h)	247,26	70,34	176,92
	VAZÃO_{VOLUMÉTRICA} (m³/h)	208,56	41,04	167,52
POLPA	DENSIDADE (g/cm³)	1,19	1,71	1,06
	% SÓLIDOS	23,42%	61,27%	8,37%

4.3. SIMULAÇÃO COM O MODELO DE PLITT

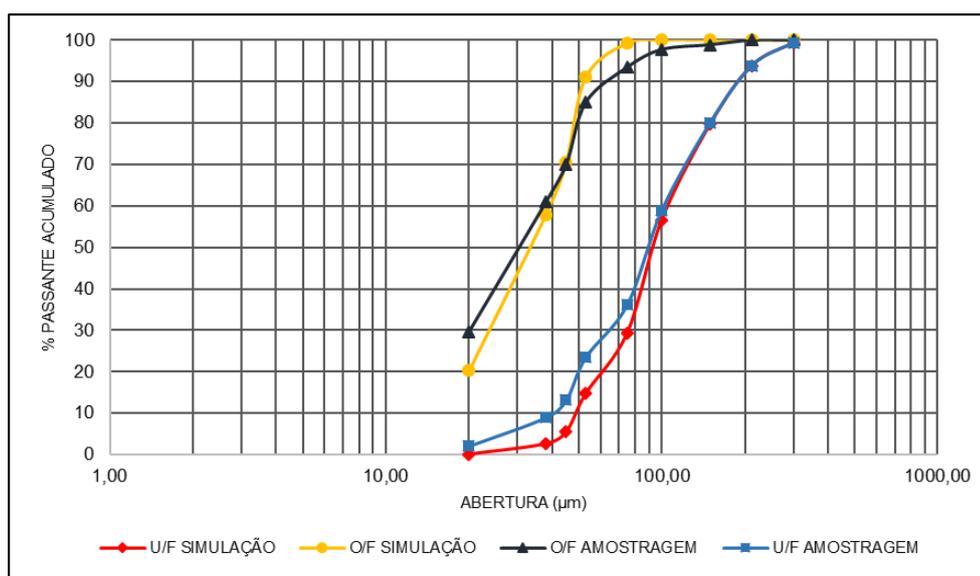
4.3.1. VALIDAÇÃO DO MODELO

O objetivo dessa análise foi certificar a precisão e a representatividade do modelo de Plitt para os hidrociclones e o minério em estudo. De acordo com a Tabela 9, utilizando o modelo proposto por Plitt e imputando os mesmos parâmetros da amostragem – apresentados nas Tabelas 3 e 8 –, as principais respostas de análise da etapa de adensamento apresentaram grande correlação com a amostragem, com erros dentro do limite de tolerância.

Tabela 9 - Comparativo dos principais resultados de amostragem e simulação.

	AMOSTRAGEM (%)	SIMULAÇÃO (%)	ERRO (%)
% Sólidos Underflow	61,27	61,55	0,45
% Sólidos Overflow	8,37	8,21	1,96
% Retido Acum. 100# Underflow	19,90	20,23	1,64
% Retido Acum. 325# Overflow	30,07	27,67	7,99
Partição	74,43	74,95	0,70
By Pass	14,39	14,32	0,48

Comparando os resultados de granulometria dos produtos amostrados e simulados (Figura 13), observa-se que, ainda que o parâmetro de tamanho das partículas tenha apontado um maior erro, as curvas de distribuição granulométrica apresentam comportamentos semelhantes e as diferenças são relativamente baixas, certificando que o modelo para o hidrociclone e o minério em estudo é representativo.

**Figura 13** - Comparativo da granulometria dos produtos amostrados e simulados.

4.3.2. ANÁLISE DOS EFEITOS PRINCIPAIS

Considerando que a eficiência dos hidrociclones está relacionada ao controle das variáveis operacionais, torna-se essencial compreender a influência que as mesmas exercem no processo de adensamento.

O gráfico de efeitos principais representa os resultados médios de cada nível para as variáveis em estudo. Já o coeficiente de correlação de *Pearson*, certifica a intensidade e a direção da relação entre as mesmas, podendo variar de -1 a +1.

Quanto maior for o valor absoluto do coeficiente, mais forte é a relação entre as variáveis. A correlação perto de 0 indica que não há relação linear entre as variáveis. O sinal de cada coeficiente indica a direção da relação. Se ambas as variáveis tendem a aumentar ou diminuir em conjunto, o coeficiente é positivo, e a linha que representa a correlação inclina para cima. Se uma variável tende a aumentar à medida que as outras diminuem, o coeficiente é negativo, e a linha que representa a correlação inclina para baixo (SUPORTE AO MINITAB® 18, 2019)

Os resultados de todas as simulações estão disponíveis no Apêndice.

4.3.2.1. PARTIÇÃO

A Figura 14 ilustra o efeito da pressão, do diâmetro do *apex* e da porcentagem de sólidos da alimentação em função da partição para as simulações realizadas.

Para o caso da pressão (a), observa-se uma variação insignificante, ou seja, dentro do intervalo de variação de pressão estudado, a variação de partição dos hidrociclones é praticamente nula. Isto é comprovado pela baixa correlação apontado pelo coeficiente de *Pearson*, de apenas 0,007. No entanto, por menor que seja a variação, a correlação é direta, e com o aumento da pressão, a partição também aumenta. Esse fato se deve ao aumento da intensidade do campo centrífugo, que possibilita que uma maior quantidade de partículas finas decante, aumentando a proporção de massa que se direciona ao *underflow*.

Ao contrário da pressão, a modificação do diâmetro de *apex* é significativa. Verifica-se em (b) que, com o aumento de sua geometria, a partição também aumenta, uma vez que é favorecido o escoamento por esse orifício.

Já a modificação da porcentagem de sólidos da alimentação (c) é extremamente expressiva, no entanto, é inversamente proporcional, ou seja, ao se aumentar a porcentagem de sólidos, a partição diminui. Com o aumento da densidade de polpa, a sedimentação das partículas é dificultada, diminuindo-se, assim, a partição.

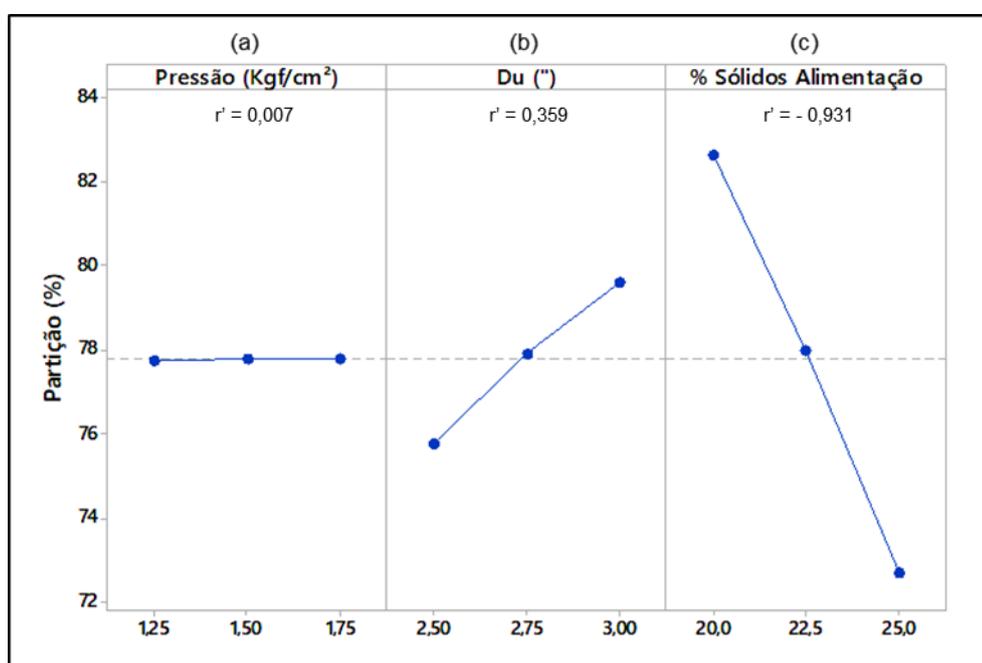


Figura 14 - Gráfico de efeitos principais para a partição, variando pressão (a), diâmetro de *apex* (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).

4.3.2.2. BY PASS

Na Figura 15, é possível compreender a influência da pressão, do diâmetro do *apex* e da porcentagem de sólidos da alimentação sobre o *by pass* para as simulações realizadas.

Segundo o gráfico e o coeficiente de correlação de *Pearson*, em (a), a relação entre pressão e *by pass* é inversa e pouco significativa, sendo justificada pela maior intensidade do campo centrífugo, a qual facilita a decantação das partículas e reporta uma proporção maior de água ao *overflow*.

Já nas simulações variando o diâmetro do *apex* (b), é observado uma variação direta extremamente considerável para o *by pass*, uma vez que, assim como se verificou que o aumento da geometria do *apex* favorece o escoamento de sólidos por esse orifício, o mesmo ocorre para a água.

No caso da porcentagem de sólidos da alimentação (c), a variação é praticamente desprezível e não há uma correlação nítida entre ambas variáveis em função de um comportamento irregular da curva.

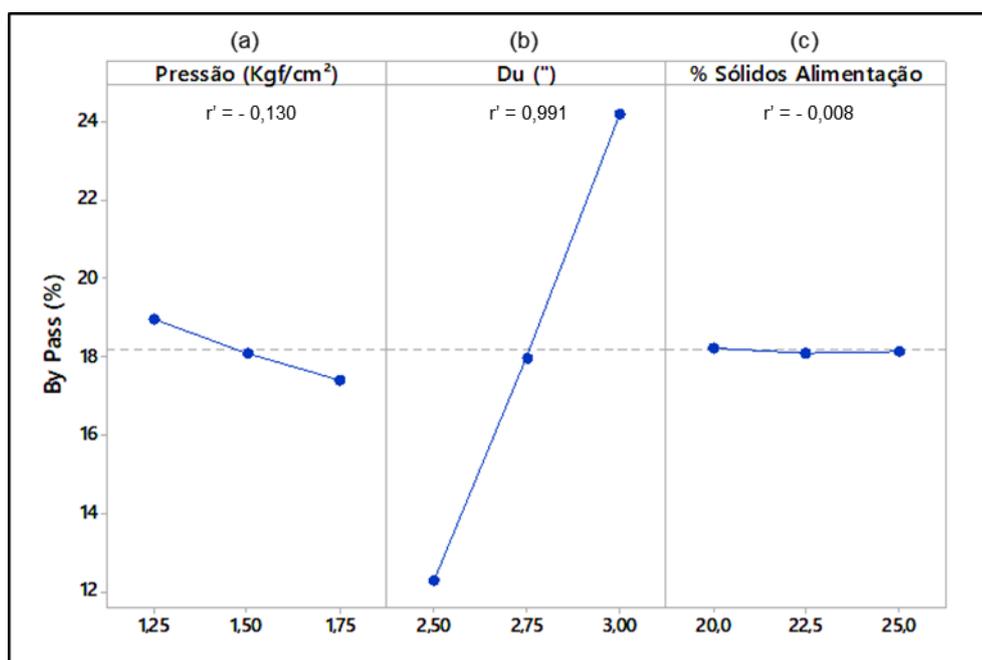


Figura 15 - Gráfico de efeitos principais para o *by pass*, variando pressão (a), diâmetro de *apex* (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).

4.3.2.3. PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NO *UNDERFLOW*

De acordo com a curva e o coeficiente de *Pearson*, em (a), na Figura 16, que apresenta a influência da pressão, do diâmetro do *apex* e da porcentagem de sólidos da alimentação sobre a porcentagem de sólidos do *underflow* para as simulações realizadas, a relação entre a pressão e a concentração de sólidos do *underflow* é direta e pouco significativa. A razão pela qual isso ocorre está relacionada ao aumento do campo centrífugo e da proporção de sólidos que se direciona ao *underflow*, o que, assim, diminui quantidade de água desse produto.

Para o aumento do diâmetro do *apex* (b), é observado uma diluição muito expressiva do *underflow*. Tal comportamento é justificado com base na relação entre geometria do *apex* e *by pass* descrita no tópico 4.3.2.2.

Assim como em (a), a curva e o coeficiente de *Pearson*, em (c), demonstra que a porcentagem de sólidos da alimentação apresenta uma relação direta e pouco significativa com a porcentagem de sólidos do *underflow*. Isso se deve ao aumento da proporção de sólidos que alimenta o hidrociclone e, conseqüentemente, o campo centrífugo, reportando mais água ao *overflow*.

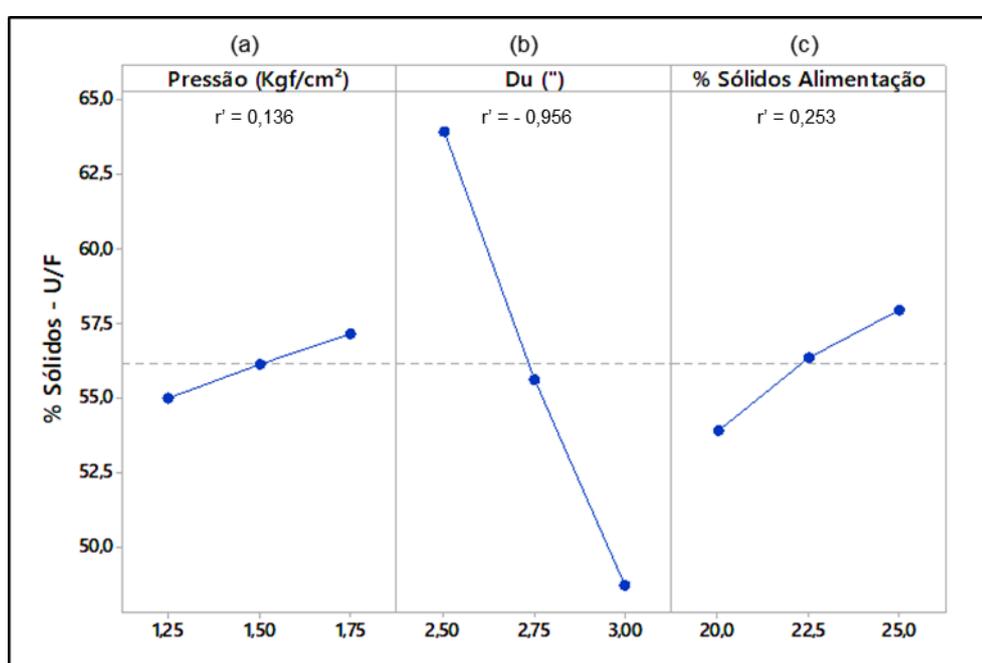


Figura 16 - Gráfico de efeitos principais para a porcentagem de sólidos no *underflow*, variando pressão (a), diâmetro de *apex* (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).

4.3.2.4. GRANULOMETRIA

Tal como observado nas Figuras 17 e 18, os comportamentos granulométricos do *underflow* e do *overflow* são semelhantes ao se alterar as variáveis pressão, diâmetro do *apex* e porcentagem de sólidos da alimentação.

No caso da pressão (a), a variação do diâmetro de corte é extremamente pequena e a relação entre ambas é inversa. O aumento da intensidade do campo centrífugo amplia as chances de partículas finas decantarem, elevando a sua proporção no *underflow*. Dessa forma, os cortes de ambos produtos afinam.

A geometria do *apex* também apresenta relação inversa com o corte dos hidrociclones, entretanto, é pouco considerável. Um maior diâmetro de *apex* favorece o escoamento tanto de partículas grossas quanto de finas, fato que pode ser comparado na análise da influência do diâmetro de *apex* com a partição e o *by pass*, descrito nos tópicos 4.3.2.1. e 4.3.2.2., respectivamente.

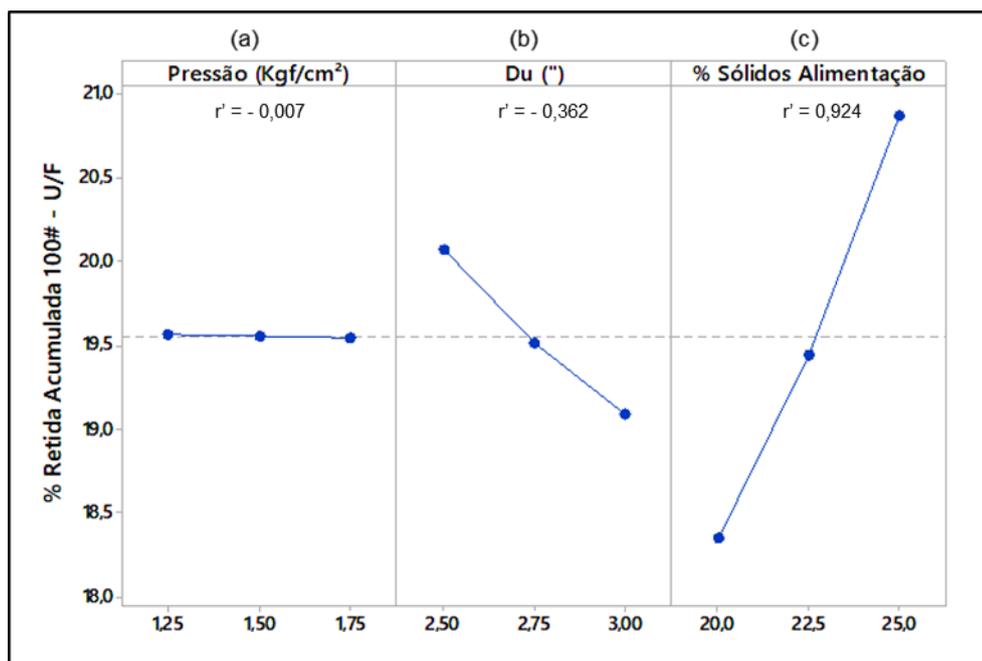


Figura 17 - Gráfico de efeitos principais para a porcentagem retida acumulada na malha 100# no *underflow*, variando pressão (a), diâmetro de *apex* (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).

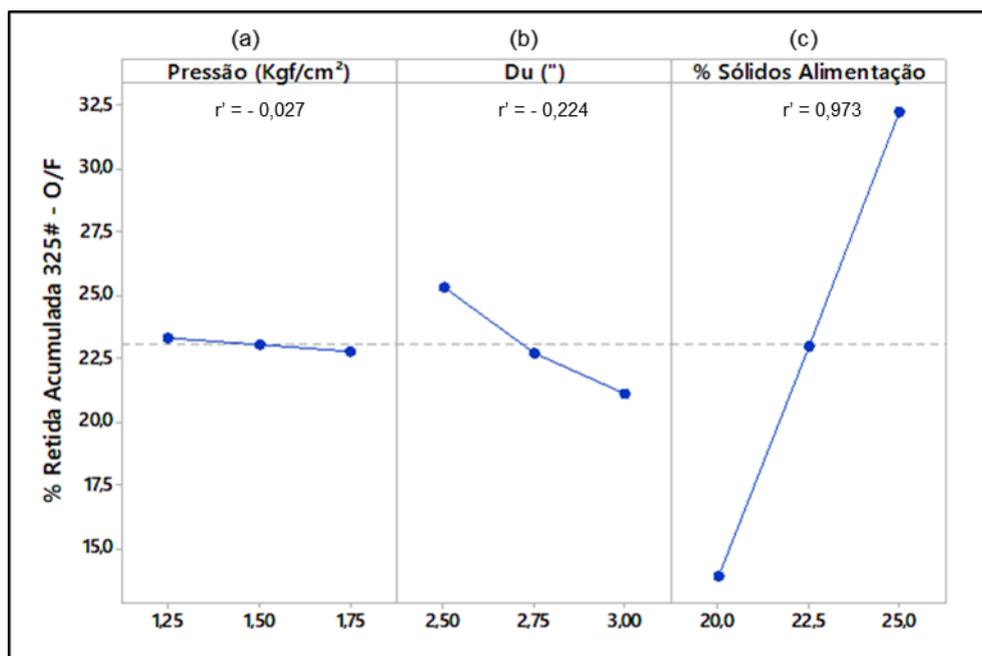


Figura 18 - Gráfico de efeitos principais para a porcentagem retida acumulada na malha 325# no *overflow*, variando pressão (a), diâmetro de *apex* (b) e porcentagem de sólidos de alimentação (c).

E, por fim, a relação entre a porcentagem de sólidos de alimentação e o diâmetro de corte, que é muito significativa. A dificuldade que as partículas – principalmente as finas – possuem de sedimentarem no campo centrífugo, devido ao aumento da concentração de sólidos na polpa, engrossa o corte.

4.3.3. OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO

Ao analisar criteriosamente os resultados, com o auxílio da ferramenta de otimização de respostas, foram determinadas 3 combinações de variáveis que satisfazem as condições inicialmente expostas. Essas são as simulações 1, 10 e 19 cujos resultados estão descritos na Tabela 10. Todas simulações exigiram operação com 2 hidrociclones.

Tabela 10 - Resultados otimizados.

SIMULAÇÃO	X ₁ Sól. alim. (%)	X ₂ Du (")	X ₃ Pressão (kgf/cm ²)	% SÓLIDOS U/F	% RET ACUM 100# - U/F	% RET ACUM 325# - O/F	PARTIÇÃO (%)	BYPASS (%)	<i>m</i>
1	20,00	2,50	1,25	60,72	18,72	15,90	80,99	13,10	3,31
10	20,00	2,50	1,50	62,02	18,71	15,65	81,02	12,40	3,34
19	20,00	2,50	1,75	63,13	18,71	15,45	81,05	11,83	3,37

Embora as 3 simulações satisfaçam as especificações das etapas subsequentes, a simulação 19, que difere das demais pela maior pressão de operação empregada, é a que apresenta o maior percentual de partição e o menor de *by pass*. Uma maior partição na etapa de adensamento reflete em ganhos na produção do concentrado de maior valor agregado para a companhia, que é o GCA.

Vale ressaltar que, em todas as simulações, o parâmetro *m*, que é caracterizado como a eficiência de separação, está acima de 3, o que representa um alto índice de eficiência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados alcançados com o modelo adotado e as análises estatísticas, para otimizar a etapa de adensamento, proporcionando um corte mais fino, uma partição mais elevada e a porcentagem de sólidos no *underflow* especificada para a alimentação do filtro (mínima de 60% de sólidos), deve-se alimentar dois hidrociclones com porcentagem de sólidos de 20%, sob uma pressão de 1,75 Kgf/cm², e substituir ou ajustar os *apex* para 2,5". Com essa configuração, será possível aumentar 9% da produção do concentrado grosso de rocha fosfática da usina de beneficiamento do Complexo Mineroquímico de Araxá, atendendo às especificações granulométricas dos produtos e à porcentagem de sólidos do *underflow*.

Em virtude da parada estratégica da usina, em função das adequações do plano de deposição de rejeitos, não foi possível a realização de novas amostragens para certificar a eficiência desse modelo ou calibrar um novo – principalmente no que diz respeito às granulometrias – às demais características de minério que alimenta a usina. Os modelos matemáticos empíricos de previsibilidade de hidrociclones propostos em literaturas, como o de Plitt, são meras previsões aproximadas da realidade física, passíveis de erro. No entanto, por meio de uma acertada escolha e/ou calibração de algum modelo, as chances de se realizar uma previsão mais assertiva são maiores, o que certamente economizará tempo e dinheiro na otimização de processos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em vista das análises e dos resultados obtidos com essa pesquisa, sugere-se, como possibilidade de continuação deste estudo, as seguintes propostas:

- I. Realizar novas amostragens com outras características de minério para avaliar a eficiência do modelo adotado;
- II. Gerar dados que possibilitem a calibração de um modelo ainda mais eficiente, principalmente, no que diz respeito às granulometrias;
- III. Correlacionar a pressão aplicada para alterar a geometria do *apex*, com o seu diâmetro resultante, para facilitar o ajuste e a adequação em operação; e
- IV. Avaliar a compra de *apex* de tamanho fixo de 2,5” para a realização de testes assistidos em escala industrial, visto que o custo de investimento é baixo.

REFERÊNCIAS

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1987. p. 65-84.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus Editora, 2002. vol. 1. p. 18-178.

CHAVES, A. P.; OBA, C. A. I. **Crítica ao modelo brasileiro de fertilizantes fosfatados de alta solubilidade**. Série Estudos e Documentos, CETEM/MCT, 2004.

GOÉS, M. A. C. de; LUZ, A. B. da; POSSA, M. V. **Amostragem**. CETEM/MCT, 2004. p. 19-49.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. M.; NASCIMENTO, M. Agrominerais: Fosfato. In: LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 148-149.

LUZ, J. A. M. da. Conversibilidade entre distribuições probabilísticas usadas em modelos de hidrociclones. In: **REM**, Ouro Preto, 58(1), 2005. p. 89-93.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 268-275.

MACHACA, Y. Y. C. **Modelagem da classificação de polpas de bauxita e de fosfato em hidrociclones**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. p. 58-61.

MELO, A. C. H. de. **Modelagem da classificação de minério de ferro em hidrociclones**. 2010. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. p. 18-24.

NAGESWARARAO, K.; WISEMAN, D. M.; NAPIER-MUNN, T. J. Two empirical hydrocyclone models revisited. In: **Minerals Engineering**, 17, 2004. p. 671-687.

OLIVEIRA, M. L. M. de; AQUINO, J. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 3-36.

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

REIS, R. C. **Estudo da estabilidade de taludes da mina de Tapira-MG**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

ROCHA, B. G. **Análises preliminares de desempenho do circuito de moagem da Vale Fertilizantes de Araxá-MG**. 2013. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Petróleo) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 39-41.

SANTANA, R. C. de. **Análise da influência do tamanho da partícula na flotação da apatita em coluna**. 2007. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SANTANA, R. C. de. **Efeito da altura da coluna na flotação de minério fosfático em diferentes granulometrias**. 2011. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S; MATOS, J. D. V. Modelo empírico para cálculo do diâmetro de corte corrigido de hidrociclones. In: **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 9, n. 4, 2012. p. 302-308.

SILVA, F. B. R. da. **Análise das principais variáveis na flotação industrial do Complexo de Mineração de Tapira-MG**. 2016. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SOUZA, A. E. de; FONSECA, D. S. **Economia mineral do Brasil**. Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 2009.

SUPOORTE AO *MINITAB*® 18. **Interpretar os principais resultados para Correlação**. Copyright© 2019 Minitab, LLC. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/interpret-the-results/key-results/>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

VALE FERTILIZANTES. **Relatório: Descritivos de Processos Complexo Mineroquímica de Araxá – CMA.** (Arquivo Interno). Araxá, 2011. p. 7-16.

VALE FERTILIZANTES. **Relatório: Descritivo Usina.** (Arquivo Interno). Araxá, 2012. p. 1-67.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' Mineral Processing Technology, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.** Elsevier Science & Technology Books. 2006. 7th edition. p. 212-223.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. In: **FAO fertiliser and plant nutrition**, Bulletin n.13, FAO, Rome, Italy, 2004.

APÊNDICE

Tabela AP 1 - Resultados das simulações.

SIMULAÇÃO	X ₁	X ₂	X ₃	% SÓLIDOS UNDERFLOW	% RET ACUM 100# UNDERFLOW	% RET ACUM 325# OVERFLOW	PARTIÇÃO	BY PASS	m	QUANTIDADE DE HIDROCICLONES OPERANDO
1	-1	-1	-1	60,72	18,72	15,90	80,99	13,10	3,31	2
2	0	-1	-1	63,04	19,96	25,58	75,96	12,93	3,37	2
3	1	-1	-1	64,46	21,57	35,09	70,30	12,92	3,42	2
4	-1	0	-1	52,32	18,33	13,89	82,73	18,85	3,03	2
5	0	0	-1	54,77	19,41	22,90	78,10	18,73	3,09	2
6	1	0	-1	56,39	20,83	32,15	72,80	18,77	3,14	2
7	-1	1	-1	45,52	18,04	12,98	84,07	25,15	2,76	2
8	0	1	-1	48,00	19,00	21,31	79,79	25,09	2,81	2
9	1	1	-1	49,75	20,26	30,15	74,82	25,19	2,85	2
10	-1	-1	0	62,02	18,71	15,65	81,02	12,40	3,34	2
11	0	-1	0	64,35	19,95	25,39	75,99	12,22	3,40	2
12	1	-1	0	65,76	21,56	34,95	70,32	12,20	3,46	2
13	-1	0	0	53,48	18,32	13,56	82,78	18,00	3,07	2
14	0	0	0	55,94	19,40	22,61	78,14	17,87	3,13	2
15	1	0	0	57,57	20,82	31,93	72,83	17,89	3,18	2
16	-1	1	0	46,52	18,02	12,57	84,13	24,18	2,80	2
17	0	1	0	49,03	18,99	20,93	79,85	24,10	2,85	2
18	1	1	0	50,79	20,25	29,83	74,87	24,18	2,89	2
19	-1	-1	1	63,13	18,71	15,45	81,05	11,83	3,37	2
20	0	-1	1	65,46	19,95	25,22	76,01	11,64	3,43	2
21	1	-1	1	66,88	21,56	34,83	70,33	11,61	3,49	2
22	-1	0	1	54,47	18,31	13,29	82,82	17,31	3,10	2
23	0	0	1	56,95	19,39	22,37	78,18	17,16	3,16	2
24	1	0	1	58,58	20,81	31,75	72,86	17,17	3,21	2
25	-1	1	1	47,39	18,01	12,23	84,18	23,36	2,83	2
26	0	1	1	49,92	18,98	20,62	79,89	23,27	2,88	2
27	1	1	1	51,69	20,24	29,58	74,91	23,34	2,93	2