

UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO FACULDADE DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Tema: Uso do modelo de Plitt no dimensionamento de um circuito de ciclonagem para uma deslamagem eficiente do minério de Nióbio de Araxá

Nome do Autor: Umbelino da Silva João

Trabalho de final de curso para obtenção do grau de Engenheiro em Engenharia de Minas

Orientador(a):

Prof. Doutora Alice Ceita e Almeida Mestre Jorge Simões

Luanda **2021**

UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO FACULDADE DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Tema: Uso do modelo de Plitt no dimensionamento de um circuito de ciclonagem para uma deslamagem eficiente do minério de Nióbio de Araxá

Nome do Autor: Nº108030 - Umbelino da Silva João

Tese para obtenção do grau de Engenheiro em Engenharia de Minas

Orientador(a) Científico:

Prof. Doutora Alice Ceita e Almeida Mestre Jorge Simões

Luanda **2021**

RESUMO

Classificação é uma parte integral das operações de cominuição que controla o desempenho do circuito. Os ciclones são geralmente usados para o desempenho da função de deslamagem (classificação visando remover certas partículas consideradas indesejadas para o circuito). Os ciclones oferecem inúmeras vantagens como: Baixa área de ocupação, baixo custo de aquisição e instalação.

Apesar das vantagens, os ciclones são classificadores ineficientes pois predominantemente dependem da hidrodinâmica para o efeito de separação. O presente trabalho tem como objectivo de estudar a influência das variáveis geométricas e operacionais ligadas aos ciclones no modelo de estimação de Plitt para uma deslamagem eficiente do minério proveniente do moinho de bolas. As influências das variáveis mencionadas anteriormente impactam positiva ou negativamente no desempenho do ciclone, constituindo desta forma um problema. A remoção das partículas final com dimensão abaixo de 5µm é o principal objectivo de deslamar o minério.

A alimentação do circuito de deslamagem proveniente do moinho é de 145t/h. O circuito de deslamagem é dividido em três estágios e em cada estágio é feito uma ciclonagem e seguidamente o *Underflow* é reciclonado para melhorar os resultados da classificação. A soma entre o *Underflow* da reciclonagem dos estágios 1 e 2 é igual a 86,97t/h e servirá de alimentação para o processo de flutuação das partículas grossas. O *Overflow* das fases de ciclonagem e reciclonagem nos estágios 1 e 2 Alimentam o 3 estágio com um fluxo de 57,9t/h. O *Underflow* da reciclonagem do 3 estágio é igual a 34,18t/h e servirá de alimentação para o processo de flutuação das partículas finas. O *Overflow* das fases de ciclonagem e reciclonagem do 3° estágio representam a massa mineral maioritariamente composta por partículas com dimensão menor que 5µm e igual a 23,84t/h.

Palavra-chave: Classificação, minério, deslamagem, ciclonagem, reciclonagem, Plitt, Underflow e Overflow.

ABSTRACT

Classification is an integral part of comminution operations that controls circuit performance. Hydrocyclones are generally used for the performance of the function (sorting for remover certain unwanted centralized particles for the circuit). Hydrocyclones offer innumerous advantages such as: Low area of occupancy, relatively low cost of acquisition and application.

Despite the advantages, the Hydrocyclones are inherent as inefficient classifiers because predominantly hydrodynamic dependent for the separation effect. The present work aims to study the influence of the geometric and operational variables linked to cyclones in the PLITT estimation model for an efficient ore shredder from the ball mill. The influence of the aforementioned variables positively or negatively impacts the performance of the cyclone, thus constituting a problem. Removing the final particles with size below 5m is the main goal of desliming the ore.

The feed of the slope circuit from the mill is 145t / h. The shredded circuit is divided into three stages and at each stage is done a Cyclonage and then the *Underflow* is recycled to improve the classification results. The sum between the *Underflow* of the recyclonage of stages 1 and 2 is equal to 86.97t / h and will serve as feeding for the flotation process of the thick particles.

The *Overflow* of the cyclon and recyclonage phases in the stages 1 and 2 feed the 3 stages with a flow of 57.9 / h. The underflow of the 3 stage recyclonage is equal to 34.18t / h and will serve feeding for the floating process of thin particles. The overflow of the cyclon and recyclonage of the 3rd stage represent the mineral mass mostly composed of particles with a smaller size than 5µm and equal to 23.84t / h.

DEDICATÓRIA

Eu estarei sempre endividado com a minha mãe e meu pai por suas inspirações, amor, suporte e incontáveis orações. Eu jamais pediria por pais melhores que eles. Eu dedico este trabalho aos meus pais.

Por outro lado, dedico este trabalho aos amigos que ganhei e perdi ao longo dos meus anos de estudo. Amigos esses que compartilhavam o mesmo sonho que eu, o sonho de completar um curso de Engenharia. Principalmente aos que infelizmente não conseguiram realizar o sonho porque tiveram que deixar este mundo mais cedo, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradecer a Deus, por me fornecer força, coragem, sabedoria e conhecimento para completar este trabalho.

Agradeço profundamente a minha orientadora, Professora Alice de Ceita e Almeida pelos comentários, sugestões, imenso conhecimento e contínuo suporte dados ao longo do tempo que foi necessário para a realização deste trabalho.

Além da minha orientadora gostaria de também agradecer ao Engenheiro Douglas Richter professor Faculdade de São Bernardo do Campo – São Paulo pelo suporte fornecido no período inicial das pesquisas, suas contribuições foram de imensa importância para a marcação dos primeiros passos deste trabalho.

Para mim é um prazer agradecer meus amigos Eng. Valdimiro G. Caculo e bem como Eng. Cláudia Santos pelo seu contínuo suporte, e encorajamento especialmente durante os momentos mais difíceis ao longo da realização da pesquisa. De forma geral gostaria de também agradecer aos meus colegas que ao longo da formação contribuíram directa ou indirectamente para a concretização do actual trabalho.

Agradeço especialmente a minha família: Minha mãe e pai, irmãos e irmãs por sempre estarem ao meu lado, fornecendo suporte e encorajamento durante os meus anos de estudo.

ÍNDICE

| RESUMOi | | | | |
|------------|------------------|--|--|--|
| ABSTRACTii | | | | |
| DE | DEDICATÓRIAiii | | | |
| AG | AGRADECIMENTO iv | | | |
| Lis | tas das figu | ıras vii | | |
| NO | MENCLA' | TURA xii | | |
| 1. | Capítul | o 1: Introdução | | |
| | 1.1 | Generalidades | | |
| | 1.2 | Características Geológicas e Mineralógicas 10 | | |
| | 1.2.1 | Densidade do sólido | | |
| | 1.2.2 | Composição química11 | | |
| | 1.3 | Localização geográfica 11 | | |
| | 1.4 | Problema 12 | | |
| | 1.5 | Fundamento do problema 12 | | |
| | 1.6 | Hipóteses | | |
| | 1.7 | Objectivos da pesquisa 12 | | |
| 2. 0 | Capítulo 2: | Revisão da Literatura14 | | |
| | 2.1 | Introdução 14 | | |
| | 2.2 | Processo de classificação em circuitos de cominuição 14 | | |
| | 2.3 | Hidrociclone - Unidade e descrição do processo | | |
| | 2.3.1 | Caracterização geométrica | | |
| | 2.3.2 | Princípio de funcionamento de um hidrociclone 17 | | |
| | 2.3.3 | Influência das variáveis operacionais na classificação por hidrociclones 18 | | |
| | 2.3.4 | Aplicação dos Hidrociclones 18 | | |
| | 2.3.5 | Vantagens e desvantagens dos hidrociclones 19 | | |
| | 2.3.6 | Parâmetros para avaliação da eficiência 20 | | |
| | 2.3.6.1 | Curvas de eficiência | | |
| | 2.4 | Dimensionamento de hidrociclones | | |
| | 2.5 | Circuitos de Ciclonagem | | |
| | 2.6 | Modelos matemáticos para avaliação da eficiência de Hidrociclones 27 | | |
| | 2.6.1 Mode | elo de Plitt | | |
| 3. | Capítul | o três: Circuito de deslamagem da lavaria de araxá | | |
| | 3.1 | Introdução | | |

| | 3.2 | Análise geral do processo de ciclonagem | 30 |
|-----|----------------------------|---|----|
| | 3.2.1 | Circuito fechado directo de Moagem | 31 |
| | 3.2.1.1 moagem | Distribuição granulométrica do Overflow no circuito fechado de 32 | |
| | 3.2.2 Circu | ito de deslamagem | 33 |
| | 3.2.2.1 | 1° Estágio de deslamagem | 34 |
| | 3.2.2.1.1 | Ciclonagem | 34 |
| | 3.2.2.1.2 | Reciclonagem | 40 |
| | 3.2.2.2 | 2º Estágio de Deslamagem | 43 |
| | 3.2.2.2.1 | Ciclonagem | 43 |
| | 3.2.2.2.2 | Reciclonagem | 49 |
| | 3.2.2.3 | Alimentação para a Flutuação das partículas Grossas | 53 |
| | 3.2.2.2.4 | Alimentação para o 3º estágio de deslamagem | 53 |
| | 3.2.2.3 | 3º Estágio de Deslamagem | 54 |
| | 3.2.2.3.1 | Ciclonagem | 54 |
| | 3.2.2.3.2 | Reciclonagem | 59 |
| | 3.2.2.4 Alii | mentação para o circuito de Flutuação das partículas Finas | 63 |
| | 3.2.2.5 | Analise e descrição dos resultados no processo de deslamagem | 63 |
| | 3.2.2.6 | Massa de mineral útil perdida no circuito de deslamagem | 67 |
| | 3.2.2.7 | Controlo da influência das variáveis operacionais e geométricas | 68 |
| 4. | Conclus | ões | 71 |
| 5. | Recome | ndações | 72 |
| Ref | Referências Bibliográficas | | |

Listas das figuras

| Figura 1.1 - Localização geográfica da mina de Araxá | . 11 |
|--|--------------|
| Figura 2.1 - Representação geométrica de um Hidrociclone | . 15 |
| Figura 2.2 - Representação geral do funcionamento de um Hidrociclone | . 17 |
| Figura 2.3 - Bateria de ciclones para deslamagem do minério da mina de Araxá | . 19 |
| Figura 2.4 – Curvas de eficiência Corrigida e Padrão | 21 |
| Figura 2.5 - Classificação dos diferentes tipos de fluxo no Underflow | . 22 |
| Figura 2.6 - Diâmetro do ciclone para ciclones padrões | . 24 |
| Figura 2.7 - Faixa da capacidade para hidrociclone padrão - 1 | 25 |
| Figura 2.8 - Faixa da capacidade para hidrociclone padrão - 2 | 25 |
| Figura 2.9 - Curvas da eficiência para as configurações único e múltiplos ciclones | . 26 |
| Figura 2.10 - Configurações de circuito de ciclonagem múltiplo estágio | . 26 |
| Figura 3.1 – Fluxograma do circuito de deslamagem composto por 3 estágios está | .gio . 30 |
| Figura 3.2 - Curva granulométrica do Overflow no circuito de moagem | . 33 |
| Figura 3.4 - Fluxograma do circuito de moagem | . 33 |
| Figura 3.5 - Representação das tentativas para estimação da curva de eficiência ciclonagem do 1º estágio de deslamagem | na . 34 |
| Figura 3.7 - Percentagem de sólidos no <i>Underflow</i> e <i>Overflow</i> em diferentes densida de sólidos | des . 39 |
| Figura 3.8 - Estimação da Curva de eficiência para reciclonagem do 1ºestágio deslamagem | de 41 |
| Figura 3.9 - Fluxograma do 1º Estágio de Deslamagem | . 43 |
| Figura 3.10 - Representação das tentativas de estimação para Curva de eficiência ciclonagem do 2° estágio de deslamagem | na 45 |
| Figura 3.11- Estimação da Curva de eficiência para ciclonagem do 1ºestágio deslamagem | de . 47 |
| Figura 3.12 - Estimação da Curva de eficiência para reciclonagem do 2ºestágio deslamagem | de 51 |
| Figura 3.13 - Fluxograma do 2º Estágio de Deslamagem | . 52 |
| Figura 3.14- Representação das tentativas de estimação para Curva de eficiência ciclonagem do 3º estágio de deslamagem | na . 55 |
| Figura 3.15 - Estimação da Curva de eficiência para ciclonagem do 3ºestágio deslamagem | de . 57 |
| Figura 3.16 - Estimação da Curva de eficiência para reciclonagem do 3ºestágio deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa) | de 61 |
| Figura 3.17 - Fluxograma do 3º Estágio de Deslamagem | . 62 |

| Figura 3.18 - Estimação das curvas de eficiência para as configurações de múltiplos estágios e de estágio único |
|---|
| Figura 3.19 - Estimação das curvas reduzidas da eficiência no estágio 1 de deslamagem com e sem reciclonagem |
| Figura 3.20 - Estimação das curvas reduzidas da eficiência no estágio 2 de deslamagem com e sem reciclonagem |
| Figura 3.21 - Estimação das curvas reduzidas da eficiência no estágio 3 de deslamagem com e sem reciclonagem |
| Figura 3.22 - Circuito geral de deslamagem |

Lista de tabelas

| Tabela 1.1 - Composição mineralógica do minério de Araxá10 |
|--|
| Tabela 1.2 Composição química do minério de Araxá) 11 |
| Tabela 2.1 - Influência da relação entre o ápex e o Vortex no tipo de descarga |
| Tabela 2.2 - Relação do D50(aprox) com a granulometria desejada |
| Tabela 3.1 - Características granulométrico-químicas do minério de araxá |
| Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica do Overflow do ciclone no circuito de moagem 32 |
| Tabela 3.3 - Dimensões dos parâmetros geométricos dos ciclones na ciclonagem do 1º estágio de deslamagem 35 |
| Tabela 3.4 - Descrição do fluxo que alimenta os ciclones para a ciclonagem do 1º estágio de deslamagem 36 |
| Tabela 3.5 - Partição padrão e corrigida do Underflow para o ciclone na ciclonagem do 1° estágio de deslamagem |
| Tabela 3.6 - Partição corrigida do Underflow e Overflow para os ciclones na ciclonagemdo 1 º estágio de deslamagem |
| Figura 3.6 - Estimação da curva de eficiência para a ciclonagem do 1ºestágio de deslamagem |
| Tabela 3.7 - Balanço de massas dos ciclones na ciclonagem do 1º estágio de deslamagem 39 |
| Tabela 3.8 - Balanço do fluxo do Underflow antes de alimentar os ciclones para areciclonagem do estágio 140 |
| Tabela 3.9 - Partição padrão e corrigida do Underflow para o ciclone na reciclonagem do1 º estágio de deslamagem |
| Tabela 3.10 - Partição corrigida do Underflow e Overflow para os ciclones nareciclonagem do 1 ° estágio de deslamagem |
| Tabela 3.11 - Balanço de massas dos ciclones na reciclonagem do 1º estágio de deslamagem 42 |
| Tabela 3.12 - Balanço do fluxo que alimentará os ciclones para a ciclonagem do 2º estágiode deslamagem44 |
| Tabela 3.13 - Distribuição granulométrica do produto que alimentará os ciclones naciclonagem do 2º estágio de deslamagem44 |
| Tabela 3.14 - Dimensões dos parâmetros geométricos para os ciclones na ciclonagem do2º estágio de deslamagem |
| Tabela 3.15 - Descrição do fluxo que alimentará os ciclones para ciclonagem do 2º estágiode deslamagem46 |
| Tabela 3.16 - Partição padrão e corrigida do Underflow para o ciclone na ciclonagem do2 º estágio de deslamagem |
| Tabela 3.17 - Partição corrigida do Underflow e Overflow na ciclonagem do 2 ° estágiode deslamagem |
| Tabela 3.18 - Balanço de massas na ciclonagem do 2º estágio de deslamagem |

| Tabela 3.19 - Distribuição granulométrica do produto que alimenta os ciclones nareciclonagem do 2º estágio49 |
|---|
| Tabela 3.20 - Descrição do fluxo que alimentará os ciclones para reciclonagem do 2ºestágio de deslamagem |
| Tabela 3.21 - Partição padrão e corrigida do Underflow para os ciclones na reciclonagemdo 2 º estágio de deslamagem50 |
| Tabela 3.22 - Partição corrigida do Underflow e Overflow na reciclonagem do 2 ° estágiode deslamagem50 |
| Tabela 3.23 - Balanço de massas dos ciclones na reciclonagem do 2º estágio de deslamagem 51 |
| Tabela 3.24 - Distribuição granulométrica do produto que alimenta o circuito deFlutuação grosseira53 |
| Tabela 3.25 - Características da alimenta no circuito de flutuação grosseira |
| Tabela 3.26 - Distribuição granulométrica do produto que alimenta o 3º estágio de deslamagem |
| Tabela 3.27 - Características do produto que alimenta o 3º estágio de deslamagem 54 |
| Tabela 3.28- Dimensões dos parâmetros geométricos para os ciclones na ciclonagem do3º estágio de deslamagem |
| Tabela 3.29 - Descrição do fluxo que alimentará os ciclones para ciclonagem do 3º estágiode deslamagem56 |
| Tabela 3.30 - Partição padrão e corrigida do Underflow na ciclonagem do 3 ° estágio dedeslamagem |
| Tabela 3.31 - Partição corrigida do Underflow e Overflow na ciclonagem do 3 ° estágiode deslamagem |
| Tabela 3.32 - Balanço de massas na ciclonagem do 3º estágio de deslamagem |
| Tabela 3.33 – Distribuição granulométrica do produto que alimentará os ciclones na reciclonagem do 3º estágio |
| Tabela 3.34 - Descrição do fluxo que alimentará os ciclones para reciclonagem do 2ºestágio de deslamagem |
| Tabela 3.35 - Partição padrão e corrigida do Underflow na reciclonagem do 3 ° estágio dedeslamagem60 |
| Tabela 3.36 - Partição corrigida do Underflow e Overflow para os ciclones nareciclonagem do 3 º estágio de deslamagem |
| Tabela 3.37 - Balanço de massas dos ciclones na reciclonagem do 3º estágio de deslamagem 62 |
| Tabela 3.38 - Distribuição granulométrica do produto que alimenta o circuito de flutuaçãode partículas finas63 |
| Tabela 3.39 - Descrição do fluxo para o circuito de flutuação de partículas finas 63 |
| Tabela 3.40 - Número total de ciclones no circuito de deslamagem geral 67 |
| Tabela 3.41 - Distribuição granulométrica do produto que é rejeitado no processo de deslamagem 68 |
| Tabela 3.42 - Descrição do fluxo que é rejeitado no processo de deslamagem |

Tabela 3.43 – Controle das partículas através do diâmetro de separação em cada estágio 69

Tabela 3.44 – Condições operatórias em cada estágio de deslamagem 69

NOMENCLATURA

| xi | Percentagem em peso do mineral | % |
|-----------------------|--|-------------------|
| ρ_s | Densidade do sólido | t/m³ |
| $ ho_p$ | Densidade da polpa | t/m³ |
| <i>C</i> 1 | Factor de correção da % de sólido em volume | |
| <i>C</i> 2 | Factor de correção para Pressão | |
| <i>C</i> 3 | Factor de correção para densidade do sólido | |
| Bypass | Bypass | % |
| d50 _{básico} | Diâmetro médio | μm |
| d50aprox | Diâmetro médio teórico | μm |
| m | Parâmetro para avaliação da eficiência do ciclone | |
| Y | Partição Padrão | % |
| Y _c | Partição corrigida | % |
| d50 _c | Diâmetro médio corrigido | μm |
| dc | Diâmetro do Ciclone | cm |
| di | Diâmetro da Alimentação | cm |
| do | Diâmetro do Vórtex | cm |
| du | Diâmetro do Ápex | cm |
| %sól.v | Percentagem de sólido em volume | % |
| d95 | Dimensão correspondendo 95% passante para o Overflow | μm |
| %sól | Percentagem de sólido em peso | % |
| Н | Altura do Vórtex-finder em relação ao topo do Ápex | cm |
| Р | Pressão | PSI |
| N _{ciclones} | Número de ciclones | |
| Ι | Imperfeição | |
| Q | Capacidade nominal do ciclone | m ³ /h |
| vaz.mas.sól | Vazão mássica do sólido | t/h |
| vaz. vol. sól | Vazão volumétrica do sólido | m ³ /h |
| vaz. mas. polpa. al | Vazão mássica da polpa na alimentação | t/h |
| vaz. vol. H20. al | Vazão volumétrica da água na alimentação) | m ³ /h |
| Vazão vol.A | Vazão volumétrica da polpa (alimentação do ciclone) | m ³ /h |
| vaz.mas.H20 | Vazão mássica de água | t/h |

1. Capítulo 1: Introdução

1.1 Generalidades

Nióbio, também conhecido como Colúmbio, é um elemento químico com o símbolo Nb e número atómico 41. O nióbio é um metal cinza claro, cristalino e de transição.

O Brasil é o principal produtor de Nióbio. O nióbio é usado principalmente em ligas, a maior parte em aço especial, como as usadas em gasodutos. Embora essas ligas contenham no máximo 0,1% de Nióbio, a pequena percentagem de nióbio aumenta a força do aço. A estabilidade da temperatura de superligas contendo nióbio é importante para o seu uso em motores a jacto e foguetões.

O nióbio é usado em vários materiais supercondutores. Estas ligas supercondutoras, também contendo titânio e estanho, são amplamente utilizadas nos ímãs supercondutores de *scanners* de ressonância magnética. Outras aplicações de nióbio incluem soldagem, indústrias nucleares, electrónica, óptica e jóias.

O depósito de Pirocloro de Araxá, Brasil, é amplamente reconhecido hoje como sendo o depósito mineral que representa mais de 70% da reserva extraível economicamente do mundo. É extraído pela CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração) desde o início dos anos 1960 e nas suas primeiras três décadas de exploração forneceu mais de 60% de Nióbio para o consumo mundial. O processamento de minério de Nióbio de Araxá envolve operação de redução e enriquecimento.

O minério é extraído de uma mina a céu aberto, os equipamentos usados são escavadoras pesadas, carregadoras frontais, correias transportadoras e caminhões basculantes. O mesmo minério é extraído em bancadas de 10 metros de altura. O teor de corte de mineração é mantido em cerca de 2 % Nb₂O₅. O minério e o estéril são friáveis, de fácil desmonte e a sua mineração dá lugar a uma alimentação de 3500 t/d de minério com um teor médio de 3% de Nb₂O₅. O tratamento do minério se processa com as seguintes fases: Britagem, Moagem (moinho de bolas), Separação magnética, Deslamagem e Flutuação.

O minério vindo da mina é quase completamente desagregado e decomposto, e não requer cominuição pesada. Depois de ser britado a -50 mm (2"), passado por uma peneira vibratória e seguidamente descarregado em uma correia transportadora, o minério é introduzido em um moinho de bolas.

Os cristais de pirocloro do minério Araxá são muito pequenos, raramente ultrapassando 1mm de tamanho. A separação considerada óptima é alcançada após moagem a 95% abaixo de 104 μ m (150 mesh).

A moagem é feita em circuito fechado directo com hidrociclones como unidade de controlo da redução.

O produto da moagem vai para o processo de deslamagem, com o objectivo de se eliminar a quantidade de lamas finas (menos de 5μ m) que poderiam causar um impacto negativo na concentração por flutuação.

O processo de flutuação ocorre em dois estágios, um composto por material grosseiro e o outro estágio por material fino.

1.2 Características Geológicas e Mineralógicas

O depósito Araxá faz parte de um importante distrito alcalino onde a presença de Carbonatites foi estabelecido em sete complexos. Esses complexos são conhecidos como: Tapira, Araxá. Salitre I, Salitre II, Serra Negra, Catalão I e Catalão II.

O complexo Araxá tem um formato aproximadamente circular com cerca de 4,5 km de diâmetro, é distinguido pela extensão única de sua mineralização de nióbio, com um conteúdo médio maior que 2,5% de Nb₂O₅.

O complexo carbonatítico é embasado em rochas quartzíticas com alguns xistos intercalados recobertos por uma unidade de xistos de biotite-moscovite e xistos de clorite-moscovite com alguns quartzitos intercalados. O nióbio ocorre no centro da chaminé e resultou da intensa meteorização e forte enriquecimento residual do carbonatito original.

| N . | Mineral | Peso (%) |
|------------|--------------------|-----------------|
| 1 | Bariopirocloro | 4,6 |
| 2 | Limonite, goethite | 37,0 |
| 3 | Barite | 24,0 |
| 4 | Magnetite | 16,0 |
| 5 | Gorceixite | 2,0 |
| 5 | Monazite | 2,0 |
| 6 | Ilmenite | 4,0 |
| 7 | Quartzo | 5,0 |
| 8 | Outros | 5,4 |
| | Total | 100 |

Tabela 1.1 - Composição mineralógica do minério de Araxá (Fonte: O. de Souza Paraiso,1993)

1.2.1 Densidade do sólido.

O cálculo da densidade do sólido ou densidade do minério foi feito com base na equação (1), para isso foram necessárias a massa em peso e a densidade relativa de cada mineral, indicados na Tabela 1.1.

A densidade do minério é calculada abaixo:

$$\begin{aligned} xi &= \% \ em \ peso \ do \ mineral \\ di &= densidade \ relativa \ do \ miral \\ \rho_s &= densidade \ do \ solido \end{aligned} \ \rho_s = \frac{100}{\Sigma \frac{xi}{di}} \eqno(1)$$

$$\rho_{s} = 3.9g/cm^{3}$$

1.2.2 Composição química

Compostos como óxido de nióbio, óxido de alumínio e tantos outros compostos químicos, representam os diferentes minerais que constituem o minério de nióbio de Araxá. A tabela 1.2 contém todos os compostos químicos e seus respetivos teores.

| | Compostos | Teor, % |
|----|---|---------|
| 1 | Nb ₂ O ₅ | 3,0 |
| 2 | Ta ₂ O ₅ , CaO, PbO, SnO ₂ | Traços |
| 3 | BaO | 17,73 |
| 4 | $(TR)_2O_5$ | 1,44 |
| 5 | ThO ₂ | 0,13 |
| 6 | MnO ₂ | 11,82 |
| 7 | TiO ₂ | 3,60 |
| 8 | Al ₂ O ₃ | 1,19 |
| 9 | P ₂ O ₅ | 3,32 |
| 10 | SiO ₂ | 2,38 |
| 11 | ZrO ₂ | 0,20 |
| 12 | SO ₃ | 8,82 |
| 13 | U ₃ O ₈ | 0,008 |
| 14 | P.F. | 6,02 |

Tabela 1.2 Composição química do minério de Araxá (Fonte: O. de Souza Paraiso,1993)

1.3 Localização geográfica

O depósito de nióbio é encontrado no complexo carbonatítico de Araxá, localizado a cerca de 6 km sul da cidade de Araxá no estado de Minas Gerais (Brasil). A Figura 1.1 Mostra o mapa do Brasil e da Localização de Araxá, a cerca de 400Km ao norte da cidade de São Paulo e aproximadamente 550Km a noroeste do Rio de Janeiro.



Figura 1.1 - Localização geográfica da mina de Araxá (Fonte: Souza Paraiso,1993)

1.4 Problema

Influência das variáveis operacionais e geométricas no processo de ciclonagem visando a remoção de partículas com dimensão abaixo de 5µm.

1.5 Fundamento do problema

O minério de Nióbio de Araxá é de origem secundária, resultante de fenómenos de meteorização à superfície terrestre, sendo por isso não consolidado, isto é, friável. Os principais minerais identificados foram minerais de Nióbio, de Ferro, Bário e de Feldspato.

A natureza laterítica do minério implica a existência de uma grande quantidade de finos menores que 5µm, que se somam aos finos produzidos na moagem, podendo inibir o processo de Flutuação. Devido a estes factores é de extrema importância um circuito de deslamagem acurado para a preparação da alimentação à concentração por flutuação.

1.6 Hipóteses

Selecionar o modelo de estimação para o processo de ciclonagem onde as variáveis operacionais e geométricas sejam facilmente manipuladas e controladas a fim de se concretizar os objectivos preestabelecidos para o presente trabalho.

O método de Plitt foi o método selecionado por envolver de forma simples os valores das principais variáveis geométricas e operacionais e permitir a alteração destes mesmos valores, modificando deste modo o desempenho da ciclonagem.

1.7 Objectivos da pesquisa

Objecto:

Fluxograma do circuito geral de deslamagem do minério de Nióbio de Araxá. **Objectivo geral**

Este trabalho tem como objectivo o estudo da influência das variáveis operacionais e geométricas no circuito de ciclonagem para a deslamagem da alimentação ao processo de concentração por flutuação.

Objectivos Específicos

- 1. Determinação das melhores condições operacionais que conduzem a malha de moagem de cada estágio.
- 2. Determinar o número de ciclones necessários e dimensionar os ciclones.
- 3. Determinar as características da alimentação à flutuação
- 4. Prever as perdas de mineral útil durante a deslamagem.

METODOLOGIA

Buscando apresentar um cenário autêntico para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas pesquisas bibliográficas diversas referente ao tema. As mesmas bibliografias em formas de dissertações, artigos, monografias, teses, livros, tendo como objectivo gerar um conteúdo que permita dar respostas aos objectivos estabelecidos. Com base nestes mesmos artigos foi possível elaborar uma solução para o problema, aplicando o modelo de Plitt.

A aplicação do modelo de Plitt tornou possível determinar os resultados apresentados ao longo do trabalho. Apesar de sua aplicação ser bastante importante para se alcançar os objetivos, o mesmo modelo permitiu acrescentar maior carácter científico para o presente trabalho.

2. Capítulo 2: Revisão da Literatura

2.1 Introdução

Este capítulo aborda a literatura ligada aos circuitos de classificação usados na indústria mineira, a definição geral de processos de classificação em circuitos de moagem e deslamagem, estudo com foco nos hidrociclones, na eficiência da classificação, no modelo matemático de Plitt usados para simular o desempenho dos hidrociclones, analisando como estes podem ser usados para identificar o design chave e as variáveis operacionais e, finalmente, nas diferentes configurações dos circuitos adoptados na classificação em instalações de processamento mineral.

2.2 Processo de classificação em circuitos de cominuição

Classificação no processamento mineral, conforme definido por Drzymala (2007), é um processo de separação de grãos minerais em dois ou mais produtos, compostos por partículas de tamanhos distintos e através da acção de um meio fluido em movimento.

Este processo de separação pode ser feito a seco ou húmido. A classificação a seco geralmente utiliza o ar como um meio fluido, e a água é usada na classificação a húmido. Na maioria dos circuitos de moagem, é aplicado o processo de classificação húmida. De acordo com Wills e Napier-Munn (2006), a classificação húmida é aplicada a partículas consideradas muito finas (abaixo de 200µm). Como tal, já que este estudo se concentra em Classificação de lamas finas, a revisão da literatura se concentrará na classificação húmida.

O processo de classificação é essencial no fechamento de circuitos de moagem, pois regula a dimensão das partículas do minério, com o objectivo de constituir um produto que atenda ao tamanho desejado para os subsequentes processos a jusante, (Napier-Munn, 2005). Existem diferentes tipos de classificadores húmidos usados para realizar a função da classificação.

Esses classificadores podem ser categorizados em três grupos, a saber:

- Classificadores centrífugos, usam a força centrífuga para efectuar a separação e abrange uma faixa de tamanho típico de cerca de 2μm -100μm (Metso, 2015).
- Classificadores mecânicos, usam um padrão geométrico para efectuar a separação e podem separar partículas de 300mm até aproximadamente 40μm (Wills & Napier-Munn, 2006).
- Classificadores gravitacionais, que utilizam a força da gravidade para efectuar a separação e cobrem uma faixa de tamanho de partícula de cerca de 100µm - 1000µm (Metso, 2015).

Os classificadores centrífugos e os classificadores mecânicos ganharam uso generalizado em circuitos de moagem para diferentes tipos de minérios. Um exemplo típico de um classificador centrífugo é o hidrociclone (Metso, 2015).

O hidrociclone foi usado neste estudo e, portanto, a revisão da literatura está focada nesta unidade. As secções subsequentes deste capítulo discutem principalmente o processo de classificação e a descrição da unidade de hidrociclones; A indicadores de eficiência de classificação; modelos matemáticos comuns, destacando variáveis operacionais que influenciam a eficiência da classificação.

2.3 Hidrociclone - Unidade e descrição do processo

Comumente referido como ciclone, o hidrociclone é uma unidade de classificação que usa força centrífuga para acelerar a taxa de fixação de partículas (Bradley, 1965). Trata-se de um equipamento versátil, de capacidade elevada e sem partes móveis. É de realçar que o simples processo de classificação feito por ciclone é também conhecido por ciclonagem e o meio fluido é a água.

Os hidrociclones são alimentados com polpa de minério, resultando como produtos o *Underflow* e o *Overflow*. Nenhum hidrociclone opera perfeitamente e não divide um universo de partículas em duas fracções de tamanhos particulares e bem definidos, ou seja, algumas partículas de granulometria superior à malha especificada vão para o Overflow, assim como partículas finas são incorporadas ao *Underflow*.

Basicamente um hidrociclone consiste de uma parte cilíndrica seguida de uma parte cónica que possui, em seu vértice, uma abertura, denominada *Apex*, pela qual descarrega o *Underflow*. A alimentação é introduzida tangencialmente à seção cilíndrica, em que há um tubo coaxial denominado *Vortex finder*, pelo qual é descarregado o *Overflow* (Carrisso, 2004).



Figura 2.1 - Representação geométrica de um Hidrociclone (Fonte: Correa, 2010)

2.3.1 Caracterização geométrica

Aqui serão definidos apenas os parâmetros considerados importantes na operação de hidrociclones: Diâmetro do hidrociclone, Diâmetro e comprimento do *Vortex finder*, área do injector (*Inlet*), Diâmetro do *Apex*, comprimento da parte cilíndrica e ângulo de cone (Mular, 2003).

Diâmetro do hidrociclone - Este parâmetro exerce maior influência no diâmetro de corte da classificação. É o diâmetro da seção cilíndrica e determina a capacidade do equipamento.

A classificação em granulometrias finas requer a utilização de hidrociclones com pequenos diâmetros. Quanto maior o diâmetro do hidrociclone, maior será o corte granulométrico da classificação, porque esses equipamentos proporcionam menor aceleração às partículas, isto é, a aceleração das partículas é inversamente proporcional ao diâmetro do hidrociclone.

Área do injector (AI) - Determina a velocidade de entrada e, consequentemente, a velocidade tangencial, que também varia com o raio da seção cilíndrica. Portanto, tornase indispensável a realização de ensaios em unidade piloto para optimização deste parâmetro.

Comprimento da seção cilíndrica e ângulo de cone - São os parâmetros que afectam o tempo de residência da polpa no hidrociclone. Para um hidrociclone com secção cilíndrica de diâmetro fixo, a diminuição do ângulo da secção cónica aumenta o comprimento da secção cilíndrica, induzindo um aumento do tempo de residência. Nesse caso, a classificação também será mais fina.

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

- 1. Eficiência da classificação e capacidade do hidrociclone;
- 2. Pressão, cujo valor pode reduzir ou aumentar.

Para um mesmo hidrociclone, acréscimos no diâmetro do *Vortex finder* provocam também acréscimos no diâmetro de corte de classificação e na percentagem de sólidos no *Overflow*.

A altura do *Vortex finder* deve ser suficiente para que a sua base seja horizontalmente posicionada abaixo do injector. Desse modo, evita-se curto-circuito de partículas, isto é, passagem directa das partículas ao *Overflow*, sem sofrerem classificação.

Diâmetro do Apex – É aconselhável que o Apex, ponto de maior desgaste do equipamento, possua um diâmetro menor que um quarto do diâmetro do *Vortex finder*.

O aumento do diâmetro do *Apex* diminui o diâmetro de classificação. A relação inversa é mais limitada, pois as partículas maiores só podem ser descarregadas pelo *Apex*.

Se o diâmetro do *Apex* for muito pequeno, deverá ocorrer um acúmulo de material grosso no cone, aguardando a sua descarga. Consequentemente, partículas que já foram rejeitadas pelo *Vortex finder* podem retornar e serão descarregadas, o que aumentará o diâmetro da classificação granulométrica.

2.3.2 Princípio de funcionamento de um hidrociclone

Durante a operação, a polpa da alimentação é introduzida no corpo cilíndrico tangencialmente, sob pressão através da entrada de alimentação. Conforme a alimentação entra, uma rotação dentro do ciclone começa (Figura 2.2), causando forças centrífugas para acelerar o movimento das partículas para a parede do ciclone.

A energia potencial armazenada na polpa, em razão do bombeamento é transformada em energia cinética, e devido à geometria do hidrociclone, esta produz um movimento rotacional na polpa. As partículas de diâmetros maiores tendem a ocupar as regiões mais periféricas do cilindro e, consequêntemente, do cone. As partículas de diâmetros menores são deslocadas para a região central do hidrociclone, logo em seguida as mesmas partículas finas abandonam o ciclone através do vórtice secundário.

Desta forma, a região próxima à parede do hidrociclone é ocupada, preferencialmente, por polpa com predominância de partículas grossas e a região central, por polpa com predominância de partículas finas (Kelly, 1982).

Na região central do hidrociclone, na qual ocorre a mudança da secção cilíndrica para a cónica, o sentido do escoamento é invertido. Nessa secção cónica ocorre o estrangulamento no *Apex* do cone, fazendo com que a maior parte do fluxo, com menor quantidade de partículas, seja descarregado no orifício oposto, o *Vortex finder*, de diâmetro relativamente maior que o do *Apex*.

Isto possibilita a classificação, pois a polpa da região central, descarregada pelo *Overflow*, contém uma população relativamente maior de partículas finas comparada àquela descarregada pelo *Underflow*. A Figura 2.2 ilustra com detalhes a distribuição dos diferentes fluxos no interior do hidrociclone.



Figura 2.2 - Representação geral do funcionamento de um Hidrociclone (Fonte: Wikipédia)

2.3.3 Influência das variáveis operacionais na classificação por hidrociclones

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

- 1. Percentagem de sólidos na alimentação.
- 2. Distribuição granulométrica do minério.
- 3. Pressão na alimentação.

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

O controlo da percentagem de sólidos é feito pelo operador, primeiro, medindo o valor dessa variável com auxílio de uma balança Marcy, ou com procedimentos operacionais para medidas mais confiáveis.

Distribuição granulométrica da alimentação - Esta variável determina a relação entre as fracções retida e passante na malha de classificação, ou seja, os sólidos residuais no *Overflow*, que influenciarão no diâmetro de classificação. Quanto maior for a quantidade de lamas na alimentação, mais viscosa será a polpa e, consequentemente, maior será o diâmetro de classificação.

Pressão da alimentação - Reservam-se cuidados especiais com o aumento da pressão na alimentação do hidrociclone, por várias razões. Na prática, aumenta-se a pressão quando a velocidade de rotação (rpm) da bomba é baixa.

O aumento da pressão provoca um acréscimo na capacidade (kg/h) do hidrociclone, que implicará no aumento da velocidade tangencial e, por consequência, estende o mesmo efeito à velocidade angular. O resultado é um campo centrífugo com maior intensidade. Portanto, prover maior valor à pressão de alimentação significa oferecer maior probabilidade de decantação centrífuga às partículas menores, diminuindo o diâmetro de corte.

2.3.4 Aplicação dos Hidrociclones

Hidrociclones, são amplamente aplicados em operações de moagem de circuito fechado e processos de deslamagem, como classificadores para a remoção de partículas finas que se encontram no circuito. Tarr Jr.1985 listou as principais aplicações para os hidrociclones, dentre as quais, são citadas:

1. Espessamento - Elimina a maior parte da água de uma polpa;

- 2. **Deslamagem** Elimina as partículas mais finas (lamas) no circuito. Isto é normalmente necessário para os processos de separação magnética a húmido, filtração, flutuação, etc.
- 3. **Classificação** Frequentemente utilizado no fechamento de circuito de moagem onde o *Underflow* do hidrociclone retorna ao moinho.
- 4. **Classificação seletiva** Por meio de uma configuração de hidrociclones em série, é possível obter-se um conjunto de produtos com granulometria definida.
- 5. **Pré-concentração** Utilizando hidrociclones de fundo chato, pode-se realizar concentração por gravidade onde os minerais mais densos são descartados pelo *Underflow*.

Os hidrociclones podem ser instalados em suportes simples, como unidades únicas ou clusters (configuração de várias unidades de ciclones). Considerando que, nos casos em que a eficiência da classificação precisa ser melhorada os ciclones são conectados em série para reclassificar o *Underflow* ou ambos os fluxos (Kelsall, 1974). Na figura 2.3 é representado a configuração dos ciclones que realizam a deslamagem do minério de Araxá.



FIGURE 8. ARAXÁ NIOBIUM MINE: RADIAL MANIFOLD SYSTEM.

Figura 2.3 - Bateria de ciclones para deslamagem do minério da mina de Araxá (Fonte: CBMM)

2.3.5 Vantagens e desvantagens dos hidrociclones

A aplicação de hidrociclones oferece várias vantagens, tais como: capacidade de lidar com alta capacidade em relação ao tamanho unitário, elevada disponibilidade (pois há sempre unidade de stand-by devido ao baixo preço e pequeno espaço ocupado), controle operacional relativamente simples, baixo capital e custos operacionais em comparação com outros classificadores no mercado, como peneiras de alta frequência e classificadores espirais, devido à energia consumida pela bomba. (Mainza, 2006).

Por outro lado, apresentam algumas desvantagens consideráveis, tais como: Não apresentam efeito regulador para minimizar oscilações operacionais de curto período na alimentação devido ao seu pequeno volume.

O controlo da não-passagem de grossos ao *Overflow* pode ser pior do que no caso de classificadores mecânicos, no caso de haver variações nas condições de alimentação, porque pode ocorrer sobrecarga do *Apex* e serem rejeitadas partículas grossas para o *Overflow*.

Dependendo do tipo de minério, o custo de manutenção pode ser relativamente elevado, especialmente o da manutenção da bomba da alimentação. Se o minério for abrasivo, o custo de manutenção das bombas e dos hidrociclones poderá ser relativamente elevado.

2.3.6 Parâmetros para avaliação da eficiência

2.3.6.1 Curvas de eficiência

Trump (1937) primeiro desenvolveu um método gráfico para avaliar e comparar o desempenho de um classificador, referido como curva de Trump ou curva de eficiência. A curva de eficiência refere a porção em peso de cada fracção de tamanho do sólido na Alimentação que reporta ao produto grosseiro ou ao produto fino.

Está facção de tamanho do sólido é colocado no eixo das abcissas, portanto pode haver duas curvas e qualquer uma das duas curvas pode ser usada, porque uma curva é o inverso da outra (Napier-Munn, 2005).

Grande parte da literatura utiliza a curva para o produto grosseiro e, portanto, foi adoptado neste trabalho. Está curva é obtida relacionando a percentagem de partículas que reportam para um ou outro produto é colocada nas ordenadas contra a média geométrica da classe de tamanhos de partículas reportadas num ou noutro produto, para produzir a curva de eficiência não corrigida ou padrão como mostrado no exemplo da Figura 2.4. Geralmente, a curva real não passa pela origem, mas aproxima-se de algum valor constante chamado bypass (Maiza, 2006).

Bypass é definido como um valor assumido, resultante da eliminação de partículas finas que não respondem a forças de classificação e seguem o fluxo de água da alimentação para o produto grosseiro (Kelsall, 1953).

E necessário eliminar essas partículas finas que constituem o bypass e, feita esta eliminação, obtém-se a curva de partição corrigida. Pela figura 2.4 nota-se que a curva corrigida é a que melhor se aproxima de uma classificação perfeita (curva ideal).

Barrios (2006) e Barkhuysen (2009) relataram que os ciclones normalmente operam com eficiências de separação no intervalo de 45% a 65%. E em moagem de circuito fechado a eficiência raramente ultrapassa 60%.

A figura 2.4 representa o formato geral de como as curvas de eficiência se apresentam.



Figura 2.4 – Curvas de eficiência Corrigida e Padrão adaptadas de (Wills & Napier munn, 2006)

2.3.6.2 Relação entre o Ápex e Vortex

Por ter efeitos significativos no desempenho dos ciclones a relação entre o diâmetro do *Apex* e do *Vortex* (du/do), é geralmente considerada como um dos parâmetros para se avaliar a eficiência da classificação.

A relação entre o *Apex* e o *Vórtex* também tem uma influência sobre a natureza da descarga de *Underflow* (Wills & Napier-Munn, 2006). O padrão de descarga do fluxo de *Underflow* fornece informações sobre a estabilidade da operação do ciclone. A tabela 2.1 representa os tipos de descarga tendo em conta a relação entre *Apex* e *Votex*.

Tabela 2.1 - Influência da relação entre o ápex e o *Vortex* no tipo de descarga (Fonte: A. Gupta and D.S. Yan, 2006)

| Relação entre o Ápex e o Vórtex (du/do) | Tipo de descarga (Underflow) |
|---|------------------------------|
| Menor 0,45 | Descarga em Cordão |
| 0,45 - 0,56 | Descarga em Cone |
| Maior 0,56 | Descarga em Spray |

Descarga em cordão: O diâmetro do ápex é insuficiente. Com isso, partículas grossas dirigem-se para o *Overflow*. Pode ser usado intencionalmente quando se deseja adensar e não classificar;

Descarga em cone: Operação normal. É desejável operar nestas condições para obter a maior percentagem de sólidos possíveis bem como minimizar o *Bypass* de partículas finas (Gupta & Yan, 2006).

Descarga em *Spray* (**pulverizador**): Ocorre quando o diâmetro do ápex é maior que o recomendável, as partículas finas dirigem-se para o *Underflow*.



Figura 2.5 - Classificação dos diferentes tipos de fluxo no *Underflow* de um hidrociclone (Fonte: Correa, 2010)

2.4 Dimensionamento de hidrociclones

O dimensionamento de hidroclones é feito através dos modelos empíricos e matemáticos (analíticos).

Os modelos empíricos são usados por fabricantes de hidrociclones para determinar as dimensões dos mesmos, recebendo o modelo o nome de seu fabricante, como é o caso do modelo de Arterburn. Em função do que se pretende como resultado da classificação é possível determinar com este modelo as dimensões dos hidrociclones. os modelos matemáticos possuem as mesmas características, mas o que os diferencia dos modelos empíricos é o facto de os mesmo serem mais conclusivos, pois permitem uma descrição detalhada dos produtos da classificação em termos de granulometria. Os modelos matemáticos existentes são (Plitt, Lynch e Rao ou Yoshioka e Hotta). Para ser implementado um dos modelos matemáticos existentes é necessário conhecer previamente o diâmetro da secção transversal do hidrociclone.

Para o presente trabalho foi considerado um hidrociclone da família Arterburn, cujo dimensionamento é realizado tendo como base de cálculo o modo padrão deste tipo de hidrociclone. Inicialmente é realizado o cálculo da estimativa do D50 (aprox), com o objectivo de obter o produto especificado. Para realizar esta estimativa é necessário recorrer à Tabela 2.2.

| Granulometria requerida (% de passados na malha de referência) | Factor de multiplicação |
|--|-------------------------|
| 98,8 | 0,54 |
| 95 | 0,73 |
| 90 | 0,91 |
| 80 | 1,25 |
| 70 | 1,67 |
| 60 | 2,08 |
| 50 | 2,78 |

Tabela 2.2 - Relação do D50 (aprox) com a granulometria desejada (Fonte: José L. Bernaldo ,1987) Para efectuar o cálculo, deve ser seleccionada a granulometria requerida obtendo o factor de multiplicação correspondente. Esse factor de multiplicação é então multiplicado pela granulometria de referência, obtendo assim uma estimativa do valor do D50 (aprox).

De seguida, é necessário calcular os factores de correcção para, posteriormente, ser possível calcular uma estimativa do valor D50 (básico). Os factores de correcção são utlizados para aproximar o ciclone padrão a um ciclone ajustado às necessidades requeridas.

Os factores servem para corrigir a percentagem de sólidos em volume (C1), factor de correcção de pressão (C2) e factor de correcção da densidade do sólido (C3). Para o cálculo do factor C1 recorre-se à equação (2).

C1 – Factor de correção da % de sólido em volume

$$C1 = \left[\frac{53}{53 - \% s \acute{o} l. \nu}\right]^{1,43}$$
(2)

%sól.v – Percentagem de sólidos em volume

O segundo factor de correcção (C2), consiste em corrigir a queda de pressão, para isso é utilizada a equação (3).

C2 – Factor de correção para Pressão

$$C2 = 3,27 * P^{-0,28}$$
 (3)
 $P - Pressão (Kpa)$

O segundo factor de correcção (C3), consiste no factor de correcção para a densidade, calculado pela equação (4).

$$C3 = \left(\frac{1,65}{\rho s - 1}\right)^{0,5}$$
(4)

 $\rho s - Densidade do sólido$

Depois de realizado o cálculo dos factores de correcção, procede-se ao cálculo do diâmetro do ciclone. Para isso é necessário o cálculo do D50 (básico), através da equação (5).

$$d50_{b\acute{a}sico} = \frac{d50aprox}{C1 * C2 * C3}$$
(5)

C1, C2 e C3 – Factores de correcção

De seguida, através da figura 2.6 obtém-se o diâmetro do ciclone (dc) que satisfaça o D50 (básico) calculado com a equação (5).



Figura 2.6 - Diâmetro do ciclone para ciclones padrões (Fonte: José L. Bernaldo, 1987)

Com o objectivo de calcular o número de ciclones necessários, recorre-se ao valor de (dc) e à pressão de trabalho do ciclone (P). Com estes dados, obtém-se com a figura 2.7 ou 2.8 a capacidade unitária do hidroclone (Q).



Figura 2.7 - Faixa da capacidade para hidrociclone padrão - 1(Fonte: José L. Bernaldo, 1987)



Figura 2.8 - Faixa da capacidade para hidrociclone padrão - 2 (Fonte: José L. Bernaldo, 1987)

2.5 Circuitos de Ciclonagem

A escolha das configurações de circuito de ciclonagem adoptadas na prática varia dependendo dos requisitos no processo de concentração. A configuração de circuito mais comum é o circuito de estágio único, onde os ciclones são normalmente conectados em paralelo.

Os ciclones geralmente são organizados em paralelo para aumentar a tonelagem de material a ser processada e, em série, para melhor controlo de tamanho (Wills & Napier Munn, 2006).

Vários estudos realizados no passado demonstraram que o desempenho da classificação pode ser melhorado empregando ciclonagem de múltiplos estágios. Kelsall (1974) estava entre os primeiros pesquisadores a estudar o efeito de usar ciclonagem de múltiplos-estágios no desempenho de classificação.

Nesses estudos, modelos matemáticos e outros testes feitos em escala laboratorial foram realizados para avaliar o desempenho da classificação. Os resultados dos testes laboratoriais mostraram que a inclinação da curva de partição em circuito de múltiplosestágios era mais íngreme do que a do circuito de um único ciclone como ilustrado na Figura 2.9. As figuras 2.9 e 2.10 resultam dos experimentos realizados por Kelsall em escala laboratorial para avaliar as curvas reduzidas e o circuito com diferentes configurações, respectivamente.



Figura 2.9 - Curvas reduzidas da eficiência para as configurações de múltiplos ciclones e para configurações de ciclone único (Fonte: Kelsall, 1974)

Os pesquisadores observaram que o uso de apenas um ciclone em muitos casos limitava o desempenho de todo o processo de classificação e para resolver o problema usaram uma configuração de ciclones com múltiplos estágios.

O ciclone usado no primeiro estágio poderia até limitar o desempenho, mas quando o material fosse para o estágio seguinte os resultados melhorariam. A figura 2.10 representa a configuração de dois estágios.



Figura 2.10 - Configurações de circuito de ciclonagem múltiplo estágio (Fonte: Lynch,1977).

A configuração do circuito em estudo é a reclassificação do *Underflow* primário no ciclone secundário (Figura 2-10) com o objectivo de reduzir o bypass. A mesma configuração também fornece uma separação mais nítida, redução do consumo de energia por unidade de tonelada, maior capacidade de circuito (Heiskanen, 1993).

Outros autores também declararam o efeito da configuração para ciclone de três estágios usando simulações (Boaten e Luttrell, 2007) e mostraram que a classificação mais nítida pode ser alcançada muito mais neste tipo de circuito do que na configuração de ciclone de dois estágios.

2.6 Modelos matemáticos para avaliação da eficiência de Hidrociclones

Modelos matemáticos de hidrociciclones têm sido amplamente utilizados há quase meio século na previsão dos resultados de classificação.

Durante os anos sessenta iniciou-se a aplicação de modelos matemáticos para as operações de tratamento de minérios. As operações de classificação receberam, desde o início, atenção especial porque a previsão das distribuições dos tamanhos é uma ferramenta de extrema utilidade para o controle dos processos.

Vários modelos matemáticos foram propostos, tais como: Modelo de Yoshioka e Hotta, Modelo Lynch e Rao, Modelo de Plitt. (Arthur Pinto Chaves e Colaboradores, 2002)

Todos esses modelos matemáticos resumem-se em equações que visam modelar a curva de partição.

Os modelos matemáticos têm dois parâmetros que regulam o processo de classificação. O primeiro é o diâmetro médio de separação, representado por d50 e o segundo é a eficiência de separação. Adiante foi realizada uma descrição acerca do modelo de Plitt por ser o método aplicado neste trabalho.

2.6.1 Modelo de Plitt

Plitt para estabelecer seu modelo fez diversos experimentos com hidrociclones de diâmetros diferentes. Alterando as variáveis geométricas e operacionais como a distribuição granulométrica da alimentação bem como a sua pressão.

O modelo de Plitt é hoje bastante usado para propor e optimizar circuitos de classificação por ser um modelo que garante um bom desempenho dos hidrociclones e não necessita de dados experimentais reais disponíveis. O modelo se propõe a fornecer dados que posteriormente são experimentados na prática para avaliação final.

O modelo não precisa dos dados das características reais dos produtos do *Overflow* e *Underflow*, está particularidade do modelo serviu como um dos critérios de selecção para este trabalho. O modelo necessita apenas das características da alimentação para fornecer os produtos da classificação mediante estimações que ocorrem através da alteração das variáveis geométrica e operacionais. As premissas básicas para se aplicar este modelo obedecem a dois critérios:

1º Critério: Descrição completa do fluxo de alimentação.

- Distribuição granulométrica da alimentação.
- Vazões mássicas de sólido e de polpa.
- Vazões volumétricas dos sólidos.
- Vazão de água.
- Percentagem de sólidos em massa e em volume.
- Densidade dos sólidos e da polpa.

2º Critério: Dimensões do ciclone.

- Diâmetro do ciclone
- Comprimento do *Vortex finder*.

1. Curva de partição padrão

No modelo de Plitt a avaliação da eficiência de separação dos hidrociclones é também utiliza a curva de partição. Esta curva é determinada pelos fluxos do *Underflow* e do *Overflow*, que são influenciados pelos seguintes factores:

- Características do fluxo da alimentação.
- Dimensões do ciclone.
- Condições de operação.
- Características do mineral.

A partição é definida por uma função de Rosin-Rammler.

$$\mathbf{Y} = \left[(\mathbf{Bypass}) + (\mathbf{1} - \mathbf{Bypass}) * \left(\mathbf{1} - \exp\left(-\mathbf{0}, \mathbf{693} * \left(\frac{di}{d50_{básico}}\right)^m\right) \right) \right] * \mathbf{100\%}$$
(6)

2. Cálculo do diâmetro mediano corrigido

O diâmetro mediano corrigido é o diâmetro de classificação final, representa um valor na curva de partição corrigida em que partículas com uma determinada dimensão têm igual probabilidade de reportar para o *Underflow* ou *Overflow*.

$$d50_{c} = \frac{39,7*dc^{0,46}*di^{0,6}*do^{1,21}*\exp(0,063*\%s\delta l.\nu)}{du^{0,71}*H^{0,38}*(vaz.vol.p.al)^{0,45}*(\frac{\rho_{s}-1}{1.6})^{0.5}}$$
(7)

3. Partição Corrigida

Visando avaliar a eficiência do processo de classificação calcula-se a curva de partição corrigida através da curva padrão, removendo a porção que representa o bypass.

$$\mathbf{Y}_{c} = \left(\mathbf{1} - \exp\left(-\mathbf{0}, \mathbf{693} * \left(\frac{di}{d50_{c}}\right)^{m}\right)\right) * \mathbf{100\%}$$
(8)

4. Vazão volumétrica da polpa

Esta variável representa a capacidade do ciclone, a mesma é influenciada por alguns factores tais como, pressão, os diâmetros do ciclone, altura do vórtice, bem como percentagem de sólidos em volume.

vaz. vol. p. al = 0, 7 *
$$dc^{0,21}$$
 * $di^{0,53}$ * $(do^2 + du^2)^{0,49}$ * $H^{0,16}$ * $exp(-0,0055 *$ %sól. v) * $P^{0,56}$ (9)

5. Bypass

O *Bypass* é um valor que representa a quantidade de partículas finas que por seguirem apenas o fluxo da água não sofrem classificação e reportam para o *Underflow*.

$$ByPass = \frac{3,29*\rho_p^{0,24}*\left(\frac{du}{do}\right)^{3,31}*H^{0,54}*(do^2+du^2)^{0,36}*\exp\left(0,0054*\%s\delta l.\nu\right)}{dc^{1,11*P^{0,24}}}$$
(10)

6. Indicador da eficiência da classificação

O parâmetro **m** fornece uma indicação da eficiência de separação. Para m > 3 a eficiência é alta. Separação de baixa eficiência têm m < 2.

$$m = 1,94 * \left(\frac{H * dc^2}{\text{vaz.vol.p.al}}\right)^{0,15} * \exp\left(\frac{-1,58 * Bypass}{1 + Bypass}\right)$$
(11)

7. Imperfeição

Analisando a curva de partição, podemos determinar o ponto d50, da mesma forma podemos achar os pontos d75 e d25 pontos onde as partículas desses tamanhos têm probabilidade de 75% e 25% de reportarem ao *Underflow* respectivamente. Desta forma podemos achar o fator de eficiência conhecido como imperfeição.

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \cdot d_{50}} \tag{12}$$

Pode-se verificar que o fator de eficiência (I) representa o coeficiente angular médio da curva entre os limites de 25% a 75%. Quanto maior esse coeficiente, evidentemente menos eficiente será a classificação, por outras palavras, quanto mais próximo de zero for valor de I, melhor a eficiência do processo (TERRA, 1983).

3. Capítulo três: Circuito de deslamagem da lavaria de araxá

3.1 Introdução

O circuito de deslamagem em estudo cuja configuração se apresenta no Fluxograma (Diagrama de Blocos) representado na Figura 3.1 constituiu o objecto de estudo da influência das variáveis operacionais e geométricas num processo de ciclonagem visando a remoção de partículas com dimensão abaixo de 5 µm.



Figura 3.1 – Fluxograma do circuito de deslamagem composto por 3 estágios estágio (Fonte: Dados da pesquisa).

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo da realização da pesquisa feita para este estudo. Estes resultados foram obtidos com ajuda do software Excel que permitiu:

- ✓ Fazer o dimensionamento dos ciclones
- ✓ Modelar a curva de partição
- ✓ Fazer o balanço de massas nos diferentes estágios de classificação
- ✓ Justificar a escolha da configuração do circuito de deslamagem.

3.2 Análise geral do processo de ciclonagem

A Flutuação do mineral pirocloro em Araxá é altamente sensível à presença de finos que, em certas quantidades, pode inibir o processo de flutuação. A própria natureza do minério laterítico implica a existência de quantidades consideráveis de lamas finas primárias menores que 5µm, para além de lamas secundárias que são formadas no circuito de moagem.
Após a moagem, devido à redução granulométrica do material, ocorre uma grande geração de finos. Estes finos, por recobrirem as superfícies das partículas minerais, impedem os reagentes de exercerem suas funções de maneira eficiente e prejudicam a etapa de flutuação. Então, é necessária a realização da deslamagem.

Embora a Tabela 3.1 mostre uma concentração elevada de Nb₂O₅ na faixa acima de $37\mu m$, a mesma tabela mostra valores elevados na faixa abaixo de $37\mu m$ e acima de $5\mu m$; então deslamar ou remover o material abaixo de $5\mu m$ é um passo importante antes da flutuação, pois elimina cerca de 12% em peso do material considerado fino, com apenas 5 a 7 por cento do conteúdo de Nb₂O₅ da alimentação.

Tabela 3.1 - Características granulométrico-químicas do minério de araxá

| Intervalo granulométrico | Peso, % | Nb2O5, % |
|--------------------------|---------|----------|
| $+37 \mu m$ | - | Evado |
| $-37 + 5 \mu m$ | - | Elevado |
| - 5 µm | 12,0 | 5,0-7,0 |

Fonte: Dados da pesquisa

Portanto, uma vez que as fracções entre 37 e 5 μ m são muito ricas em nióbio e o material menor que 5 μ m perturba seriamente a flutuação, é fundamental para o processo que as etapas de deslamagem sejam eficientes. Por esta razão a deslamagem é feita em três estágios, com cada estágio seguido por uma etapa de reciclonagem do *Underflow*.

3.2.1 Circuito fechado directo de Moagem

A moagem é o último estágio no processo de cominuição, onde através de combinação entre impacto e abrasão, as partículas têm a sua granulometria reduzida.

O moinho é um cilindro de aço rotativo, com corpos moedores soltos, que são movidos no sentido de rotação do moinho e que, ao interagirem com as partículas de minério, provocam a redução de granulometria.

A moagem ocorre pelo contacto das bolas e das partículas de minério de forma aleatória, sendo que a probabilidade de quebra é maior para partículas grandes e diminui para partículas menores.

O produto de uma moagem em circuito aberto apresenta uma vasta gama de tamanho de partículas e a sobre moagem ocorre com mais frequência. Os circuitos fechados possuem menor tempo de residência, razão pela qual na maioria das vezes são utilizados para evitar a sobre moagem (Wills, 2007).

O produto do moinho que alimenta os ciclones e constitui a base de todo o cálculo feito neste trabalho é de 874,8 t/h de minério com um teor médio de 3% de Nb2O5 e densidade $3,9t/m^3$.

Nesta secção é feita a estimação da distribuição granulométrica do *Overflow* nos ciclones que fazem o fecho do circuito de moagem.

Para a estimação dessa distribuição granulométrica usou-se a distribuição empírica de **Rosin–Rammler** e adaptada por Plitt após fazer diversos experimentos em diferentes minérios.

3.2.1.1 Distribuição granulométrica do Overflow no circuito fechado de moagem

Sabendo que 95% do *Overflow* é composto por partículas inferiores a 104 µm, adicionando a esta informação o parâmetro usado para estimação que deve ser superior a 3 para se considerar uma classificação eficiente.

Para se reconstruir a distribuição granulométrica do produto do *Overflow* foi necessário adoptar um valor aleatório e superior a 3 para o parâmetro m com o objectivo de calcular o diâmetro médio usando a equação (7).

Como resultado do conjunto de iterações feitas fixou-se como parâmetro ideal m=3,842. Com este valor fixado para o parâmetro m foi então possível determinar o diâmetro mediano que corresponde o critério previamente estabelecido que é um *Overflow* com 95% composto de partículas inferiores 104μ m.

$$Y_c = \left(1 - \exp\left(-0.693 * \frac{di}{d50_c}^m\right)\right) * 100\%$$

 $d50_c = 204,0\mu m$

| Dim (µm) | Yc (%) | Massa do Overflow (t/h) |
|-------------|--------|-------------------------|
| + 230 - 190 | 39,53 | 0 |
| -190 + 179 | 65,58 | 0 |
| - 179 + 104 | 66,17 | 7,29 |
| - 104 + 74 | 95,00 | 26,244 |
| - 74 + 53 | 98,62 | 30,618 |
| - 53 + 45 | 99,62 | 18,954 |
| - 45 +37 | 99,80 | 13,122 |
| -37 + 20 | 99,90 | 23,328 |
| -20 + 5 | 99,99 | 8,748 |
| -5 | 100,00 | 17,496 |
| Total | | 145,8 |

Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica do Overflow do ciclone no circuito de moagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

A distribuição granulométrica do *Overflow* dos ciclones no circuito de moagem descrita na tabela 3.2 servirá como produto que alimentará o processo de ciclonagem para deslamagem do minério.

A figura 3.2 representa o gráfico da curva granulométrica, com as partículas abaixo dos 104µm possuindo 95 % de probabilidade de reportarem ao *Overflow*.



Figura 3.2 - Curva granulométrica do *Overflow* no circuito de moagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

A figura abaixo representa o circuito directo de moagem, o balanço de massas de sólido foi feito tendo em conta que na Mina de Araxá a carga circulante é de 500%. O produto do *Overflow* deste circuito servirá para alimentar o circuito de deslamagem mais adiante.



Figura 3.4 - Fluxograma do circuito de moagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

3.2.2 Circuito de deslamagem

Visando obter bons resultados, o que significa eliminar as fracções de sólido mais fino (partículas abaixo de 5μ m), o processo de deslamagem é realizado em três estágios, cada estágio composto por duas fases (ciclonagem e reciclagem), de forma a reduzir ao máximo a presença de partículas finas no produto que posteriormente servirá para alimentar o processo de flutuação.

3.2.2.1 1º Estágio de deslamagem

3.2.2.1.1 Ciclonagem

A alimentação nesta fase é o produto do *Overflow* do ciclone que faz o fecho do circuito de moagem cuja distribuição granulométrica é conhecida (Figura 3.7).

1. Cálculo do diâmetro do ciclone

Para este estágio pretende-se obter um Overflow com 95% correspondendo a 37 μm :

$$d95 = 37 \mu m$$

Tendo em conta os factores de correção mencionados nas fórmulas (3), (4) e (5). A percentagem de sólido em volume é 6,7%, a pressão é 10PSI e a densidade do sólido de 3,9t/h obtemos o diâmetro médio básico.

$$d50_{básico} = 29,76 \,\mu m$$

De acordo com a figura 2.6 o diâmetro do ciclone correspondente ao diâmetro mediano básico calculado anteriormente é de 9,75 polegada.

$$dc = 9,75'' = 24,8cm$$

Após determinar o diâmetro do ciclone foram realizadas várias iterações com o objectivo de estimar os produtos do ciclone que irá permitir alcançar o Overflow pretendido. A figura 3.4 ilustra diversas tentativas para se obter tal produto variando a pressão, o comprimento do vórtice, os diâmetros dos orifícios do hidrociclone.





Após sucessivas iterações foram obtidos os seguintes valores.

H – Distância entre a extremidade do orificio do apex ao vortex

do – Diametro do vortex

du – Diametro do Apex

di – Diametro do orificio da alimentação

P – Pressão da bomba

Tabela 3.3 - Dimensões dos parâmetros geométricos dos ciclones na ciclonagem do 1º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| H (cm) | do (cm) | du (cm) | di (cm) | P (Psi) |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 40 | 14 | 7,37 | 5 | 10 |

2. Cálculo para capacidade de ciclonagem

Vazão Vol. A = Vazão volumetrica da polpa(alimentação)

Vazão Vol. A = $0.7 * dc^{0.21} * di^{0.53} * (do^2 + du^2)^{0.49} * H^{0.16}$ * exp $(-0.0055 * \% s \acute{o} l. v) * P^{0.56}$

vazão vol. A = $316,09m^3/h$

Com as configurações apresentadas na Tabela 3.3 e com o cálculo feito na secção anterior, verifica-se que a bateria de hidrociclones nesta operação terá a capacidade de produzir 316,09m³/h. Mas visando a redução do número de hidrociclones necessários nesta operação, foi fixado um valor abaixo do valor calculado. Considerando uma capacidade de ciclonagem igual a, 285m³/h foi possível obter o produto especificado para o *Overflow*.

Vazão Vol.
$$A = 285m^3/h$$

3. Vazão volumétrica do sólido, da água e % de sólido

Conhecidas a massa de sólido (145, 8t/h) e a densidade do sólido $(3, 9t/m^3)$ foi possível calcular a vazão volumétrica do sólido e de água, a massa da polpa e a % de sólido, cujos valores se apresentam na Tabela 3.4.

| Produto | Alimentação |
|----------------------------------|-------------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 145,8 |
| %Sólido | 37 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 248,0 |
| Vaz.vol.p.al (m ³ /h) | 285 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 393,8 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,38 |
| %sólido.vol | 13,0 |

Tabela 3.4 - Descrição do fluxo que alimenta os ciclones para a ciclonagem do 1° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

4. Cálculo dos parâmetros resultantes do processo de Ciclonagem

Para o cálculo dos parâmetros de ciclonagem, foram feitas diversas iterações, assumindo-se os valores da tabela 3.4 como óptimos para se alcançar as especificações do produto desejado nesta fase (ciclonagem do 1º estágio de deslamagem).

Esses parâmetros são: *Bypass* calculado através da equação (10) sendo igual 40%; diâmetro mediano corrigido equação (7) sendo igual à 86,2µm a partição padrão equação (6); e a partição corrigida equação (8).

O resultado obtido através das estimações em relação ao *Underflow* e Overflow são descritos na tabela 3.5 e 3.6, respectivamente.

| Dim (µm) | A (t/h) | Y (%) | Yc (%) | U (t/h) |
|-------------|----------|-------|--------|----------|
| -250 + 221 | 0 | 99,99 | 100,00 | 0 |
| - 221 + 190 | 0 | 99,97 | 100,00 | 0 |
| -190 + 179 | 0 | 95,92 | 99,88 | 0 |
| - 179 + 104 | 7,29 | 86,63 | 99,86 | 7,279 |
| - 104 + 74 | 26,244 | 74,77 | 70,94 | 18,62 |
| - 74 + 53 | 30,618 | 60,73 | 35,17 | 10,77 |
| - 53 + 45 | 18,954 | 48,13 | 14,37 | 2,72 |
| - 45 +37 | 13,122 | 44,85 | 8,95 | 1,17 |
| -37 + 20 | 23,328 | 42,47 | 5,00 | 1,166 |
| -20 + 5 | 8,748 | 39,89 | 0,77 | 0,067 |
| -5 | 17,496 | 39,43 | 0,01 | 0,0019 |
| Total | 145,8t/h | | | 41,80t/h |

| Tabela 3.5 - Partição padrão e corrigida do Underflow para o ciclone na ciclonagem do |
|---|
| 1 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa) |

| Dim(µm) | A (t/h) | Yc (Underflow) % | Yc (Overflow) % | O (t/h) |
|-------------|-----------|------------------|-----------------|----------|
| - 221 + 190 | 0 | 100,00 | 0,00 | 0 |
| -190 + 179 | 0 | 99,88 | 0,12 | 0,00 |
| - 179 + 104 | 7,29 | 99,86 | 0,14 | 0,01 |
| - 104 + 74 | 26,244 | 70,94 | 29,06 | 7,63 |
| - 74 + 53 | 30,618 | 35,17 | 64,83 | 19,85 |
| - 53 + 45 | 18,954 | 14,37 | 85,63 | 16,23 |
| - 45 +37 | 13,122 | 8,95 | 91,05 | 11,95 |
| -37 + 20 | 23,328 | 5,00 | 95,00 | 22,16 |
| -20 + 5 | 8,748 | 0,77 | 99,23 | 8,68 |
| -5 | 17,496 | 0,01 | 99,99 | 17,49 |
| Total | 145,48t/h | | | 103,9t/h |

Tabela 3.6 - Partição corrigida do *Underflow* e *Overflow* para os ciclones na ciclonagem do 1 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

a) Curva de partição

A figura 3.10 representa o gráfico das curvas de partição padrão e corrigida, na qual se verifica que as partículas acima dos $37\mu m$ têm probabilidade inferior a 95% de reportarem ao Overflow.



Figura 3.6 - Estimação da curva de eficiência para a ciclonagem do 1ºestágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

5. Cálculo da Imperfeição

A Imperfeição é calculada com base na equação (12) e nos valores de partição extraídos da curva de partição corrigida, que são os seguintes: $d50=86,15\mu m$, $d25=63,73\mu m$ e $d75=108,3\mu m$. Desta forma o factor imperfeição calculado é igual à 0,26. O mesmo valor deverá ser comparado com o valor da imperfeição na fase de reciclonagem para comparar qual dos dois processos possuí melhor eficiência. Lembrando que quanto maior for o valor da imperfeição menos eficiente é o processo.

6. Relação entre o diâmetro do Apex e do Vortex.

A relação entre o *Apex* e o *Vortex* é também uma das formas de se medir a eficiência da classificação. Recomenda-se que esta relação entre diâmetros seja definida no intervalo **0,45** <**du/do> 0,56**. A razão entre os diâmetros do *Apex* e *Vortex* devem estar neste intervalo para se obter uma descarga em forma de cone que por definição é a que fornecerá melhor descarga do *Underflow*.

De acordo com os valores indicados na Tabela 3.3 a razão entre o diâmetro do *Apex* e o diâmetro *Vortex* é igual a 0,53 o que significa sinal de descarga do *Undeflow* dentro dos parâmetros exigidos, conforme mostra o intervalo citado acima.

Depois de se fazer a classificação com o parâmetro m estimado, é necessário calcular o valor de m com a altura do vórtice (H) determinado na estimação, para avaliação da eficiência no modelo de Plitt.

8. Cálculo do Indicador da eficiência da classificação (Parâmetro m)

Depois de se fazer a classificação com o parâmetro m estimado, é necessário calcular o valor de m com a altura do Vórtice (H) determinado na estimação, para avaliação da eficiência no modelo de Plitt.

De acordo com a equação (11) tem-se m = 2,42 que caracteriza a classificação como sendo de eficiência Razoável.

7. Balanço de massas

O *Apex* deve permitir que as partículas grossas saiam sem entupimento, ou seja, deve-se evitar a descarga em cordão, uma condição que ocorre quando o *Apex* está sobrecarregado, o que resultaria em uma fraca classificação.

De acordo com figura 3.7 a descarga em cordão é atingida à direita de cada curva. Com o objectivo de fazer o balanco de massas bem com evitar de descarga em cordão, a percentagem de sólidos no *Underflow* é considerada 80% em função da densidade do minério que é igual a 3,9g/cm³. Procura-se evitar a descarga em cordão porque implica falta de classificação por parte do hidrociclone.



Figura 3.7 - Percentagem de sólidos no *Underflow* e *Overflow* em diferentes densidades de sólidos (Mular and Juli, 1982)

Com nos resultados obtidos através do processo de ciclonagem e no valor da percentagem de sólido no *Underflow* lida na figura 3.7, é realizado o balanço de massas nos ciclones.

| Produto | Alimentação | Overflow | Underflow |
|----------------------------------|-------------|----------|-----------|
| | 145.0 | 102.0 | 41.90 |
| vaz.mass.sol (l/h) | 145,8 | 103,9 | 41,80 |
| %Sólido | 37 | 30,16 | 80 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 248,0 | 239,14 | 8,86 |
| Vaz.vol.p.al (m ³ /h) | 285 | 265,58 | 19,4 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 393,8 | 342,38 | 51,42 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,38 | 1,29 | 2,65 |
| %sólido.vol | 13,0 | 9,97 | 55,2 |

| Tabela 3.7 - Balanço de massas dos | s ciclones na | ciclonagem de | o 1º estág | gio de |
|------------------------------------|---------------|---------------|------------|--------|
| deslamagem (Fonte | e: Resultante | da pesquisa) | | |

8. Número de ciclones

De acordo com a figura (2.7 e 2.8) a vazão aproximada do ciclone de 9,75 polegadas para pressão de 10PSI é igual a 270 USGPM. Então o N° de ciclones necessário para deslamar $285m^3/h$ é igual a:

$$N_{ciclones} = 4,6 \cong 5$$

De acordo com as abordagens de (José Beraldo, 1987), ao número de hidrociclones em operação deve ser adicionado 2 ciclones que estarão em stand-by.

 $N_{ciclones} = 5 + 2(em stand by)$

 $N_{ciclones} = 7$

3.2.2.1.2 Reciclonagem

O produto do *Underflow* da secção anterior constituirá a alimentação para esta fase, faltando apenas aumentar a vazão de água de modos a obter o valor da polpa tida como ideal para se alcançar o *Overflow* especificado anteriormente.

A vazão de água do produto do *Underflow* da ciclonagem é igual a 8,86t/h é necessário acrescentar ao circuito 141,33t/h de água para se obter uma polpa de 160m³/h(Valor este que se encontra abaixo da capacidade de reciclonagem e que permiterá obter o overflow específicado.

1. Cálculo para capacidade de Reciclonagem

Por se tratar das mesmas configurações a capacidade de reciclonagem será igual ao valor da capacidade de ciclonagem, portanto o valor é $316,09m^3/h$. Para se obter o *Overflow* especificado e reduzir o número de ciclones necessários optou-se em trabalhar com o valor de $160m^3/h$.

| Produto | Alimentação | Alim. Com água adicionada |
|----------------------------------|-------------|---------------------------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 41,80 | 41,80 |
| %Sólido | 80 | 20,29 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 8,86 | 150 |
| Vaz.vol.p.al (m ³ /h) | 19,4 | 160 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 51,42 | 191,8 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 2,65 | 1,2 |
| %sólido.vol | 55,2 | 6,7 |

Tabela 3.8 - Balanço do fluxo do *Underflow* antes de alimentar os ciclones para a reciclonagem do estágio 1 (Fonte: Resultante da pesquisa)

2. Cálculo dos parâmetros resultantes do processo de Reciclonagem

Esses parâmetros são: *Bypass* calculado através da equação (10) sendo igual 37%; diâmetro mediano corrigido equação (7) sendo igual à 73,86µm a partição padrão equação (6); e a partição corrigida equação (8).

O resultado obtido através das estimações em relação ao *Underflow* e *Overflow* são descritos na tabela 3.9 e 3.10, respectivamente.

| Dim (µm) | A (t/h) | Y (%) | Yc (%) | U (t/h) |
|-------------|----------|--------|--------|-----------|
| -190 + 179 | 0 | 99,91 | 100,00 | 0 |
| - 179 + 104 | 7,279 | 97,46 | 100,00 | 7,279 |
| - 104 + 74 | 18,62 | 87,88 | 91,91 | 17,11 |
| - 74 + 53 | 10,77 | 68,59 | 50,23 | 5,41 |
| - 53 + 45 | 2,72 | 48,26 | 18,01 | 0,49 |
| - 45 +37 | 1,17 | 43,311 | 10,17 | 0,12 |
| -37 + 20 | 1,166 | 40,05 | 5,00 | 0,058 |
| -20 + 5 | 0,067 | 37,21 | 0,50 | 0,000339 |
| -5 | 0,0019 | 36,89 | 0,00 | 0,0000001 |
| Total | 41,80t/h | | | 30,47t/h |

Tabela 3.9 - Partição padrão e corrigida do *Underflow* para o ciclone na reciclonagem do 1 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Tabela 3.10 - Partição corrigida do *Underflow* e *Overflow* para os ciclones na reciclonagem do 1 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Dim (µm) | A (t/h) | Yc (Underflow) -% | Yc (Overflow) -% | O (t/h) |
|-------------|----------|-------------------|------------------|---------|
| - 179 + 104 | 7,279 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 104 + 74 | 18,62 | 91,91 | 8,09 | 1,51 |
| - 74 + 53 | 10,77 | 50,23 | 49,77 | 5,36 |
| - 53 + 45 | 2,72 | 18,01 | 81,99 | 2,23 |
| - 45 +37 | 1,17 | 10,17 | 89,83 | 1,05 |
| -37 + 20 | 1,166 | 5,00 | 95,00 | 1,11 |
| -20 + 5 | 0,067 | 0,50 | 99,50 | 0,07 |
| -5 | 0,0019 | 0,00 | 100,00 | 0,002 |
| Total | 41,80t/h | | | 11,3t/h |

Como representação dos resultados da reciclonagem, a figura 3.8 apresenta as curvas de eficiência no 1ºestágio de deslamagem.



Figura 3.8 - Estimação da Curva de eficiência para reciclonagem do 1ºestágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

3. Cálculo da Imperfeição

A Imperfeição é calculada com base na equação (12) e nos valores de partição extraídos da curva de partição corrigida, que são os seguintes: $d50=73,85\mu m$, $d25=57,56\mu m$ e $d75=89,39\mu m$. Desta forma o factor imperfeição calculado é igual à 0,21. Lembrando que quanto maior for o valor da imperfeição menos eficiente é o processo. Pode-se confirmar que o processo de reciclonagem melhora a eficiência, pois, possui uma possui um valor relativamente baixo quando comparado com o valor da imperfeição na ciclonagem (0,26).

4. Cálculo do Indicador da eficiência da classificação (Parâmetro m)

Depois de se fazer a classificação com o parâmetro m estimado, é necessário calcular o valor de m com a altura do Vórtice (H) determinado na estimação, para avaliação da eficiência no modelo de Plitt.

De acordo com a equação (11) tem-se m = 2,69 que caracteriza a classificação como sendo de eficiência Razoável.

5. Balanço de massa em relação ao processo de reciclonagem

Portanto de acordo com a figura 3.7 a percentagem de Underflow, determina-se devido a densidade do minério (3,9t/m³), Underflow:80%.

| Produto | Alimentação | Overflow | Underflow |
|----------------------------------|-------------|----------|-----------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 41,8 | 11,3 | 30,47 |
| %Sólido | 20,29 | 7,21 | 80 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 150 | 143,42 | 6,58 |
| Vaz.vol.p.al (m ³ /h) | 160 | 146,29 | 13,71 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 191,8 | 154,59 | 37,21 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,2 | 1,01 | 2,71 |
| %sólido.vol | 6,7 | 1.20 | 56,9 |

Tabela 3.11 - Balanço de massas dos ciclones na reciclonagem do 1º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

A soma do *Overflow* da ciclonagem e reciclonagem do estágio 1 constituirá a alimentação do 2º estágio.

6. Número de ciclones

De acordo com a figura (2.7 ou 2.8) A vazão aproximada do ciclone de 3 polegadas para pressão de 10PSI é igual a 270 USGPM. No entanto, o número de ciclones necessários para deslamar 380m³/h é:

$$N_{ciclones} = 2,6 \cong 3$$

De acordo com literatura, ao número de hidrociclones em operação deve ser adicionar 2 ciclones que ficaram em stand-by.

 $N_{ciclones} = 3 + 2$ (em stand by)

$$N_{ciclones} = 5$$

Portanto, o processo de ciclonagem do primeiro estágio é formado por uma bateria de 7 ciclones e a reciclonagem é formada por 5 ciclones.

Os ciclones nos processos de ciclonagem e reciclonagem possuem diâmetro igual a 248 mm (9,75 ").



Figura 3.9 - Fluxograma do 1º Estágio de Deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

3.2.2.2 2º Estágio de Deslamagem

3.2.2.2.1 Ciclonagem

A Alimentação a esta fase é constituída pelos *Overflow* da ciclonagem e reciclonagem do estágio anterior cujas características são as indicadas na Tabela 3.12

| Produto | Overflow do 1°: | Overflow do 1°: | Alimentação |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| | Ciclonagem | Reciclonagem | |
| Vaz.mass.sól (t/h) | 103,25 | 11,16 | 114,41 |
| %Sólido | 10 | 10 | 23,02 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 239,14 | 143,42 | 382,56 |
| Vaz.vol.p.al (m ³ /h) | 265,58 | 146,29 | 411,87 |
| Vaz.mass.polp (t/h) | 342,38 | 154,59 | 496,97 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,29 | 1,06 | 1,21 |
| %sólido.vol | 9,97 | 1,96 | 7,12 |

Tabela 3.12 - Balanço do fluxo que alimentará os ciclones para a ciclonagem do 2° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Tabela 3.13 - Distribuição granulométrica do produto que alimentará os ciclones na ciclonagem do 2º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Dim (µm) | Overflow | Overflow (reciclonagem) | |
|-------------|--------------|-------------------------|-------------------|
| | (ciclonagem) | | Alimentação Final |
| - 179 + 104 | 0 | 0,01 | 0,01 |
| 179 + 74 | 1,43 | 7,24 | 8,67 |
| -74 + 53 | 5,29 | 19,58 | 24,87 |
| -53+45 | 2,22 | 16,17 | 18,39 |
| -45+37 | 1,05 | 11,93 | 12,98 |
| -37+20 | 1,11 | 22,14 | 23,25 |
| -20+5 | 0,07 | 8,68 | 8,75 |
| -5 | 0,001891 | 17,5 | 17,501891 |
| Total | | | 114,41 |

1. Cálculo do diâmetro do ciclone

Para este estágio pretende-se obter um Overflow com 95% correspondendo a $20\mu m$:

$$d95 = 20 \mu m$$

Tendo em conta os factores de correção mencionados nas fórmulas (3), (4) e (5). A percentagem de sólido em volume é 7,12%, a pressão é 60PSI e a densidade do sólido de 3,9t/h obtemos o diâmetro medio básico.

$$d50_{básico} = 26,15 \,\mu m$$

2. Determinação do diâmetro do ciclone (dc)

De acordo com a figura 2.6 o diâmetro do ciclone correspondente ao diâmetro mediano básico calculado anteriormente é de 7 polegada.

$$dc = 7'' = 17,75cm$$

Após determinar o diâmetro do ciclone é necessário fazer várias iterações com o objectivo de se obter configuração do ciclone que irá permitir alcançar o *Overflow* especificado.

A figura 3.10 ilustra diversas tentativas para se obter tal produto modificando as variáveis operacionais e geométricas.



Figura 3.10 - Representação das tentativas de estimação para Curva de eficiência na ciclonagem do 2º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Após sucessivas iterações foram estabelecidos os seguintes valores fixados na tabela 3.14:

Tabela 3.14 - Dimensões dos parâmetros geométricos para os ciclones na ciclonagem do 2º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| H (cm) | do (cm) | du (cm) | di (cm) | P (Psi) |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 20 | 8 | 4,27 | 5 | 60 |

3. Cálculo para capacidade de ciclonagem

Vazão Vol. A = Vazão volumetrica da polpa(alimentação)

vaz. vol. p. al = $0.7 * dc^{0.21} * di^{0.53} * (do^2 + du^2)^{0.49} * H^{0.16}$ * exp(-0.0055 * %sól. v') * P^{0.56}

Vazão Vol. A =
$$417,52m^3/h$$

Com as configurações apresentadas na tabela acima e com o cálculo feito na secção anterior, nota-se que a bateria de hidrociclones nesta operação terá a capacidade de produzir 417,52m³/h. Mas visando a redução do número de hidrociclone necessário nesta operação, foi fixado o valor 411,87m³/h como forma de se obter o overflow pretendido.

Vazão Vol. A =
$$411,87m^3/h$$

Tabela 3.15 - Descrição do fluxo que alimentará os ciclones para ciclonagem do 2° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Produto | Alimentação |
|----------------------------------|-------------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 114,41 |
| %Sólido | 23,02 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 382,56 |
| Vazão Vol. A (m ³ /h) | 411,87 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 496,97 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,21 |
| %sólido.vol | 7,12 |

4. Cálculo dos parâmetros resultantes do processo de Ciclonagem

Para o cálculo dos parâmetros de ciclonagem, foram feitas diversas iterações, assumindo-se os valores da tabela 3.14 como óptimos para se alcançar as especificações do produto desejado nesta fase (ciclonagem do 2º estágio de deslamagem).

Esses parâmetros são: *Bypass* calculado através da equação (10) sendo igual 18%; diâmetro mediano corrigido equação (7) sendo igual à 42,23µm a partição padrão equação (6); e a partição corrigida equação (8).

A tabela 3.16 resume o cálculo da partição do *Underflow* da ciclonagem para 2° estágio de deslamagem.

| Dim (µm) | A (t/h) | Y (%) | Yc (%) | U (t/h) |
|-------------|-----------|-------|--------|-----------|
| - 180 + 179 | 0 | 99,89 | 100,00 | 0 |
| - 179 + 104 | 0,01 | 99,61 | 100,00 | 0,01 |
| - 104 + 74 | 8,67 | 99,35 | 100,00 | 8,67 |
| - 74 + 53 | 24,87 | 99,14 | 98,97 | 24,61 |
| - 53 + 45 | 18,39 | 80,71 | 76,65 | 14,10 |
| - 45 +37 | 12,98 | 63,96 | 56,37 | 7,32 |
| -37 + 20 | 23,25 | 45,93 | 34,53 | 8,03 |
| -20 + 5 | 8,75 | 21,51 | 5,00 | 0,43 |
| -5 | 17,50 | 17,38 | 0,04 | 0,0076883 |
| Total | 114,42t/h | | | 63,18t/h |

| Tabela 3.16 | - Partição padrão e corrigida | do Underflow para | o ciclone na | ciclonagem do |
|-------------|-------------------------------|--------------------|----------------|---------------|
| | 2° estágio de deslamagem | (Fonte: Resultante | e da pesquisa) | 1 |

A tabela 3.17 resume o cálculo da partição do *Overflow* na ciclonagem do 2° estágio de deslamagem.

| Dime (µm) | A (t/h) | Yc (Underflow)-% | Yc (Overflow)-% | O (t/h) |
|------------|-----------|------------------|-----------------|-----------|
| - 104 + 74 | 8,67 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 74 + 53 | 24,87 | 98,97 | 1,03 | 0,26 |
| - 53 + 45 | 18,39 | 76,65 | 23,35 | 4,29 |
| - 45 +37 | 12,98 | 56,37 | 43,63 | 5,66 |
| -37 + 20 | 23,25 | 34,53 | 65,47 | 15,22 |
| -20 + 5 | 8,75 | 5,00 | 95,00 | 8,31 |
| -5 | 17,51 | 0,04 | 99,96 | 17,494203 |
| Total | 114,42t/h | | | 51,24 |

Tabela 3.17 - Partição corrigida do *Underflow* e *Overflow* na ciclonagem do 2 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Gráfico da curva de partição corrigida no processo de ciclonagem para 2º estágio de deslamagem.





5. Cálculo da Imperfeição

A Imperfeição é calculada com base na equação (12) e nos valores de partição extraídos da curva de partição corrigida, que são: $d50=42,67\mu m$, $d25=31,52\mu m$ e d75 =52,35 μm . Desta forma o factor imperfeição calculado é igual à 0,24. O mesmo valor deverá ser comparado com o valor da imperfeição na fase de reciclonagem para comparar qual dos dois processos possuí melhor eficiência. Lembrando que quanto maior for o valor da imperfeição menos eficiente é o processo.

6. Relação entre diâmetro do Apex e Vortex

A relação entre o *Apex* e o *Vortex* é também uma das formas de se medir a eficiência da classificação. Recomenda-se que esta relação entre diâmetros seja definida no intervalo 0,45 < du/do > 0,56.

A razão entre os diâmetros do *Apex* e *Vortex* devem estar neste intervalo para se obter uma descarga em forma de cone que por definição é a que fornecerá melhor descarga do *Underflow*.

De acordo com os valores indicados na Tabela 3.14 a razão entre o diâmetro do *Apex* e o diâmetro *Vortex* é igual a 0,539 o que significa sinal de descarga do *Undeflow* dentro dos parâmetros exigidos, conforme mostra o intervalo citado acima.

7. Cálculo do Indicador da eficiência da classificação (Parâmetro m)

Depois de se fazer a classificação com o parâmetro m estimado, é necessário calcular o valor de m com a altura do Vórtice (H) determinado na estimação, para avaliação da eficiência no modelo de Plitt.

De acordo com a equação (11) tem-se m = 2,31

8. Balanço de massa em relação ao processo de ciclonagem

Portanto de acordo com a (figura 3.7) a percentagem de Underflow para evitar a descarga em forma de cordão é 80%.

| Produto | Alimentação | Overflow | Underflow |
|--------------------------------|-------------|----------|-----------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 114,41 | 51,24 | 63,18 |
| %Sólido | 23,02 | 12,26 | 80 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 382,56 | 366,77 | 15,79 |
| Vazão Vol. A (m³/h) | 411,87 | 379,88 | 31,99 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 496,97 | 418 | 78,97 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,21 | 1,10 | 2,47 |
| %sólido.vol | 7,12 | 3,45 | 50 |

| Tabela 3.18 - Balanço de massas dos ciclones na ciclonagem do 2º es | stágio de |
|---|-----------|
| deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa) | |

9. Número de ciclones

De acordo com a figura (2.7 ou 2.8) A vazão aproximada do ciclone de 3 polegadas para pressão de 60PSI é igual a 400 USGPM. No entanto, o número de ciclones necessários para deslamar $411,87m^3/h$ é:

$$N_{ciclones} = 4,2 \cong 5$$

De acordo com literatura, ao número de hidrociclones em operação deve ser adicionar mais 2 ciclones que ficaram em stand-by.

```
N_{ciclones} = 5 + 2 (em stand - by)
N_{ciclones} = 7
```

3.2.2.2.2 Reciclonagem

O produto do *Underflow* no processo de ciclonagem servirá como a alimentação para a reciclonagem do 2° estágio de deslamagem. A tabela 3.19 representa a distribuição granulométrica do produto do *Underflow* da ciclonagem.

Tabela 3.19 - Distribuição granulométrica do produto que alimenta os ciclones na reciclonagem do 2º estágio (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Dim (µm) | Alimentação | U (t/h) |
|-------------|-------------|----------|
| - 179 + 104 | 0,01 | 0,01 |
| - 104 + 74 | 8,67 | 8,67 |
| - 74 + 53 | 24,87 | 24,61 |
| - 53 + 45 | 18,39 | 14,10 |
| - 45 +37 | 12,98 | 7,32 |
| -37 + 20 | 23,25 | 8,028 |
| -20 + 5 | 8,75 | 0,437 |
| -5 | 17,51 | 0,0078 |
| Total | 114,42t/h | 63,18t/h |

1. Cálculo para capacidade de Ciclonagem

Por se tratar das mesmas configurações a capacidade de reciclonagem será igual ao valor da capacidade de ciclonagem, portanto o valor é 417,52m³/h, para se obter o *Overflow* especificado e reduzir o número de ciclones necessários optou-se em trabalhar com o valor de 380m³/h, o que é conseguido aumentando 348,01t/h de água ao circuito.

Tabela 3.20 - Descrição do fluxo que alimentará os ciclones para reciclonagem do 2° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Produto | Underflow | Alimentação com água adicionada |
|--------------------------------|-----------|---------------------------------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 63,18 | 63,18 |
| %Sólido | 80 | 14,80 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 15,79 | 363,80 |
| Vazão vol. (m³/h) | 31,99 | 380 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 78,97 | 426,98 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 2,47 | 1,12 |
| %sólido.vol | 50 | 4,26 |

2. Cálculo dos parâmetros resultantes do processo de Ciclonagem

Esses parâmetros são: *Bypass* calculado através da equação (10) sendo igual 17%; diâmetro mediano corrigido equação (7) sendo igual à 37,17µm a partição padrão equação (6); e a partição corrigida equação (8).

A tabela 3.21 resume o cálculo da partição do *Underflow* da reciclonagem no 2° estágio de deslamagem.

| Dim (µm) | A (t/h) | Y (%) | Yc (%) | U (t/h) |
|-------------|-----------|-------|--------|-----------|
| - 179 + 104 | 0,01 | 100 | 100,00 | 0,01 |
| - 104 + 74 | 8,67 | 100 | 100,00 | 8,67 |
| - 74 + 53 | 24,61 | 99,99 | 100,00 | 24,61 |
| - 53 + 45 | 14,1 | 96,15 | 95,39 | 13,45 |
| - 45 +37 | 7,32 | 82,21 | 78,72 | 5,76 |
| -37 + 20 | 8,028 | 57,66 | 49,34 | 3,961 |
| -20 + 5 | 0,437156 | 20,60 | 5,00 | 0,022 |
| -5 | 0,0076883 | 16,42 | 0,02 | 0,0000012 |
| Total | 63,18t/h | | | 56,49t/h |

| Tabela 3.21 - Partição padrão e corrigida do Underflow para os | s ciclones na |
|--|---------------|
| reciclonagem do 2 ° estágio de deslamagem | |

A tabela 3.22 resume o cálculo da partição do *Overflow* da reciclonagem no 2° estágio de deslamagem.

| Tabela 3.22 - Partição corrigida do | Underflow e Overflow | na reciclonagem do 2 ° |
|-------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| estágio de deslamager | n (Fonte: Resultante da | ı pesquisa) |

| Dim (µm) | A (t/h) | Yc (Underflow)-% | Yc (Overflow)-% | O (t/h) |
|------------|-----------|------------------|-----------------|---------|
| - 104 + 74 | 8,67 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 74 + 53 | 24,61 | 99,99 | 0,00 | 0,00 |
| - 53 + 45 | 14,1 | 92,13 | 4,61 | 0,65 |
| - 45 +37 | 7,32 | 73,28 | 21,28 | 1,56 |
| -37 + 20 | 8,028 | 45,26 | 50,66 | 4,07 |
| -20 + 5 | 0,437156 | 5,00 | 95,00 | 0,42 |
| -5 | 0,0076883 | 0,02 | 99,98 | 0,0077 |
| Total | 63,18t/h | | | 6,70t/h |

Gráfico da curva de partição corrigida para a reciclonagem no 2º estágio de deslamagem.



Figura 3.12 - Estimação da Curva de eficiência para reciclonagem do 2ºestágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

3. Cálculo da Imperfeição

A Imperfeição é calculada com base na equação (12) e nos valores de partição extraídos da curva de partição corrigida, que são seguintes: $d50=37,18\mu m$, $d25=27,567\mu m$ e $d75=43,99\mu m$. Desta forma o factor imperfeição calculado é igual à 0,219. Lembrando que quanto maior for o valor da imperfeição menos eficiente é o processo. Pode-se confirmar que o processo de reciclonagem melhora a eficiência, pois, possui um valor relativamente baixo quando comparado com o valor da imperfeição na ciclonagem (0,24).

4. Cálculo do Indicador da eficiência da classificação (Parâmetro m)

Depois de se fazer a classificação com o parâmetro m estimado, é necessário calcular o valor de m com a altura do Vórtice (H) determinado na estimação, para avaliação da eficiência no modelo de Plitt. De acordo com a equação (11) tem-se m = 2,36 que caracteriza a classificação como sendo de eficiência Razoável.

5. Balanço de massa em relação ao processo de Reciclonagem

De acordo com a (figura 3.7), a percentagem de sólidos para o Underflow é 80%, para se evitar uma descarga em cordão.

Tabela 3.23 - Balanço de massas dos ciclones na reciclonagem do 2º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Produto | Alimentação | Overflow | Underflow |
|---------------------------------|-------------|----------|-----------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 63,18 | 6,70 | 56,49 |
| %Sólido | 14,80 | 1,88 | 80 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 363,80 | 349,68 | 14,12 |
| Vazão Vol.A (m ³ /h) | 380 | 351,4 | 28,60 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 426,98 | 356,37 | 70,61 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,12 | 1,01 | 2,47 |
| %sólido.vol | 4,26 | 0,489 | 50,0 |

A alimentação para flutuação das partículas grossas será a soma do material que constitui o *Underflow* da reciclonagem dos estágios 1 e 2 de deslamagem.

6. Número de ciclones

De acordo com a figura (2.7 ou 2.8) A vazão aproximada do ciclone de 3 polegadas para pressão de 60PSI é igual a 400 USGPM. No entanto, o número de ciclones necessários para deslamar 380m³/h é:

$$N_{ciclones} = 4,2 \cong 5$$

De acordo com literatura, ao número de hidrociclones em operação deve ser adicionar mais 2 ciclones que ficaram em stand-by.

$$N_{ciclones} = 5 + 2 (em stand - by)$$

 $N_{ciclones} = 7$

Portanto, o processo de ciclonagem do segundo estágio é formado por uma bateria de 7 ciclones. O processo de reciclonagem do estágio 2 é formado por uma bateria de 7 ciclones, os ciclones nos processos de ciclonagem e reciclonagem possuem diâmetro igual a de 177,8 mm (7").



Figura 3.13 - Fluxograma do 2º Estágio de Deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

3.2.2.3 Alimentação para a Flutuação das partículas Grossas

A Alimentação à Flutuação das partículas grossas é constituída pelos Underflow da reciclonagem dos 1° e 2° estágios de deslamagem.

Assim, somando as massas em cada classe granulométrica do *Underflow* nas Tabelas 3.9 e 3.21 obtém-se a descrição granulométrica do produto que alimentará a flutuação das partículas grossas como mostra a tabela 3.24. De igual forma, somando o produto do Underflow nas tabelas 3.11 e 3.23 obtém-se as características do fluxo que servirá a flutuação das partículas grossas como mostra a tabela 3.25.

| Dim (um) | Underflow: Reciclonagem | Underflow: Reciclonagem | A (t/h) |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Dini (µiii) | do 1º estágio (t/h) | do 2º estágio (t/h) | |
| - 179 + 104 | 7,279 | 0,01 | 7,289 |
| - 104 + 74 | 17,11 | 8,67 | 25,78 |
| - 74 + 53 | 5,41 | 24,61 | 30,02 |
| - 53 + 45 | 0,49 | 13,45 | 13,94 |
| - 45 +37 | 0,12 | 5,76 | 5,88 |
| -37 + 20 | 0,058 | 3,961 | 4,019 |
| -20 + 5 | 0,00034 | 0,022 | 0,022215 |
| -5 | 0,0000001 | 0,0000012 | 0,0000013 |
| Total | 30,47t/h | 56,49t/h | 86,95 |

Tabela 3.24 - Distribuição granulométrica do produto que alimenta o circuito de Flutuação grosseira (Fonte: Resultante da pesquisa)

Tabela 3.25 - Características do produto que alimenta o circuito de flutuação grosseira (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Produto | Underflow do 1º estágio: | Underflow do 2º estágio: | A (t/h) |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|
| | Reciclonagem (t/h) | Reciclonagem (t/h) | |
| Vaz.mass.sól (t/h) | 30,47 | 56,49 | 86,95 |
| %Sólido | 80 | 80 | 79,99 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 6,58 | 14,12 | 20,7 |
| Vazão vol.A (m³/h) | 13,71 | 28,60 | 42,31 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 37,21 | 70,61 | 107,82 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 2,71 | 2,47 | 2,55 |
| %sólido.vol | 56,9 | 50 | 50,63 |

3.2.2.2.4 Alimentação para o 3º estágio de deslamagem

A Alimentação a esta fase é constituída pelos Overflow da ciclonagem do 2° estágio de deslamagem (Tabelas 3.17 ou 3.18) e da reciclonagem do 2° estágio de deslamagem (Tabelas 3.22 ou 3.23).

| Dim(µm) | Overflow do 2º estágio: Ciclonagem (t/h) | Overflow do 2º estágio: Reciclonagem (t/h) | A (t/h) |
|------------|---|---|----------|
| - 104 + 74 | 0,00 | 0,00 | 0 |
| - 74 + 53 | 0,26 | 0,00 | 0,26 |
| - 53 + 45 | 4,29 | 0,65 | 4,94 |
| - 45 +37 | 5,66 | 1,56 | 7,22 |
| -37 + 20 | 15,22 | 4,07 | 19,29 |
| -20 + 5 | 8,31 | 0,42 | 8,73 |
| -5 | 17,494 | 0,0077 | 17,50189 |
| Total | 51,24 | 6,70 | 57,94 |

Tabela 3.26 - Distribuição granulométrica do produto que alimenta o 3º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Tabela 3.27 - Características do produto que alimenta o 3º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Produto | Overflow do 2º estágio: | Overflow do 2º estágio: | A (t/h) |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|
| | Ciclonagem | Reciclonagem | |
| Vaz.mass.sól (t/h) | 51,24 | 6,70 | 57,94 |
| %Sólido | 10 | 10 | 7,48 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 366,77 | 349,68 | 716,45 |
| Vazão Vol.A (m ³ /h) | 379,88 | 351,4 | 731,28 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 418 | 356,37 | 774,37 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,10 | 1,01 | 1,06 |
| %sólido.vol | 3,45 | 0,489 | 2,031 |

3.2.2.3 3º Estágio de Deslamagem

3.2.2.3.1 Ciclonagem

1. Cálculo do diâmetro do Ciclone

Para este estágio pretende-se obter um *Overflow* com 95% correspondendo a 10µm:

$$d95 = 10 \mu m$$

Tendo em conta os factores de correção mencionados nas fórmulas (3), (4) e (5). A percentagem de sólido em volume é 8,15%, a pressão é 95PSI e a densidade do sólido de 3,9t/h obtemos o diâmetro medio básico.

$$d50_{básico} = 12,47 \mu m$$

De acordo com a figura 2.6, o diâmetro do ciclone correspondente ao diâmetro mediano básico calculado anteriormente é de 3 polegada.

$$dc = 3'' = 7,62cm$$

Após determinar o diâmetro do ciclone é necessário fazer várias iterações com o objectivo de se obter a configuração do ciclone que irá permitir alcançar o *Overflow* pretendido, a figura abaixo ilustra diversas tentativas para se obter tal produto variando a pressão, o comprimento do vórtice, os diâmetros dos orifícios do ciclone bem como o valor da capacidade de ciclonagem.



Figura 3.14- Representação das tentativas de estimação para Curva de eficiência na ciclonagem do 3º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Após sucessivas iterações foram estabelecidos os seguintes valores fixados na tabela 3.28.

Tabela 3.28- Dimensões dos parâmetros geométricos para os ciclones na ciclonagem do 3º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| H (cm) | do (cm) | du (cm) | di (cm) | P (Psi) |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 35 | 4 | 2 | 3 | 95 |

2. Cálculo para capacidade de ciclonagem

Vazão Vol. A = Vazão volumetrica da polpa(alimentação)

Vazão Vol. A = $0.7 * dc^{0.21} * di^{0.53} * (do^2 + du^2)^{0.49} * H^{0.16} * \exp(-0.0055 * \% s \delta l. v)$ * $P^{0.56}$

Vazão Vol. A = $188,4m^3/h$

Com as configurações apresentadas na tabela 3.28 e com o cálculo feito na secção anterior, nota-se que a bateria de hidrociclones nesta operação terá a capacidade de produzir 187,6m³/h.

Mas visando a redução do número de hidrociclone necessário nesta operação, foi adaptado um valor abaixo do valor calculado, portanto a capacidade de ciclonagem considerada foi 180,0m³/h, (Este valor permitirá obter o produto específicado para o overflow). Novo balanço de massas para a alimentação dos ciclones no processo de ciclonagem.

| Tabela 3.29 - Descrição do fluxo que alimentará os ciclones para ciclonagem do 3° |
|---|
| estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa) |

| Produto | Alimentação Ideal |
|---------------------------------|-------------------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 57,94 |
| %Sólido | 25,97 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 165,14 |
| Vazão Vol.A (m ³ /h) | 180 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 223,08 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 1,24 |
| %sólido.vol | 8,25 |

3. Cálculo dos parâmetros resultantes do processo de Ciclonagem

Para o cálculo da partição padrão, partição corrigida bem como o bypass foram feitas diversas iterações fixando-se mencionados na tabela 3.28.

Esses parâmetros são: *Bypass* calculado através da equação (10) sendo igual 26%; diâmetro mediano corrigido equação (7) sendo igual à 20,03µm a partição padrão equação (6); e a partição corrigida equação (8).

A tabela 3.35 resume o cálculo da partição do *Underflow* da ciclonagem do 3° estágio de deslamagem.

Tabela 3.30 - Partição padrão e corrigida do *Underflow* na ciclonagem do 3 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Dim (µm) | A (t/h) | Y (%) | Yc (%) | U (t/h) |
|-------------|----------|--------|--------|-----------|
| - 179 + 104 | 0 | 96,793 | 100,00 | 0 |
| - 104 + 74 | 0 | 62,51 | 100,00 | 0,00 |
| - 74 + 53 | 0,26 | 44,60 | 100,00 | 0,26 |
| - 53 + 45 | 4,94 | 32,54 | 100,00 | 4,94 |
| - 45 +37 | 7,22 | 29,06 | 100,00 | 7,22 |
| -37 + 20 | 19,29 | 26,97 | 99,91 | 19,271 |
| -20 + 5 | 8,73 | 25,62 | 50,13 | 4,346662 |
| -5 | 17,50189 | 25,76 | 0,38 | 0,0667617 |
| Total | 57,94 | | | 36,14 |

A tabela 3.31 resume o cálculo da partição do Overflow da ciclonagem do 3° estágio de deslamagem.

| Dim (µm). | A(t/h) | Yc (Underflow)-% | Yc (Overflow)-% | O (t/h) |
|-----------|----------|------------------|-----------------|----------|
| - 53 + 45 | 4,94 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 45 +37 | 7,22 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| -37 + 20 | 19,29 | 99,90 | 0,09 | 0,02 |
| -20 + 5 | 8,73 | 50,13 | 49,87 | 4,35 |
| -5 | 17,50189 | 0,38 | 99,62 | 17,435 |
| Total | 57,94t/h | | | 21,80t/h |

Tabela 3.31 - Partição corrigida do *Underflow* e *Overflow* na ciclonagem do 3 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Fonte: Resultante da pesquisa

Gráfico da curva de partição corrigida para ciclonagem do 3º estágio de deslamagem.



Figura 3.15 - Estimação da Curva de eficiência para ciclonagem do 3ºestágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

4. Cálculo da Imperfeição

A Imperfeição é calculada com base na equação (12) e nos valores de partição extraídos da curva de partição corrigida, que são os seguintes: $d50=19,97\mu m$, $d25=15,76\mu m$ e $d75=25,43\mu m$. Desta forma o factor imperfeição calculado é igual à 0,242.

O mesmo valor deverá ser comparado com o valor da imperfeição na fase de reciclonagem para comparar qual dos dois processos possuí melhor eficiência. Lembrando que quanto maior for o valor da imperfeição menos eficiente é o processo.

5. Relação entre diâmetro do Apex e Vortex

A relação entre o *Apex* e o *Vortex* é também uma das formas de se medir a eficiência da classificação. Recomenda-se que esta relação entre diâmetros seja definida no intervalo 0,45<du/do> 0,56. A razão entre os diâmetros do *Apex* e *vortex* devem estar neste intervalo para se obter uma descarga em forma de cone que por definição é a que fornecerá melhor descarga do *Underflow*.

De acordo com os valores indicados na Tabela 3.14 a razão entre o diâmetro do *Apex* e o diâmetro *Vortex* é igual a 0,5 o que significa sinal de descarga do *Undeflow* dentro dos parâmetros exigidos, conforme mostra o intervalo citado acima.

6. Cálculo do Indicador da eficiência da classificação (Parâmetro m)

Depois de se fazer a classificação com o parâmetro m estimado, é necessário calcular o valor de m com a altura do Vórtice (H) determinado na estimação, para avaliação da eficiência no modelo de Plitt.

De acordo com a equação (11) e os dados da iteração, obtém-se: m = 2,02

7. Balanço de massa em relação ao processo de ciclonagem

Portanto de acordo com a figura 3.7 que relaciona a percentagem de Underflow e Overflow, teremos devido a densidade do minério (3,9t/m³): Underflow:80%

| Produto | Alimentação | Overflow | Underflow |
|---------------------------------|-------------|----------|-----------|
| Vaz.mass.sól(t/h) | 57,94 | 21,80 | 36,14 |
| %Sólido | 25,97 | 12,27 | 80 |
| Vaz.mass.Água(t/h) | 165,14 | 156,105 | 9,035 |
| Vazão vol.A (m ³ /h) | 180 | 161,7 | 18,30 |
| Vaz.mass.polpa(t/h) | 223,08 | 177,905 | 45,175 |
| Dens.Polpa(t/m ³) | 1,24 | 1.10 | 2,47 |
| %sólido.vol | 8,25 | 3,46 | 50,6 |

Tabela 3.32 - Balanço de massas dos ciclones na ciclonagem do 3º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

7. Número de ciclones

De acordo com a figura (2.7 ou 2.8) A vazão aproximada do ciclone de 3 polegadas para pressão de 95PSI é igual a 80 USGPM. No entanto, o número de ciclones necessários para deslamar $180m^3/h$ é:

$$N_{ciclones} = 9,9 \cong 10$$

De acordo com literatura, ao número de hidrociclones em operação deve ser adicionar mais 2 ciclones que ficaram em stand-by.

```
N_{ciclones} = 10 + 2 ( em stand – by)
N_{ciclones} = 12
```

3.2.2.3.2 Reciclonagem

O produto do *Underflow* da ciclonagem constituirá a alimentação para reciclonagem. A tabela 3.33 representa distribuição granulométrica do produto do *Underflow* da ciclonagem.

| Tabela 3.33 – Distribuição granulométrica do produto que alimentará os ciclones na |
|--|
| reciclonagem do 3º estágio (Fonte: Resultante da pesquisa) |

| Dim (µm) | A (t/h) |
|------------|---------|
| -179 + 104 | 0 |
| -104 + 74 | 0,00 |
| - 74 + 53 | 0,26 |
| - 53 + 45 | 4,94 |
| - 45 + 37 | 7,22 |
| -37 + 20 | 19,271 |
| -20 + 5 | 4,3467 |
| -5 | 0,06677 |
| Total | 36,10 |

1. Cálculo para capacidade de Ciclonagem

Por se tratar das mesmas configurações a capacidade de reciclonagem será igual ao valor da capacidade de ciclonagem, portanto o valor é $188,4m^3/h$, para se obter o Overflow especificado e reduzir o número de ciclones necessários optou-se em trabalhar com o valor de $150m^3/h$, o que é conseguido aumentando 131,7t/h de água ao circuito.

Tabela 3.34 - Descrição do fluxo que alimentará os ciclones para reciclonagem do 2° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Produto | Underflow | Alime. Com Água adicionada |
|---------------------------------|-----------|----------------------------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 36,14 | 36,14 |
| %Sólido | 80 | 20,41 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 9,035 | 140,74 |
| Vazão vol.A (m ³ /h) | 18,30 | 150 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 45,175 | 176,84 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 2,47 | 1,18 |
| %sólido.vol | 50,86 | 6,17 |

2. Cálculo dos parâmetros resultantes do processo de Ciclonagem

Esses parâmetros são: *Bypass* calculado através da equação (10) sendo igual 25%; diâmetro mediano corrigido equação (7) sendo igual à 19,02µm a partição padrão equação (6); e a partição corrigida equação (8).

A tabela 3.35 resume o cálculo da partição do *Underflow* na reciclonagem para 3º estágio de deslamagem.

| Dim (µm) | A (t/h) | Y (%) | Yc (%) | U (t/h) |
|------------|-----------|-------|--------|-----------|
| -179 + 104 | 0 | 98,72 | 100,00 | 0 |
| -104 + 74 | 0 | 66,54 | 100,00 | 0,00 |
| - 74 + 53 | 0,26 | 46,09 | 100,00 | 0,26 |
| - 53 + 45 | 4,94 | 32,35 | 100,00 | 4,94 |
| - 45 + 37 | 7,22 | 28,54 | 100,00 | 7,22 |
| -37 + 20 | 19,271 | 26,35 | 99,99 | 19,27 |
| -20 + 5 | 4,346662 | 25,78 | 57,22 | 2,487 |
| -5 | 0,0667617 | 25,1 | 0,31 | 0,0002066 |
| Total | 36,10t/h | | | 34,18t/h |

Tabela 3.35 - Partição padrão e corrigida do *Underflow* na reciclonagem do 3 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

A tabela 3.36 resume o cálculo da partição do *Overflow* na reciclonagem para 3° estágio de deslamagem.

Tabela 3.36 - Partição corrigida do *Underflow* e *Overflow* para os ciclones na reciclonagem do 3 ° estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Dim (µm) | A(t/h) | Yc (Underflow)-% | Yc (Overflow)-% | O (t/h) |
|-----------|-----------|------------------|-----------------|----------|
| -104 + 74 | 0 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 74 + 53 | 0,26 | 99,99 | 0,00 | 0,00 |
| - 53 + 45 | 4,94 | 92,13 | 4,61 | 0,00 |
| - 45 + 37 | 7,22 | 73,28 | 21,28 | 0,00 |
| -37 + 20 | 19,271 | 45,26 | 50,66 | 0,00 |
| -20 + 5 | 4,346662 | 5,00 | 95,00 | 1,93 |
| -5 | 0,0667617 | 0,02 | 99,98 | 0,066545 |
| Total | 36,10 | | | 1,92 |



Gráfico da curva de partição corrigida para reciclonagem do 3º estágio de deslamagem.

Figura 3.16 - Estimação da Curva de eficiência para reciclonagem do 3ºestágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

3. Cálculo da Imperfeição

A Imperfeição é calculada com base na equação (12) e nos valores de partição extraídos da curva de partição corrigida, que são os seguintes: $d50=18,97\mu m$, $d25=15,13\mu m$ e $d75=24,86\mu m$. Desta forma o factor imperfeição calculado é igual à 0,241. Lembrando que quanto maior for o valor da imperfeição menos eficiente é o processo. Pode-se confirmar que o processo de reciclonagem melhora a eficiência, pois, possui uma possui um valor relativamente baixo quando comparado com o valor da imperfeição na ciclonagem (0,242).

4. Cálculo do Parâmetro (m)

Depois de se fazer a classificação com o parâmetro m estimado, é necessário calcular o valor de m com a altura do Vórtice (H) determinado na estimação, para avaliação da eficiência no modelo de Plitt.

De acordo com a equação (11) tem-se m = 2,08 que caracteriza a classificação como sendo de eficiência Razoável.

5. Balanço de massa em relação ao processo de reciclonagem

Portanto de acordo com a (figura 3.7) a percentagem de sólidos para o Underflowé 80%, para se evitar uma descarga em cordão.

| Produto | Alimentação | Overflow | Underflow |
|---------------------------------|-------------|----------|-----------|
| Vaz.mass.sól(t/h) | 36,10 | 1,92 | 34,18 |
| %Sólido | 20,41 | 1,43 | 80 |
| Vaz.mass.Água(t/h) | 140,74 | 132,19 | 8,545 |
| Vaz.vol.p.al(m ³ /h) | 150 | 132,69 | 17,31 |
| Vaz.mass.polpa(t/h) | 176,84 | 134,12 | 42,725 |
| Dens.Polpa(t/m ³) | 1,18 | 1,01 | 2,47 |
| %sólido.vol | 6,17 | 0,4 | 50,6 |

Tabela 3.37 - Balanço de massas dos ciclones na reciclonagem do 3º estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

6. Número de ciclones

De acordo com a figura (2.7 ou 2.8) A vazão aproximada do ciclone de 3 polegadas para pressão de 95PSI é igual a 80 USGPM. No entanto, o número de ciclones necessários para deslamar $150m^3/h$ é:

$$N_{ciclones} = 8,25 \cong 9$$

De acordo com literatura, ao número de hidrociclones em operação deve ser adicionar mais 2 ciclones que ficaram em stand-by.

 $N_{ciclones} = 9 + 2$ (em stand – by)

$$N_{ciclones} = 11$$



Figura 3.17 - Fluxograma do 3º Estágio de Deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

3.2.2.4 Alimentação para o circuito de Flutuação das partículas Finas

A Alimentação à Flutuação das partículas finas é constituída por produto proveniente do terceiro estágio de ciclonagem que é formado por uma bateria de 12 ciclones e proveniente da reciclonagem do referido estágio é formado por uma bateria de 11 ciclones. Os ciclones nos processos de ciclonagem e reciclonagem possuem diâmetro igual a de 76,2 mm (3").

O produto que alimenta o processo de flutuação fina é composto pelo *Underflow* da reciclonagem do 3º estágio de deslamagem, cujas características se apresentam nas Tabelas 3.38 e 3.39.

| Dim (µm) | Alimentação (t/h) |
|-----------|-------------------|
| -104 + 74 | 0,00 |
| - 74 + 53 | 0,26 |
| - 53 + 45 | 4,94 |
| - 45 + 37 | 7,22 |
| -37 + 20 | 19,209 |
| -20 + 5 | 2,487 |
| -5 | 0,0002166 |
| Total | 34,18t/h |

Tabela 3.38 - Distribuição granulométrica do produto que alimenta o circuito de flutuação de partículas finas (Fonte: Resultante da pesquisa)

Tabela 3.39 - Descrição do fluxo para o circuito de flutuação de partículas finas (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Produto | Alimentação |
|---------------------------------|-------------|
| Vaz.mass.sól (t/h) | 34,18 |
| %Sólido | 80 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 8,545 |
| Vazão vol.A (m ³ /h) | 17,31 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 42,725 |
| Dens.Polpa (t/m ³) | 2,47 |
| %sólido.vol | 50,6 |

3.2.2.5 Análise e descrição dos resultados no processo de deslamagem

Neste trabalho determinou-se a eficiência da classificação para a configuração usada na Mina de Araxá com base na análise da influência das variáveis geométrica e operacionais usando o método de Plitt.

A figura 3.18 mostra uma baixa eficiência ao se operar com apenas um único estágio, pois usando o mesmo ciclone para a deslamagem no terceiro estágio a fim de classificar o produto do *Overflow* do circuito fechado de moagem o mesmo se mostra incapaz de classificar a massa mineral eficientemente.

Mas por outro lado com os sucessivos estágios o mesmo ciclone é capaz de classificar eficientemente a fracção de partículas que lhe é submetido, removendo maioritariamente as partículas abaixo dos 5µm.





Curvas de eficiência foram usadas para comparar qualitativamente o desempenho geral da configuração de cada estágio de deslamagem.

Nas figuras 3.19, 3.20 e 3,21 são comparadas as curvas reduzidas nos processos de ciclonagem e reciclonagem de cada estágio.



Figura 3.19 - Estimação das curvas reduzidas da eficiência no estágio 1 de deslamagem com e sem reciclonagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

A figura 3.20 representa as curvas de eficiência com e sem o processo de reciclonagem do *Underflow* da ciclonagem.



Figura 3.20 - Estimação das curvas reduzidas da eficiência no estágio 2 de deslamagem com e sem reciclonagem (Fonte: Resultante da pesquisa)



Figura 3.21 - Estimação das curvas reduzidas da eficiência no estágio 3 de deslamagem com e sem reciclonagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

A configuração do circuito com uma curva de maior inclinação é considerada a mais eficiente enquanto aquela com uma inclinação menor é considerada menos eficiente. As duas curvas representadas em cada uma das três figuras mencionadas acima demonstram que:

O processo de reciclonagem apresenta uma curva com maior inclinação, o que representa consequentemente maior eficiência dos ciclones em classificar as partículas com base no diâmetro de separação definido em cada estágio.

As curvas de maior inclinação possuem menor valor numérico de imperfeição e consequentemente maior eficiência (Wills & Napier Munn, 2006). O valor da imperfeição dos ciclones de reciclonagem nos três estágios foram sempre menores do que nos ciclones de ciclonagem, confirmando deste modo se tratar de um aumento de eficiência nos processos de reciclonagem.

A deslamagem do primeiro estágio é iniciada com realização da ciclonagem em ciclones de 248 mm (9,75 "); O fluxo do *Underflow* destes ciclones, com 80% de sólidos, é direccionado para uma máquina giratória denominada *scrubber* que realiza a lavagem ou desagregação dos sólidos antes de serem reciclonados em outra bateria de ciclones de 248 mm (9,75").

O *Overflow* dos ciclones de reciclonagem retorna à alimentação dos ciclones que realizam a ciclonagem do primeiro estágio. O *Overflow* de ciclonagem e reciclonagem do primeiro estágio de deslamagem 248 mm (9,75 ") alimentam outra bateria de ciclones de 177,8 mm (7"), para deslamagem do segundo estágio, onde o circuito semelhante de ciclonagem e reciclonagem é repetido. O *Underflow* dos ciclones de reciclonagem no primeiro e segundo estágio de deslamagem, constituem a alimentação para flotação de partículas grossas.

Na terceira e última etapa de deslamagem, o *Overflow* de ciclonagem e reciclonagem do segundo estágio de deslamagem de 177,8 mm (7"), são ciclonados e reciclonados em ciclones de 76,2 mm (3"). O *Underflow* dos ciclones de reciclonagem constituem a alimentação para flotação de partículas finas, por outo lado, o *Overflow* constitui o produto a ser rejeitado (predominantemente composto de partículas finas abaixo de 5μ m).


Figura 3.22 - Circuito geral de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Tabela 3.40 - Número total de ciclones que constituem o circuito de deslamagem geral (Fonte: Resultante da pesquisa)

| | N° ciclones | | di | Η | du | do |
|-----------------------------|----------------------|--------------|------|----|------|----|
| | Ciclonagem | Reciclonagem | | | | |
| Fecho do circuito de moagem | 5 | - | 21,9 | 45 | 9 | 19 |
| 1ºEstágio de deslamagem | 7 | 5 | 5 | 40 | 7,37 | 14 |
| 2ºEstágio de deslamagem | 7 | 7 | 5 | 20 | 4,27 | 8 |
| 3ºEstágio de deslamagem | 12 | 11 | 3 | 35 | 2 | 4 |
| Total | 54 (37 sem stand by) | | | | | |

3.2.2.6 Massa de mineral útil perdida no circuito de deslamagem

Um dos aspectos importantes que foi também considerado no desenvolvimento do estudo realizado é a quantificação da massa de mineral útil perdida durante a deslamagem, que deve ser a menor possível, para que se mantenha o equilíbrio entre eficiência técnica e eficiência económica do beneficiamento mineral, sendo esta última normalmente medida pela recuperação em mineral útil ou pela quantificação de mineral perdido durante o mesmo. Os produtos do *Overflow* da ciclonagem e da reciclonagem do 3º estágio de deslamagem constituem a lama rejeitada, cujas características são mostradas nas Tabelas 3.41 e 3.42.

| Dim (µm) | Overflow: Ciclonagem (t/h) | Overflow: Reciclonagem (t/h) | Rejeito(t/h) |
|-----------|-------------------------------|---------------------------------|--------------|
| - 45 + 37 | 0,00 | 0,00 | 0 |
| -37 + 20 | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| -20 + 5 | 4,35 | 1,89 | 6,31 |
| -5 | 17,502 | 0,0665 | 17,50167 |
| Total | 21,80 | 1,92 | 23,84 |

Tabela 3.41 - Distribuição granulométrica do produto que é rejeitado no processo de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

Tabela 3.42 - Descrição do fluxo que é rejeitado no processo de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

| Produto | Overflow: | Overflow: | Rejeito |
|-------------------------------|------------|--------------|---------|
| | Ciclonagem | Reciclonagem | |
| Vaz.mass.sól(t/h) | 21,80 | 1,92 | 23,84 |
| %Sólido | 12,27 | 1,43 | 7,47 |
| Vaz.mass.Água (t/h) | 156,10 | 132,19 | 296,24 |
| Vazão vol.A (m³/h) | 161,7 | 132,69 | 302,13 |
| Vaz.mass.polpa (t/h) | 177,9 | 134,12 | 319,14 |
| Dens.Polpa(t/m ³) | 1.10 | 1,01 | 1,06 |
| %sólido.vol | 3,46 | 0,4 | 2,023 |

Como é mostrado na Tabela 3.39, as partículas consideradas muito finas e que constituem a faixa granulométrica abaixo de 5μ m, foram significativamente removidas do circuito porque constituem exactamente os 12% em peso previstos. Então a essa massa mineral perdida associam-se 5 a 7% de Nb2O5.

Tendo em conta que os processos de classificação mineral não são perfeitos, durante o processo perdeu-se também parte da massa mineral acima da granulometria prevista, isto é, acima de 5 μ m, mais especificamente entre 5 e 20 μ m. Esta massa mineral perdida corresponde a menos de 5% do material que se pretendia recuperar inicialmente, e que eram 128,3 t/h.

Daí o reforço da necessidade de equilíbrio entre a eficiência técnica e a eficiência económica do beneficiamento mineral, para que a recuperação mineralúrgica seja a melhor possível.

3.2.2.7 Controlo da influência das variáveis operacionais e geométricas

O controlo das partículas acima e abaixo de 5µm foi feito com base na definição de diversos diâmetros de separação.

Os distintos diâmetros de separação, foram definidos com o objectivo de se obter um *Overflow* com maior percentagem de sólidos possível e diminuir a possibilidade de sobrecarga dos ciclones que poderia se verificar com apenas um estágio.

Em cada estágio o produto especificado é 95% de *Overflow* constituído por partículas de tamanho inferior ao dos diâmetros de separação, essa medida permitiu controlar e direccionar as partículas em cada estágio como mostra a figura 3.43.

| | Diâmetro de separação | Overflow |
|-----------|-----------------------|-----------------|
| Estágio 1 | 37µm | $95\% > 5\mu m$ |
| Estágio 2 | 20µm | $95\% > 5\mu m$ |
| Estágio 3 | 10µm | 95% < 5µm |

Tabela 3.43 – Controle das partículas através do diâmetro de separação em cada estágio (Fonte: Resultante da pesquisa)

As variáveis operacionais como vazão da alimentação e a pressão ao sofrerem um aumento em seus valores tendem a aumentar a percentagem de sólido no *Overflow* de cada estágio.

A variável operacional que contribui para um menor número de partículas no *Overflow* é a distribuição granulométrica do minério, quanto maior for a granulometria das partículas menor é a probabilidade destas reportarem ao *Overflow*. As variáveis geométricas ao sofrerem uma redução de seu tamanho tendem a reduzir a percentagem de sólido no *Overflow*.

| Variáveis geométricas | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 3 |
|------------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| do | 14cm | 8 cm | 4 cm |
| di | 5 cm | 5 cm | 3 cm |
| du | 7,37 | 4,27cm | 2 cm |
| Η | 40 cm | 20 cm | 35 cm |
| Variáveis operacionais | | | |
| Pressão (PSI) | 10 | 60 | 95 |
| % A (Ciclonagem -Reciclonagem) | 37 - 20,29 | 23,02 - 14,8 | 25,97 - 20,4 |
| Vazão vol. A (Ciclonagem | | | |
| /Reciclonagem) (m ³ /h) | 316 - 160 | 411,8 - 380 | 180 - 150 |
| | | | |
| % O (Ciclonagem /Reciclonagem) | 30,16 / 7,2 | 12,26 / 1,8 | 12,27 / 1,4 |

Tabela 3.44 – Condições operatórias em cada estágio de deslamagem (Fonte: Resultante da pesquisa)

No entanto, segundo a figura 3.44, valores acima dos estabelecidos para as variáveis geométricas resultaram em uma redução da percentagem de sólidos no *Overflow*. Valores abaixo dos estabelecidos para variáveis operacionais tendem a reduzir a percentagem de sólidos no *Overflow* em cada estágio e consequentemente aumentar quantidade de finos no *Underflow*. O que resultaria em um aumento de partículas finas na alimentação para o processo de flutuação.

Os resultados obtidos durante as simulações feitas neste trabalho mostram que controlando de forma eficiente das variáveis operacionais e geometria nos três estágios de deslamagem haverá menor fracção de partículas finas reportando ao *Underflow*. Como visto no circuito geral, os produtos dos *Underflow* nos três estágios de deslamagem servirão para alimentar os processos de flutuação de partículas grossas e finas. Associadas as partículas finas, existe o inconveniente com sua recuperação.

Os principais problemas na concentração de partículas finas por flutuação são: baixa probabilidade de captura (colisão e adesão) das partículas pelas bolhas; baixo tempo de residência para a captura; maior capacidade de adsorção de reagentes.

As alternativas para aumento da recuperação dessas fracções finas na flutuação primária são: classificar a alimentação em fracção de grossos e finos, consequentemente tratar as fracções em circuitos separados. Tanto a fracção de grossos quanto a fracção de finos serão maioritariamente compostas por partículas acima dos 5µm.

4. Conclusões

Os cálculos realizados permitiram confirmar que a configuração de três estágios de deslamagem usada na lavaria de Araxá para a remoção das partículas com dimensão inferior a 5µm é de facto a melhor.

A configuração em cada estágio de deslamagem composta por uma fase de ciclonagem seguida de uma fase de reciclonagem melhorou o processo de classificação. A mesma configuração permitiu uma classificação bem mais acurada em cada estágio quando comparada com a configuração composta de apenas uma fase de ciclonagem em cada estágio.

Em cada estágio de deslamagem de acordo com o método de **Plitt** observou-se um indicador de eficiência da classificação (constante \mathbf{m}) superior a $\mathbf{2}$ o que permite concluir que se está em presença de um processo de classificação eficiente.

A reciclonagem em cada estágio proporcionou de facto uma redução significativa no número de partículas finas no fluxo que serve como Alimentação à concentração por Flutuação, facto que permite melhorar a eficiência no processo de deslamagem de um modo geral.

5. Recomendações

Baseado nas conclusões deste trabalho foram feitas as seguintes recomendações para um possível futuro trabalho:

- Realizar uma nova modelagem com um outro método matemático tal como (Lynch e Rao ou Yoshioka e Hotta), com o objectivo de comparar os resultados gerados pelo método de Plitt.
- Realizar uma nova modelagem, com ou sem o método de Plitt, ao Overflow da ciclonagem do 3º estágio com o objectivo de recuperar a massa mineral útil perdida na ciclonagem do mesmo.
- Realizar uma análise económica para avaliar os benefícios de se aplicar mais um conjunto de ciclones a fim de recuperar a massa mineral perdida.

Referências Bibliográficas

1. CHAVES, A. P. Classificação. In: CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. 3ª

2. KELLY, E. G. SPOTTISWOOD, D.J **Introduction to mineral processing**. New York: Wiley, 1982.

- 3. DELBONI JR., H. Tratamento de minérios: cominuição e classificação. São Paulo: Escola
- 4. NAPIER-MUNN, T. J. Mineral comminution circuits: their operation and optimisation.
- 5. Drzymala, J. 2007. *Mineral processing, foundations of theory and practice of minerallurgy*. Wroclaw, Poland.
- 6. Arterburn, R.A. 1976. *The sizing and selection of hydrocyclones.*

7. Chu, L. & Luo, Q. 1994. Hydrocyclone with high sharpness of separation. *Filtration & Separation*. (November):733–736.

8. Flintoff, B.C., Plitt, L.R. & Turak, A.A. 1987. **Cyclone modelling:** A review of present technology. *CIM Bulletin*. 80:39–50.

9. Gaudin, A.M. 1937. *Principles of Mineral dressing*. First ed. New York & London: McGraw-Hill Book Company Inc.

10. Gupta, A. & Yan, D.S. 2006. *Mineral processing, design and operation*. Perth, Australia.Elsevier Science.

11. Kelly, E.G. & Spottiswood, D.J. 1982. *Introduction to mineral processing*. First ed. New York:Wiley.

12. Mainza, A.N. 2006. Contribution to the understanding of the three-product cyclone on classification of a dual density platinum ore. University of Cape Town.

13. Beraldo .L. J.1987_Moagem de minérios em moinho tubulares. São Paulo.

- Salvador L .M de Almeida e Sampaio A. J_ Tratamento de Minério. 4ªEdição/CETEM
- 15. R. O Burt.2000: Concentration of Tantalum and Niobium.
- 16. O. de Souza Paraiso. Mining, ore preparation and Niobium-based materials production at araxá, Brazil.
- 17. Arthur Pinto Chaves e Colaboradores, 2002-Teoria e prática do tratamento de minérios-volume 1

- Wills, B.A. & Napier-Munn, T.J. 2006. Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th Editio ed. Elsevier Science & Technology Books.
- 19. Tromp, K.F. 1937. "New methods of computing the washability of coals". Gluckauf. 37:125–131.
- 20. Tarr Jr., D.T. 1985. Hdrocyclones. In Mineral Processing Handbook. N.L. Weiss, Ed. New York & London: SME. 3D–10–3D–38.
- 21. Metso. 2015. Basics in minerals processing.
- 22. Kelsall, D.F. 1953. A further study of the hydraulic cyclone. Chem. Eng. Sci. 2(6):254–272.
- 23. Kelly, E.G. & Spottiswood, D.J. 1982. Introduction to mineral processing. First ed. New York: Wiley.
- 24. Drzymala, J. 2007. Mineral processing, foundations of theory and practice of minerallurgy. Wroclaw, Poland.
- 25. Barrios, G.F. 2006. Increasing the Capacity of the Grinding Circuits without Installing More Mills. The Fourth Southern African Conference on Base Metals SAIMM. 433–444.
- 26. BRADLEY, D. The hydrocyclone. Oxford. Pergamon, 1965.
- 27. Maurice C. Fuerstenau and Kenneth N. Han Principles of Mineral Processing-(Mular and Juli -1982)