



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE MINAS



**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SEPARADOR DE MEIO DENSO
DA LAVARIA DA MINA DO CHITOTOLO**

**TRABALHO DE FIM DE CURSO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
LICENCIATURA EM ENGENHARIA DE MINAS, REALIZADO POR**

ANTÓNIO LUÍS JOSÉ JOÃO

LUANDA

DEZEMBRO DE 2021

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE MINAS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SEPARADOR DE MEIO DENSO
DA LAVARIA DA MINA DO CHITOTOLO**

ANTÓNIO LUÍS JOSÉ JOÃO

Estudante Nº 94129

Trabalho de fim de Curso apresentado à
Universidade Agostinho Neto, Faculdade de
Engenharia, Curso de Minas, como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de licenciatura
em Engenharia de Minas.

Orientadores:

 **Msc. Jorge Amadeu Simões**

 **Dra. Alice de Ceita e Almeida**

LUANDA

DEZEMBRO DE 2021

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Deus Todo-Poderoso pelo dom da vida e por me ter concedido saúde, sabedoria e discernimento na elaboração e conclusão deste trabalho e por permitir que o mesmo fosse terminado.

Seguidamente agradecer à minha família no geral, especialmente aos meus pais, pelo apoio incondicional e que de uma forma muito singular propiciaram a minha formação, e de forma incansável me têm prestado muita atenção.

Aos nossos Professores e Orientadores da Universidade Agostinho Neto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Minas, Prof^o. Jorge Simões e à Prof^a. Alice de Ceita, e a todos os Professores, de modo geral, pela amizade, simpatia, habilidades e conhecimentos transmitidos ao longo deste percurso académico.

Por último e não menos importante aos meus Colegas e Amigos da FEUAN Departamento de Minas e a todos aqueles que directa ou indirectamente ajudaram na realização deste trabalho.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho **aos meus Pais**, “Luís João António” e “Joana José António” e **à minha Tia** “Romana João António” pelo apoio incondicional à minha formação.

EPÍGRAFE

“Mesmo que o justo caia sete vezes, visto que muitas são as suas dificuldades, irá levantar-se outra vez, pois Jeová Deus livra-os de todas elas”.

Baseado in Bíblia Sagrada, (Sal 34:19; Pr 24:16)

RESUMO

A separação por meio denso é um método de separação gravimétrica, que se baseia na diferença de densidade entre um meio fluido e os minerais a serem separados. O processo de **separação em meio denso** possui elevada eficiência, mesmo considerando a sua limitada faixa granulométrica de aplicação. A principal aplicação deste processo consiste na eliminação de parte da ganga após britagem, realizando uma pré-concentração com o objetivo de reduzir os custos do tratamento posterior. Além disso, esse processo é também aplicado na obtenção de concentrado final, adequado ao tratamento de minerais metálicos ou diretamente para consumo (carvão). Devido ao seu **bom desempenho**, este método de separação gravítica é considerado o de melhor precisão de corte em relação aos meios gravíticos e isto se deve à precisão na separação de soluções com diferença de densidade de até 0,1. O presente trabalho teve como objectivo **avaliar a eficiência do separador** de meio denso com base nos resultados dos testes de eficiência feitos com cristais, testes estes que têm sido usados para se ter uma rápida avaliação duma instalação de meio denso. Este teste consiste no uso de cristais de várias dimensões e que apresentam a mesma gama de densidade do minério. Para analisar o desempenho das operações de separação em meio denso nos circuitos empregados existem diversos métodos, que podem ser agrupados em critérios dependentes e critérios independentes. Este trabalho cingiu-se no método que leva em conta os critérios independentes, e baseando-se na curva média de partição, foi possível verificar com que valor de imperfeição o separador trabalha e qual é a massa do sink. Tendo em conta os resultados obtidos a partir dos cálculos feitos, o separador trabalha com uma boa eficiência, visto que os valores do Erro e de Imperfeição do separador são de 0,03 e 0,01 respectivamente, e com uma recuperação em massa do sink com mais de 31%.

Palavras-chave: Separador de Meio Denso, Curvas de Partição, Eficiência de separação, Imperfeição do Separador

ABSTRACT

Dense medium separation is a gravimetric separation method, which is based on the difference in density between a fluid medium and the minerals to be separated. The separation process in dense medium has high efficiency, even considering its limited application particle size range. The main application of this process is to eliminate part of the gangue after crushing, carrying out a pre-concentration in order to reduce the costs of subsequent treatment. In addition, this process is also applied to obtain a final concentrate, suitable for the treatment of metallic minerals or directly for consumption (coal). Due to its good performance, this method of gravity separation is considered to have the best cutting precision in relation to gravity media and this is due to the precision in the separation of solutions with a density difference of up to 0.1. The present work aimed to evaluate the efficiency of the dense medium separator based on the results of the efficiency tests carried out with crystals, which tests have been used to have a quick evaluation of a dense medium installation. This test consists of using crystals of various dimensions and that have the same density range as the ore. To analyze the performance of separation operations in dense media in the circuits used, there are several methods, which can be grouped into dependent criteria and independent criteria. This work was limited to the method that takes into account the independent criteria, and based on the average partition curve, it was possible to verify with what imperfection value the separator works and what is the sink's mass. Taking into account the results obtained from the calculations made, the separator works with good efficiency, since the values of Error and Imperfection of the separator are 0.03 and 0.01 respectively, and with sink mass recovery, obtain more that 31% of sink mass.

Keyword: Medium Dense Separator, Partition Curves, Separation Efficiency, Separator Imperfection

INDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	ii
DEDICATÓRIA	iii
EPÍGRAFE	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I	2
1. GERNERALIDADES SOBRE O TRABALHO	3
1.1. ENQUADRAMENTO	3
1.2. Objectivos.....	3
1.2.1. Objectivo Geral	3
1.2.2. Objectivos Específicos	3
1.3. Metodologia do Trabalho	4
CAPÍTULO II	5
2. CARACTERIZAÇÃO DA MINA DO CHITOTOLO	6
2.1. Historial da Mina	6
2.2. Localização Geográfica.....	6
2.3. Clima, Hidrografia e Vegetação	7
2.4. Geologia regional das Lundas	9
2.5. Estratigrafia da área da Lunda Norte	11
CAPÍTULO III	13
3. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE A SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO	14
3.1. Histórico da Separação em Meio Denso	15

3.2.	Princípio da Separação em Meio Denso	17
3.2.1.	Processo Estático	17
3.2.2.	Processo Dinâmico	18
3.3.	Tipos de Meio Denso	19
3.3.1.	Líquidos Orgânicos.....	19
3.3.2.	Soluções Aquosas de Sais Inorgânicos	19
3.3.3.	Suspensões de Sólidos em Água	20
3.3.4.	Fluido paramagnético.....	22
3.4.	Principais equipamentos de Separação em Meio Denso usado nas Indústrias	22
3.4.1.	Equipamentos Industriais de Separação Estática	23
3.4.2.	Equipamentos Industriais de Separação Dinâmica.....	24
3.5.	Aplicações da Separação em Meio Denso	29
3.6.	Controle e Avaliação das Operações de Separação em Meio Denso	29
3.6.1.	Critérios Dependentes.....	30
3.6.2.	Critérios Independentes.....	31
CAPÍTULO IV		33
4.	AVALIAÇÃO DO SEPARADOR DE MEIO DENSO.....	34
4.1.	Generalidades sobre o Tratamento do Minério na Mina do Chitotolo	34
4.1.1.	Fase I – Lavaria de Pré-Tratamento.....	34
4.1.2.	Fase II – Lavaria de Meio Denso.....	35
4.1.3.	Recuperação do Meio	36
4.2.	Critérios da Avaliação do Separador	38
4.2.1.	Determinação da Curva Média de Partição.....	38
4.2.2.	Cálculo da Imperfeição do Separador.....	43
4.2.3.	Cálculo da Massa do Sink	45
4.3.	Discussão dos Resultados	46

4.3.1. Curva Média de Partição	46
4.3.2. Estatística dos Resultados	46
4.3.3. Recuperação em massa do Sink	47
CAPÍTULO V	48
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	48
5.1. Conclusões	49
5.2. Recomendações	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Localização geográfica da área em estudo	7
Figura 2.2: Pequena vegetação junto do Rio Lui.....	8
Figura 2.3: Savana pouco arborizada, Nzagi-Cambulo	8
Figura 2.4: Areias vermelhas argilosas das formações superficiais	10
Figura 3.1: Princípio da Separação em Meio Denso	17
Figura 3.2: Ciclone de Meio Denso	26
Figura 3.3: Separador Dynawhirpool (DWP).....	27
Figura 3.4: Separador Tri-Flo	28
Figura 3.5: Curva típica de Partição	31
Figura 4.1: Lavaria de Pré-tratamento do Chitotolo	34
Figura 4.2: Carregamento e transporte do Minério à Lavaria	35
Figura 4.3: Fluxograma simplificado do Tratamento de Minério da Lavaria de Chitotolo	37
Figura 4.4: Estimação da Curva Média de Partição.....	42
Figura 4.5: Parâmetros da Curva Média de Partição	43

INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Sequência estratigráfica no Nordeste de Angola.....	11
Tabela 3.1: Características granulométricas do ferro-silício atomizado.....	21
Tabela 3.2: Distribuição granulométrica de seis diferentes tipos de Fe/Si moído	22
Tabela 4.1: Coeficientes de Partição do Sink com base nos testes com cristais	39
Tabela 4.2: Dados da estimação da Curva média de Partição	40
Tabela 4.3: Coeficientes parciais de regressão linear Múltipla	41
Tabela 4.4: Principais dados estatísticos da análise de Regressão	42
Tabela 4.5: Principais parâmetros da curva média de partição	43
Tabela 4.6: Resumo dos principais parâmetros da eficiência da separação	44
Tabela 4.7: Cálculo da Massa do Sink	45

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

$\text{\AA}$ - Angstrom

d - Densidade da mistura desejada (g/cm^3)

Diamang - Companhia de Diamantes de Angola

d_p - Densidade de partição

d_{25} - Densidade na qual se obtém 25% de produto afundado;

d_{50} - Densidade na qual se obtém 50% de produto afundado;

d_{75} - Densidade na qual se obtém 75% de produto afundado

E - Eficiência orgânica

$E(s)$ - Eficiência da separação

E_p - Erro provável de separação

g - Aceleração da gravidade

I – Imperfeição

MQE – Média quadrática dos resíduos

M_f - Massa do fluido deslocado

MQR – Média quadrática da regressão

M_p - Massa da partícula

r – Raio do ciclone

rg - Recuperação metalúrgica da ganga

R_p – Rendimento em peso

rv - Recuperação metalúrgica do mineral útil

SQE – Soma dos quadrados dos resíduos

SMD – Separação em Meio Denso

v - Velocidade tangencial de entrada da alimentação

INTRODUÇÃO

O conjunto de operações realizadas no tratamento de minérios inclui, dentre outras, a separação por meio denso que é um método de separação hidrogravítico, baseando-se na diferença de densidade entre um meio fluido e os minerais a serem separados de maneira que os minerais com densidade inferior à do fluido (meio denso) flutuem, aqueles com densidade superior afundem e as de densidade igual à do fluido, permanecem em suspensão ou com igual probabilidade de irem para o flutuado ou para o afundado.

Um dos equipamentos mais utilizado nos processos de separação em Meio Denso é o Ciclone, por apresentar vantagens em relação a outros equipamentos, como por exemplo grande versatilidade e capacidade de classificar minérios em uma ampla faixa de tamanhos, incluindo a separação de partículas ultrafinas. A Mina do Chitotolo também usa o Ciclone em uma das etapas do tratamento do minério.

Dentro deste contexto, a avaliação do desempenho do separador de meio denso da lavaria da mina do Chitotolo torna-se o principal objectivo para o presente trabalho.

Esta avaliação foi feita com auxílio da curva de partição obtida com base nos testes com cristais. Assim, no capítulo quatro (4) deste trabalho de investigação, faz-se esta avaliação e a discussão dos resultados que se impõe, levando-nos a importantes conclusões e recomendações no capítulo subsequente.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES SOBRE O TRABALHO

1. GERNERALIDADES SOBRE O TRABALHO

1.1. ENQUADRAMENTO

A separação em meio denso é um processo hidrogravítico que se aplica na separação do diamante, nomeadamente no da mina do Chitotolo e **uma das hipóteses para o mau desempenho da separação** está ligada à regulação do separador razão pela qual é importante verificar com que valor de imperfeição o mesmo trabalha.

- ✓ **Caso de Estudo:** Lavaria da Mina do Chitotolo, localizada na Província da Lunda Norte
- ✓ **Objecto de Investigação:** Separador de Meio Denso (SMD) da Mina do Chitotolo

1.2. Objectivos

1.2.1. Objectivo Geral

Este trabalho tem como objectivo avaliar a eficiência do separador de meio denso com base nos resultados dos testes de eficiência feitos com cristais.

1.2.2. Objectivos Específicos

- ✓ Determinar a Curva média de partição com base nos testes com cristais;
- ✓ Calcular a massa do Sink, resultante da curva média de partição;
- ✓ Calcular o Erro provável (E_p) do separador;
- ✓ Calcular a imperfeição do separador.

1.3. Metodologia do Trabalho

Segundo Oliveira (2002) o método é o conjunto de regras ou critérios que servem de referência no processo de busca da explicação ou da elaboração de previsões, em relação a questões ou problemas específicos.

Assim sendo o método é o conjunto de procedimentos com o qual se atingem os objectivos ou explicações de um determinado problema. Portanto neste trabalho optou-se pela seguinte Metodologia:

- I. Pesquisa Exploratória: Envolvendo um levantamento bibliográfico e Estudos de Caso de autores que já abordaram temas similares tanto a nível nacional como internacional;
- II. Caracterização da zona de Estudo bem como do objecto de estudo;
- III. Pesquisa bibliográfica relacionada aos principais conceitos de tratamento de minérios com principal incidência aos separadores bem como à eficiência de separação;
- IV. Recolha de dados relacionados com os testes com cristais bem como alguns dados da Mina em estudo.
- V. Tratamento dos dados obtidos
- VI. Discussão e Análise dos resultados.
- VII. Considerações finais

CAPÍTULO II

CARACTERIZAÇÃO DA MINA DO CHITOTOLO

2. CARACTERIZAÇÃO DA MINA DO CHITOTOLO

2.1. Historial da Mina

A área de concessão da Sociedade Mineira do Chitotolo, Lda insere-se nas primeiras a serem exploradas pela DIAMANG, reconhecidamente pela qualidade das suas jazidas. O desenvolvimento desta área deu lugar à fundação da Vila Paiva de Andrada, actualmente cidade do NZagi, que concentrou na época importantes estruturas de apoio às operações.

Em 1996, a Sociedade Mineira do Chitotolo, foi constituída em Participação entre a ENDIAMA – Empresa Nacional de Diamantes de Angola, U.E.E., a ITM Mining Limited e a LUMANHE Mineira, Lda, tendo sido atribuída à ITM Mining Limited a responsabilidade das Operações Mineiras.

A associação foi aprovada pelo Decreto nº 36/96 de 30 de Agosto, e tinha os seguintes objectivos:

- ✓ Exploração e tratamento dos minérios dos jazigos e re-tratamento dos depósitos de rejeitados existentes na área de concessão;
- ✓ Prospecção, pesquisa e reconhecimento de jazigos de diamantes e avaliação de depósitos de rejeitados existentes na área coberta pela Licença de Prospeção e de acordo com o Programa de Investigação Geológico-Mineiro aprovado pelo Governo de Angola;
- ✓ Exploração e tratamento dos minérios de jazigos de diamantes e re-tratamento de depósitos de rejeitados, à medida que fossem descobertos ou seleccionados;
- ✓ Comercialização dos diamantes nos termos da Lei 16/94.

Perante o sucesso alcançado, entenderam os sócios existirem condições para que se prolongasse a vida do Projecto, pelo que ao fim de 8 anos de actividade a Associação foi extinta e em 2004 foi constituída a Sociedade Mineira do Chitotolo, Lda, entre os mesmos sócios, mas com prazo de vida indeterminado.

2.2. Localização Geográfica

A área de concessão da Sociedade Mineira do Chitotolo situa-se no nordeste de Angola, na província da Lunda Norte no município de Cambulo. A área de extensão da concessão é de 5.400 km² e está dividida em duas partes distintas, a Este e Oeste, com uma longitude de 21° 35' 08''.



Figura 2.2: Pequena vegetação junto do Rio Lui. Fonte: [14]

A moldura verde das matas e da grande floresta equatorial é mais expressiva junto dos braços dos grandes rios, salvo em algumas modestas manchas, é coberto de vegetação rasteira. A Lunda Norte é, em síntese, uma região de savana pouco arborizada. Todavia, a região possui alguns recursos florestais localizados fundamentalmente nos Municípios de Cambulo e Capenda-Camulemba, figura 2.3. [15]



Figura 2.3: Savana pouco arborizada, Nzagi-Cambulo. Fonte: [15]

2.4. Geologia regional das Lundas

Sendo a geologia uma ciência que estuda a composição da terra, é extremamente importante o conhecimento da geologia da região em que se pretende avançar para a exploração.

A região das lundas é uma parte integrante da plataforma angolana, constituindo uma zona de transição na qual as formações se ligam com as outras áreas de Angola.

As rochas representadas nesta área, de acordo com os “Artigos do Departamento de Geologia da Sociedade Mineira do Chitotolo” citado por Simão e Giovetty (2007), agrupam-se da seguinte maneira:

- Rochas do substrato
- Rochas de cobertura
- Formações superficiais.

Rochas do substrato: constituído pelo soco cristalino da era pré-câmbrica e compreende três grande grupos, que são:

- ✓ Arcaico inferior;
- ✓ Arcaico superior;
- ✓ Proterozoico inferior

Rochas de cobertura: compostas pela era pós pré-câmbrica e compreendem as unidades do grupo karroo, Formação Continental intercalar, Formação Calonda e o grupo kalahari.

Segundo o mesmo Artigo a região da Nordeste das Lundas, a partir do início do paleozoico, não sofreu orogenias importantes tendo afectada apenas por magmatismo básico e ultrabásico, do qual resultou durante o mesozoico a intrusão de rochas kimberlíticas.

Formações superficiais: As formações superficiais são depósitos superficiais compostos por aluviões de diversas origens, o que significa que houve mudanças de clima durante a deposição. Desta maneira deduz-se que o ciclo de erosão que originou desmoronamento do planalto constituído pela série de grés polimorfos e pela série de areias ocre provocou uma deformação na região dando-lhe inclinação de sul para o norte cujo exemplo se manifesta na orientação S-N, dos troços de rios principais da região.

As areias vermelhas argilosas cobrem a superfície morfológica do terciário constituído por cascalho e elementos de grés polimorfos. Essas areias provavelmente resultam duma redistribuição das areias de Kalahari, sendo a sua idade de terciário ou também pode ser plistocénico inferior ou médio (figura 2.4).



Figura 2.4: Areias vermelhas argilosas das formações superficiais. Fonte: [16]

Formação Calonda: Designa-se por formação calonda um conjunto de depósitos englobados no ciclo cretácico, resultado de uma retomada de ciclos de erosão após o magmatismo kimberlítico de fontes primárias.

Os Artigos do Departamento de Geologia da Sociedade Mineira do Chitotolo afirmam que esta formação cobre a maior parte da região do nordeste das Lundas e atribui-se uma idade cretácica, provavelmente cretácico médio. Por falta de estudos paleontológicos na região, esta datação baseou-se por analogia das formações similares encontradas na vizinha República Democrática do Congo.

A espessura de cobertura da formação calonda varia de acordo com as zonas mineiras de 0,1 m a 50 m, na área do Cuango, de 0,1m a 60m na área mineira do Lucapa e de 0,1m a 70m no Nzagi.

A formação calonda é o mais recente depósito sedimentário diamantífero e tem um potencial económico significativo na área de Chitotolo. Está geralmente coberto por uma espessa camada de areias do kalahari e afloramentos naturais, ocorre somente nos vales dos rios e está muitas vezes escondida nos depósitos de colina recentes.

Falando da Estratigrafia e petrografia da formação Calonda é de salientar que a formação Calonda está constituída por conglomerado mal consolidados, arenitos silitos que exibem uma tendência de se tornarem mais finos para cima.

O cimento (camada gresso-argilosa) que normalmente envolve a formação calonda é de variadíssimas cores, produto da presença de óxido de ferro (característica do cimento formado em ambientes áridos ou sub-áridos de óxido de manganês, hidróxido de ferro e alumínio).

2.5. Estratigrafia da área da Lunda Norte

A estratigrafia da área das lunda estás compreendido por:

a) **Rochas de complexo base:** Conforme pode ser observada na tabela 2.1.

- ✓ Sistema de Kibaras;
- ✓ Grupo Luana;
- ✓ Sistema karroo;
- ✓ Formação Calonda;
- ✓ Sistema kalahari.

Tabela 2.1: Sequência estratigráfica no Nordeste de Angola

Sistema	Subdivisão	Era/ período	Idade aproximada
Formações superficiais			2Ma
Sistema kalahari	Kalahari superior Kalahari inferior	Plitocenico inferior a recente	55 Ma
Formação calonda		Eoceno plioceno inferior	100Ma
Intercalação continental		Cretácico médio a superior	163Ma
Sistema Karroo	Série Lundas Série Cassange Série Lutoe	Jurássico superior Cretácico inferior	320Ma
Grupo Luana		Jurássico Carbonífero superior	+1000 Ma
Sistema kibaras	Série superior Serie inferior	Paleozóico inferior	+2500Ma
Complexo de base	Série superior Serie inferior	Pre- Câmbrico indiferenciado	+4000Ma

b) Depósitos recentes: São depósitos do quaternário formado por vários períodos de formação terraços e redistribuição de antigas areias e cascalho. Alguns destes depósitos sofreram subsequentes processos de lateritização.

Os depósitos de diamantes do nordeste de Angola estão representados em dois grupos: O primeiro grupo inclui os depósitos relacionados com a rede hidrográfica antiga (depósitos de terraços e vertentes), representado pelos conglomerados basais da Formação Calonda e de couraças lateríticas.

As couraças lateríticas para além de indicarem a existência de fases de clima húmido alternado com outros climas secos, ocorrem nas zonas de transição dos para as colinas.

O segundo grupo que inclui os depósitos relacionados com a rede hidrográfica actual de forma imediata e directa (depósitos de vale, margens de rios Lezírias, ilhas e do fundo dos rios) representado pelo diverso material detrítico erodido pelos vários agentes geológicos, cujo cascalho é normalmente designado por channel sandy gravel ou simplesmente cascalho do rio. O minério em questão (de chitotolo) provém de um depósito secundário ou aluvionar.

CAPÍTULO III

PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE A **SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO**

3. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE A SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO

A grande maioria dos processos de concentração gravítica emprega água ou ar como meio de separação. Tendo em vista que todos os materiais de interesse são mais densos que o ar, e a maior parte deles mais densos que a água, para efetuar a separação de materiais de diferentes densidades, torna-se necessário controlar a velocidade de escoamento do fluido que está sendo utilizado, o que faz com que esses processos sejam intrinsicamente dinâmicos (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

A separação em meio denso é um processo de separação gravítica aplicado na separação de minerais, onde o meio denso pode ser constituído de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos ou, ainda, de uma suspensão estável de densidade predeterminada (HEAVY – MEDIA SEPARATION, 1943).

Assim, a separação em meio denso oferece uma alternativa mais direta e precisa, pois ela usa, como meio de separação, um fluido com densidade intermediária às dos constituintes que se deseja separar. Neste caso, para que aconteça a separação, vai depender apenas das partículas desses constituintes serem mais leves ou mais densas que o meio utilizado.

A suspensão, no caso da separação em meio denso, é um sistema heterogêneo constituído de um sólido insolúvel disperso em água, que se comporta com as características de um líquido. As suspensões são mais usadas em processos industriais, onde os sólidos insolúveis mais utilizados são finos de magnetita ou de ferro silício.

O meio denso a ser utilizado na separação de minerais deve apresentar uma densidade intermediária entre as das espécies minerais a serem separadas, de maneira que os minerais com densidade inferior flutuem, e aqueles com densidade superior afundem. O processo de separação em meio denso é mais aplicado para partículas grossas, acima de 28 malhas, isto é 0,6 mm (WILLS, 1988).

A separação em meio denso abrange, de acordo com Wills (1988), principalmente, três campos de aplicação:

- ✓ Estudos de laboratório;
- ✓ Obtenção de concentrados finais;
- ✓ Obtenção de pré-concentrados na indústria.

Para estudos de laboratório são utilizados líquidos densos e/ou soluções de sais inorgânicos e, mais raramente, suspensões para o fracionamento de minerais de densidades diferentes e na caracterização de carvões, com os seguintes objetivos:

- ✓ Estudo do grau de liberação dos minerais a serem separados;
- ✓ Investigar a viabilidade técnica de utilização de métodos de separação gravítica em desenvolvimento de processos;
- ✓ Controle de ensaios de concentração gravítica;
- ✓ Levantamento de curvas de partição, envolvendo os principais parâmetros para projetos de separação em meio denso;
- ✓ Avaliação qualitativa de produtos de separação gravítica (minerais e carvões);
- ✓ Avaliação de desempenho de equipamentos de separação gravítica (curva de Tromp).

Na obtenção de concentrados finais ou de pré-concentrados na indústria, usam-se normalmente meios densos à base de suspensões de finos de ferro-silício e/ou de magnetita, respectivamente para separações de minerais metálicos ou carvões.

3.1. Histórico da Separação em Meio Denso

Segundo Symonds (1986) as primeiras tentativas de utilização de meio denso datam de 1858, quando Bessemer patenteou a utilização de soluções de cloretos de ferro, bário, manganês ou cálcio, como meios de separação. Nessa época foi implantada uma usina na Alemanha, utilizando o cloreto de cálcio como meio denso, visando à separação de carvões. Devido ao efeito de viscosidade do meio, comprovou-se à impossibilidade de fazer separações para densidade acima de 1,35. Por outro lado, a recuperação do meio mostrou-se, também, proibitiva.

Nesse mesmo período em que se davam essas tentativas para utilização de cloretos como meio denso, engenheiros americanos descobriram que uma suspensão de água e areia, movida por um fluxo ascendente, podia gerar um meio com densidade de até 1,7. Este processo, denominado de Chance Sand, chegou a ser usado em algumas usinas industriais de beneficiamento de carvão. Em 1911, a Du Pont patenteou um processo de separação, utilizando hidrocarbonetos clorados para obter meios densos de maior densidade (BURT, 1984). Com o prosseguimento das pesquisas, em 1917 veio a primeira aplicação comercial, quando foi patenteado o processo Chance. A rigor não se tratava de uma separação em meio denso e sim de um leito de areia hidraulicamente dilatado.

As densidades obtidas, até então, com os meios densos, eram relativamente baixas e só permitiam a separação de materiais de baixa densidade, como o carvão. Como a maioria desses meios densos eram constituídos de cloretos, a sua utilização ficava prejudicada pelos problemas de corrosão e altos custos de sua recuperação. Isto levou os pesquisadores a pensarem em alternativas. Iniciou-se então a substituição desses líquidos por suspensões constituídas de finos de alguns minerais (argilas e barita, gesso e pirita) em água. Em 1932, Vooy's utilizou uma mistura de argila e barita, para lavagem de carvão. A utilização desses minerais resolveu os problemas de corrosão, no entanto permitia a obtenção de suspensões com densidade de no máximo 1,6. Como essas suspensões eram inadequadas para separação de minerais de maior densidade, por exemplo minerais metálicos, foi estudada a possibilidade de utilização da galena como meio denso. A American Zinc Lead and Smelting Company, em Mascot, Tennessee-USA, foi pioneira (1939) ao utilizar a galena como meio denso, na concentração de minerais de chumbo e zinco (HEAVY-MEDIA Separation, 1943).

Em virtude do excesso de finos gerados na moagem da galena e das dificuldades encontradas para a sua recuperação por flotação, foi desenvolvido o uso de finos de magnetita e de ferro-silício na preparação dos meios densos, com a vantagem de serem facilmente recuperados por separação magnética.

Houve uma tentativa no sentido de reintroduzir a utilização de líquidos densos, porém de maior densidade, do tipo tetrabromoetano ($d = 2,96$). No entanto, a sua toxidez e alto custo inviabilizaram a utilização em escala comercial.

Comprovado que as suspensões à base de ferro-silício ou magnetita moídos eram as mais eficazes na separação em meio denso, as investigações que se seguiram, se ativeram ao desenvolvimento de equipamentos, com apropriação de forças mais elevadas que a gravitacional. Com esse fim, foram desenvolvidos os separadores de meio denso centrífugos, tais como o ciclone de meio denso, Dynawhirpool, Tri-Flo etc.

3.2. Princípio da Separação em Meio Denso

O processo de separação em meio denso consiste em separar partículas em função de suas densidades, usando como meio de separação, um fluido de densidade intermediária, que é a densidade de separação (ds). Assim, na separação de minerais ou carvões, aquelas partículas de densidade inferior à densidade de separação, flutuam, e vão constituir o produto chamado **flutuado**; as de densidade superior à densidade de separação (ds), afundam, e vão constituir o produto chamado **afundado**, (AQUINO, J. A., 1981), conforme ilustrado na figura abaixo.

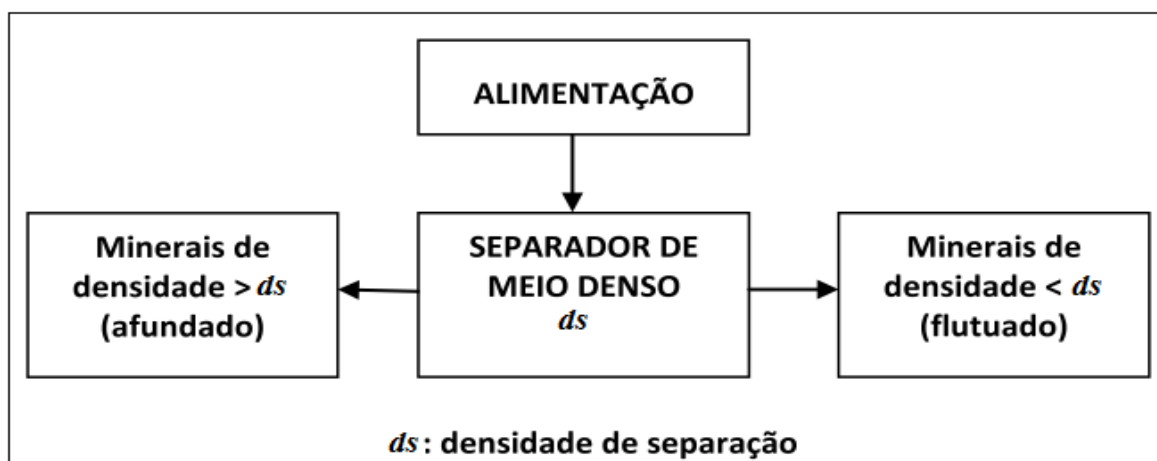


Figura 3.1: Princípio da Separação em Meio Denso. Fonte: Luz, Sampaio e França (1981)

Os processos de separação em meio denso podem ser classificados, de acordo com a força externa dominante, em estático e dinâmico. Enquanto no primeiro, a força dominante é a gravitacional, no segundo a força centrífuga predomina na separação. Exemplos de processos estático e dinâmico são as separações realizadas em tambor de meio denso e ciclone de meio denso, respectivamente.

3.2.1. Processo Estático

A separação por processo estático é feita em suspensões onde atuam somente forças gravitacionais, o que não implica que os equipamentos usados não possuam partes móveis, o necessário para prover a estabilidade do meio denso.

Teoricamente, qualquer tamanho de partícula pode ser tratada por meio denso. Na prática da separação estática industrial, as partículas a serem separadas devem ter tamanhos acima de 3 mm, sendo que o mais comum é 6 mm. O limite superior de tamanho, na prática, é de 150 mm, podendo ser ainda maior no caso de alguns carvões. Este limite máximo é determinado,

normalmente, em função dos equipamentos de separação e tamanhos dos mesmos, a serem usados no projeto, bem como das facilidades de manuseio de material na usina.

Em meio "estático", a separação dos minerais baseia-se na equação, a seguir:

$$F_g = M_p \cdot g - M_f \cdot g = (M_p - M_f) \cdot g \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

F_g = Força gravitacional; M_f = Massa do fluido deslocado;

M_p = Massa da partícula; g = aceleração da gravidade.

A força gravitacional (F_g) poderá ser positiva ou negativa. Esta será positiva quando o peso da partícula ($M_p \cdot g$) for maior que o peso do fluido ($M_f \cdot g$) deslocado pela própria partícula, ou seja, a força do empuxo. Neste caso, a partícula afundará. Quando a força gravitacional for negativa, ou seja, o peso da partícula ($M_p \cdot g$) for menor que o peso do fluido deslocado ($M_f \cdot g$), a partícula flutuará.

O processo de separação em meio estático é mais aplicado quando os minerais a separar se apresentam em granulometrias grossas, pois, como se sabe, a eficiência de separação decresce com a diminuição de tamanho das partículas, devido à baixa velocidade de sedimentação destas.

3.2.2. Processo Dinâmico

A separação por processo dinâmico é caracterizada pelo uso de separadores que empregam forças centrífugas, cerca de 20 vezes, ou mais, que a força da gravidade atuante na separação por processo estático. Exemplos são o ciclone de meio denso e o “dynawhirpool, que são separadores que utilizam a força centrífuga na separação dos materiais. Na separação dinâmica, o tamanho máximo da partícula varia de 12 a 50 mm e o mínimo de 1,0 a 0,5 mm. Excepcionalmente, pode ser tratado material abaixo de 0,5 mm. Estes tamanhos são condicionados pelas eficiências de separação dos próprios equipamentos.

Em meio dinâmico (p. ex. ciclone de meio denso), a aceleração da gravidade é substituída pela aceleração centrífuga. Portanto, tem-se a seguinte equação para a separação dinâmica:

$$F_C = (M_p - M_f) \cdot \frac{v^2}{r} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

F_C = Força centrífuga; M_f = Massa do fluido deslocado;

M_p = Massa da partícula; r = Raio do ciclone.

V = velocidade tangencial de entrada da alimentação;

A grande superioridade de V^2 em relação à " g ", ou seja, da força centrífuga em relação à gravitacional, permite maior capacidade de separação aos separadores dinâmicos, quais sejam ciclones de meio denso, *dynawhirpool* e outros, bem como a separação de partículas a uma granulometria mais fina.

3.3. Tipos de Meio Denso

Um dos componentes essenciais no processo de separação em meio denso é o próprio meio. A escolha correcta do meio e o controlo efectivo, ambos em termos de consistência e parâmetros físicos, são essenciais para operação eficiente do sistema.

Segundo AQUINO (1981), na separação de minerais, podem ser utilizados os seguintes tipos de meio denso:

3.3.1. Líquidos Orgânicos

Atualmente, os líquidos orgânicos são utilizados apenas em laboratório, na caracterização tecnológica de matérias-primas minerais ou carbonosas e outros materiais. Os líquidos densos mais utilizados nas pesquisas de laboratório são bromofórmio, iodeto de metileno e solução de clorici, e os diluentes mais utilizados são tetracloreto de carbono, xilol, nafta e percloroetileno. Em relação às suspensões de sólidos, os líquidos orgânicos apresentam as seguintes vantagens: baixa viscosidade, alta estabilidade e baixa ação corrosiva.

3.3.2. Soluções Aquosas de Sais Inorgânicos

Soluções de cloreto de cálcio (CaCl_2) com densidade 1,4 foram as primeiras soluções de sais inorgânicos a serem utilizadas na separação industrial de carvões, por meio dos processos Lessing e Bertrand. Apesar desses processos terem permitido a obtenção de produtos adequados ao mercado, os custos de operação inviabilizaram o seu uso. Soluções de cloreto de zinco (ZnCl_2) com densidade de até 1,8, são usadas até hoje, para estudos de lavabilidade de carvões, em laboratório.

3.3.3. Suspensões de Sólidos em Água

São suspensões aquosas de sólidos finamente moídos. Para a obtenção de uma suspensão ideal é necessário que o sólido a ser utilizado apresente as seguintes características:

- ✓ **Dureza elevada** - para evitar a degradação das partículas, que geram finos durante a operação e consequentemente aumentam a viscosidade da polpa;
- ✓ **Estabilidade química**: Apresentar resistência à corrosão e não reagir com os minerais em estudo;
- ✓ **Densidade elevada**: Para atingir a densidade de separação dos minerais, tendo o meio denso viscosidade aceitável do ponto de vista operacional;
- ✓ **Recuperação fácil**: O material utilizado na suspensão água/sólido deve apresentar propriedades que permitam a recuperação do sólido e sua reutilização;
- ✓ **Estabilidade de suspensão**: O material sólido deve formar uma polpa estável;
- ✓ **Granulometria**: O material sólido deve apresentar uma distribuição granulométrica, de maneira a não elevar a viscosidade do meio em níveis impraticáveis, do ponto de vista operacional. A utilização de material (sólido) muito fino contribui para aumentar a viscosidade, além de dificultar a sua recuperação;
- ✓ **Grãos arredondados**: É aconselhável a utilização de materiais com grãos arredondados, visto que os grãos angulosos diminuem a fluidez do meio e se degradam com mais facilidade.

Os materiais ferro-silício e a magnetita atendem, praticamente, a todas essas características, notadamente a facilidade de recuperação dos mesmos, devido às suas propriedades magnéticas. Por isto, o ferro-silício e a magnetita são os materiais mais usados na formação das suspensões.

Na preparação das suspensões podem ser usados os minerais barita, argilas, quartzo moído, magnetita moída, e ainda ferro-silício (moído ou atomizado) e chumbo atomizado.

Existem quatro classes de suspensão cobrindo intervalos de densidades da suspensão, relacionadas com os minerais de interesse a separar:

- a) Densidades de 1,3 a 1,9, restritas praticamente ao beneficiamento de carvão;
- b) Densidades de 2,7 a 2,9 muito comum na pré-concentração de minerais metálicos;
- c) Densidades de 2,9 a 3,6, utilizadas para minérios especiais e mais particularmente na recuperação de diamantes;
- d) Densidades acima de 3,6, raramente usadas.

Por apresentarem propriedades mais adequadas na preparação de suspensões água/sólido, os materiais mais utilizados são o ferro-silício e a magnetita.

O ferro-silício é uma liga composta principalmente de silício (15%) e ferro (85%), com densidade de 6,9. A sua alta densidade permite a obtenção de polpas com densidade máxima de 3,4, cobrindo portanto um intervalo capaz de separar a maioria dos minerais metálicos de suas gangas. Isto é um fator que faz com que o Fe/Si seja o meio denso mais utilizado, industrialmente, para minerais metálicos e outros minerais especiais. Com dificuldade, pode-se atingir até a densidade 3,6, que é a máxima atingível com os materiais citados, mas raramente é utilizada. O teor de silício na liga não deve ser inferior a 15% e nem superior a 22%.

A magnetita, com densidade de 5,0 a 5,2 permite, na prática, a obtenção de uma polpa com densidade máxima de 1,9. Desta forma, só é possível a utilização da magnetita para a separação de minerais de baixa densidade: grafita, gipsita e principalmente carvões minerais.

As Características do Ferro – Silício Utilizado nas Suspensões são:

- a) **Ferro-silício atomizado:** É obtido mediante a atomização com vapor do material fundido, seguido de resfriamento brusco em água, resultando na obtenção de partículas arredondadas.

Tabela 3.1: Características granulométricas do ferro-silício atomizado. Fonte: [7]

Classe granulométrica (mm)	Tipo e %Peso Acumulada			
	Grossoiro	Fino	Ciclone 60	Ciclone 40
+ 0,210	3	1	-	-
+ 0,149	11	8	0	-
+0,105	28	18	2	0
+0,074	40	33	7	10
+0,044	62	55	27	2
- 0,044	38	45	73	90
-0,037	-	-	65	85

- b) **Ferro-silício moído:** é obtido por meio de britagem e moagem. A liga fundida a 1600 °C é recolhida numa base arenosa deixada esfriar e depois é partida em pedaços, que são triturados e moído até dimensão requerida. A densidade limite para o ferro-silício moído é de 3.3 kg/l.

Na Tabela abaixo (tabela 4) estão apresentadas as características granulométricas de seis diferentes tipos de ferro-silício moído.

Tabela 3.2: Distribuição granulométrica de seis diferentes tipos de Fe/Si moído. Fonte: [7]

Classe Granulométrica (mm)	%Peso					N(*)
	48D	65D	100D	150D	270D	
+ 0,210	5	0,5	0	0	0	0
+ 0,149	15	3,0	0,2	0	0	0 - 0,5
+0,105	30	8,0	1,2	0,5	0	0 - 5
+0,074	50	20,0	5,0	2,0	0,2	5 -10
+0,044	75	55	35	25	10	20 -30
- 0,044	25	45	65	75	90	70

3.3.4. Fluido paramagnético

O fluido paramagnético é uma suspensão coloidal, à base de água, não tóxico, contendo partículas de ferrita micronizada abaixo de 100 Å e dispersas com lignosulfonato. Esse fluido funciona com uma densidade variável na presença de um campo magnético. A densidade do fluido magnético pode ser controlada, variando-se a intensidade do campo, a velocidade de rotação do tubo rotativo ou a concentração do fluido.

Em suma as principais características de um meio denso ideal são: formar suspensão ou solução estável, não ser corrosivo, possuir baixa viscosidade, não ser tóxico, ser passível de recuperação, ter fácil ajuste de densidade e ter baixo custo.

3.4. Principais equipamentos de Separação em Meio Denso usado nas Indústrias

Os equipamentos de separação em meio denso, tanto os de separação estática como os de separação dinâmica, são muito usados na indústria carbonífera e, em alguns casos, em usinas de tratamento de minérios (BURT, 1984). Neste último caso, a separação em meio denso é usada mais como etapa de pré - concentração.

Os equipamentos de separação "estática" possuem, normalmente, recipientes de diversas formas, dentro dos quais são introduzidos a alimentação e o meio denso. O produto flutuado é removido simplesmente por transbordo ou com a ajuda de pás.

A remoção do produto afundado já é um pouco mais difícil e exige criatividade no projeto do separador. Um dos cuidados que se deve ter na remoção do produto afundado é evitar que haja grande carregamento do meio denso, ocasionando assim distúrbios provocados por correntes descendentes dentro do recipiente de separação. A remoção do produto afundado pode ser feita por meios pneumáticos, bombeamento, elevadores de caçambas de chapas perfuradas, sistemas de arraste, etc.

Os separadores estáticos trabalham com maior volume de meio denso que os dinâmicos, propiciando, assim, um tempo de residência na separação, consideravelmente maior nos primeiros. Em muitos separadores, todo o meio denso é alimentado perto do topo do tanque, ou no topo da suspensão; em alguns, parte do meio denso é alimentado no fundo do tanque para permitir correntes ascendentes; há ainda casos em que o meio denso é alimentado em vários níveis, para formar correntes horizontais, ou para manter a homogeneidade deste em todo o tanque.

Serão descritos, a seguir, alguns dos principais equipamentos de "separação estática" e dinâmica mais empregados na indústria mineral e carbonífera.

3.4.1. Equipamentos Industriais de Separação Estática

a) Separador de Cone, Wemco

É um tipo de separador de cone que consiste, essencialmente, de um tanque cônico, de até 6 m de diâmetro, podendo tratar partícula de até 10 cm de diâmetro com capacidade de até 500 t/h. Neste tipo de separador existe um mecanismo interno de agitação lenta, o bastante para manter o meio em suspensão uniforme e auxiliar o movimento do produto flutuado em direção à periferia do separador, onde é descarregado por transbordo, com uma certa porção do meio, que é recuperado no circuito. O produto afundado é removido do cone por meio de bomba ou de fluxo ascendente externo ou interno com ar comprimido (air lift). Em ambos, parte do meio denso que sai com o afundado é drenado, e volta diretamente para dentro do cone. (WILLS, 1988).

b) Separadores de Tambor Wemco

Os separadores de tambor convencionais são usados amplamente no beneficiamento de minérios metálicos e não metálicos, com granulometria de alimentação variando de 5 a 300 mm.

Consistem de um tambor cilíndrico rotativo, provido de elevadores (ressaltos) que são fixados na parede interna do tambor e que se destinam a remover, continuamente do circuito, o produto afundado durante a separação. O produto flutuado sai por transbordo em um vertedouro localizado na extremidade oposta à alimentação. Esses separadores são construídos de vários tamanhos, até 4,3 m de diâmetro por 6 m de comprimento, com capacidade máxima de 450 t/h.

c) Separador Teska

Consiste de um tambor com caçambas internas de chapas perfuradas, para transporte do material afundado e drenagem do meio denso. O tambor gira lentamente dentro de um tanque aberto que contém o meio denso. O produto flutuado é descarregado na extremidade oposta à da alimentação, por transbordo ou por auxílio de pás, em uma calha. Esse produto é descarregado em peneiras primárias para a drenagem do meio denso, que retorna diretamente ao tanque do separador. O produto afundado no tanque do meio denso é elevado pelas caçambas do tambor e descarregado em uma outra calha (BURT, 1984).

d) Separador Drewboy

Este separador pode ser considerado como uma modificação do Separador Teska, onde o tambor, com características diferentes, opera na posição inclinada, e não na vertical. No separador Drewboy, a alimentação entra em uma das extremidades do tanque e os produtos leves (flutuados) são descarregados na extremidade oposta; enquanto os produtos pesados (afundados) são removidos do fundo do tanque por uma roda, constituída de compartimentos radiais, montada em um eixo inclinado. Este eixo é suportado por mancais localizados fora do compartimento do meio denso. A alimentação do meio denso pode ser feita pelo fundo do tanque ou por cima, próxima da alimentação do minério ou carvão. A proporção do meio denso que entra por esses dois pontos é controlada por válvulas (D.G. Osborne, 1988).

3.4.2. Equipamentos Industriais de Separação Dinâmica

a) Ciclone de Meio Denso

Constituído de uma parte cilíndrica e outra cônica, esses equipamentos são fabricados com diâmetros de 350 a 750 mm, e sua capacidade de processamento varia de 50 a 200 t/h, podendo alcançar até 800 t/h com a utilização de módulos múltiplos. Operam com pressões de 6,0 a 20,0 lb/pol², sendo a faixa mais adequada entre 14 e 15 lb/pol².

A alta força centrífuga envolvida, possibilita a separação, com sucesso, de partículas a granulometrias mais finas do que por outros métodos gravíticos (WILLS, 1988.).

A alimentação dos ciclones de meio denso não deve conter partículas abaixo de 0,5 mm, para evitar a contaminação do meio denso, com esta fração fina, minimizando, assim, as perdas do meio denso no processo. A atuação de forças de cisalhamento dentro dos ciclones permite a utilização de partículas mais finas de ferro-silício ou magnetita na constituição do meio denso, o que é essencial para a estabilidade da suspensão durante o processo de separação. A alimentação e o meio denso são introduzidos, tangencialmente e sob pressão no ciclone, o qual idealmente é instalado em posição inclinada, possibilitando que a alimentação seja feita por gravidade, de uma determinada altura manométrica (BURT, 1984).

Os produtos pesados movem-se ao longo da parede do ciclone e são descarregados no ápex, underflow, enquanto que os leves, overflow, se descarregam no vortex finder. O meio denso forma um gradiente de densidade dentro do ciclone, que aumenta no sentido do centro para a parede interna do ciclone.

A dinâmica do ciclone de meio denso é complexa e diversas variáveis afetam a separação, tais como:

- ✓ Pressão de alimentação;
- ✓ Densidade da polpa de meio denso;
- ✓ Granulometria do meio denso;
- ✓ Constituição do minério, isto é, forma das partículas, distribuição;
- ✓ Granulométrica e composição das partículas leves e pesadas etc.;
- ✓ Ângulo da seção cônica do ciclone.

Todas essas variáveis afetam o desempenho da separação, todavia a granulometria, a densidade do meio denso e o ângulo do ciclone, possuem um efeito marcante. Diante do exposto, pode-se dizer que, para aplicação do ciclone de meio denso, é necessário um estudo detalhado com todas as variáveis citadas para cada minério, em escala piloto.

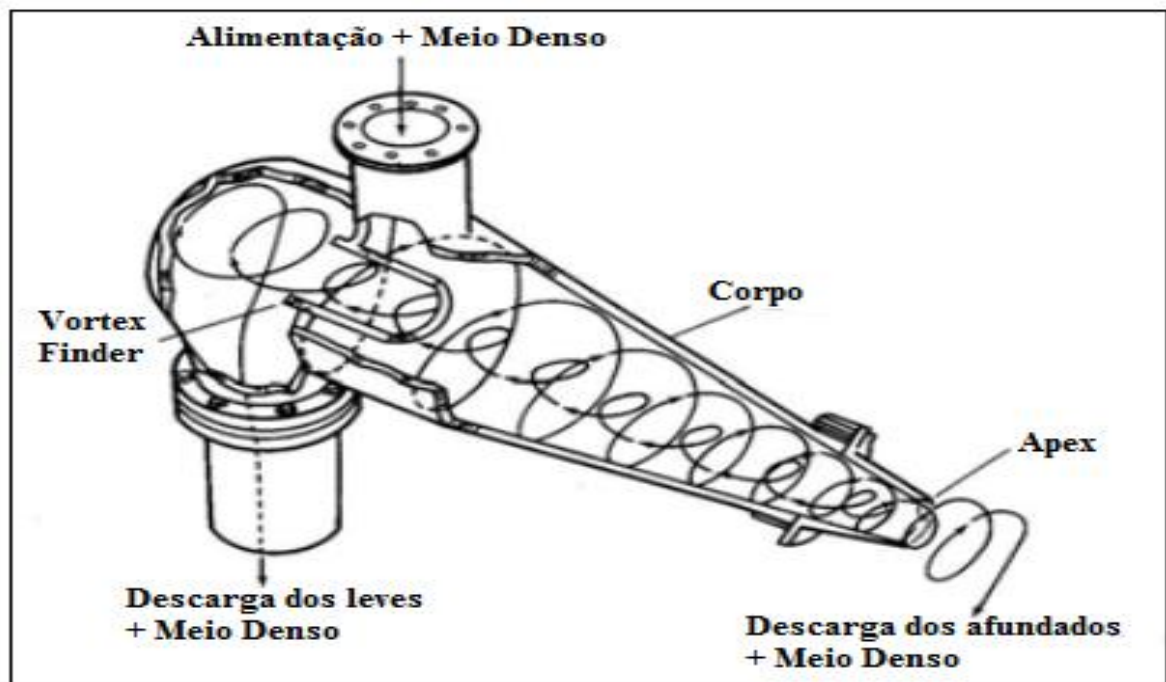


Figura 3.2: Ciclone de Meio Denso. Fonte: D.G. Osborne (1988)

b) Separador Dynawhirlpool (DWP)

O DWP consiste de um cilindro de comprimento e diâmetro definidos, com aberturas nas extremidades sob forma de tubos, por onde são feitas a alimentação do minério e a descarga do flutuado. Existem ainda dois tubos laterais localizados nas partes inferior e superior do cilindro, que permitem a entrada tangencial do meio denso e a descarga do afundado, respectivamente. A maior parte do meio denso (aproximadamente 90%) é alimentada, por bombeamento, na parte lateral e inferior do cilindro; o restante entra junto com a alimentação, para auxiliar a entrada da mesma no equipamento. Esse cilindro opera inclinado, em relação a horizontal, de 25° para minérios e 15° para carvão. No Brasil, esse equipamento é utilizado no beneficiamento de minérios de diamante, bauxita refratária, fluorita, entre outros.

A capacidade do DWP é de até 100 t/h. Este equipamento apresenta algumas vantagens sobre outros tipos de separadores centrífugos de meio denso.

Além de propiciar uma menor degradação dos produtos da separação, menor desgaste operacional do equipamento, e ter bom desempenho de separação, apresenta custos operacionais mais baixos, em razão de somente o meio denso ser alimentado por bombeamento (WILLS, 1988).

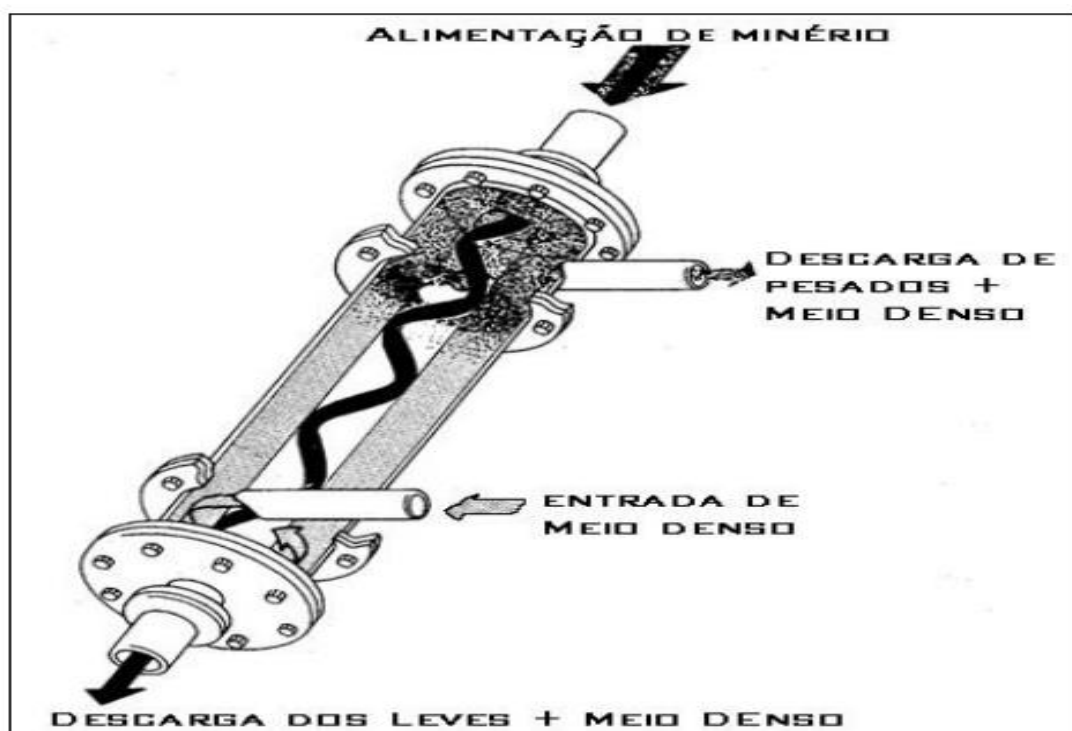


Figura 3.3: Separador Dynawhirpool (DWP). Fonte: WILLS (1988)

c) Separador Tri-Flo

Este separador consiste em dois DWPs acoplados (**Dynawhirpool**), e é utilizado nas operações de beneficiamento de carvão, minerais metálicos e não metálicos. A entrada de meio denso e a saída da fração pesada são em forma de voluta. Esta forma de entrada de alimentação produz menos turbulência do que a tangencial usada no DWP. Este separador opera em dois estágios. O produto flutuado que sai do primeiro estágio é retratado no segundo, com a mesma densidade do meio ou em densidade diferente (WILLS, 1988).

Por ser um separador de dois estágios, a separação resulta em três produtos, podendo ser usada para obtenção de concentrado (produto valioso), misto e rejeito. O misto obtido, dependendo da situação, pode ser cominuído, deslamado e retornar ao mesmo circuito, ou ser tratado em um circuito separado. No caso de tratamento de minerais metálicos, o segundo estágio de separação funciona como estágio scavenger, aumentando assim a recuperação global no circuito. Esses dois estágios de separação aumentam a eficiência da operação. Esses separadores são normalmente fabricados em quatro tamanhos, variando de 250 a 500 mm de diâmetro, com capacidade de 15 a 90 t/h, respectivamente.

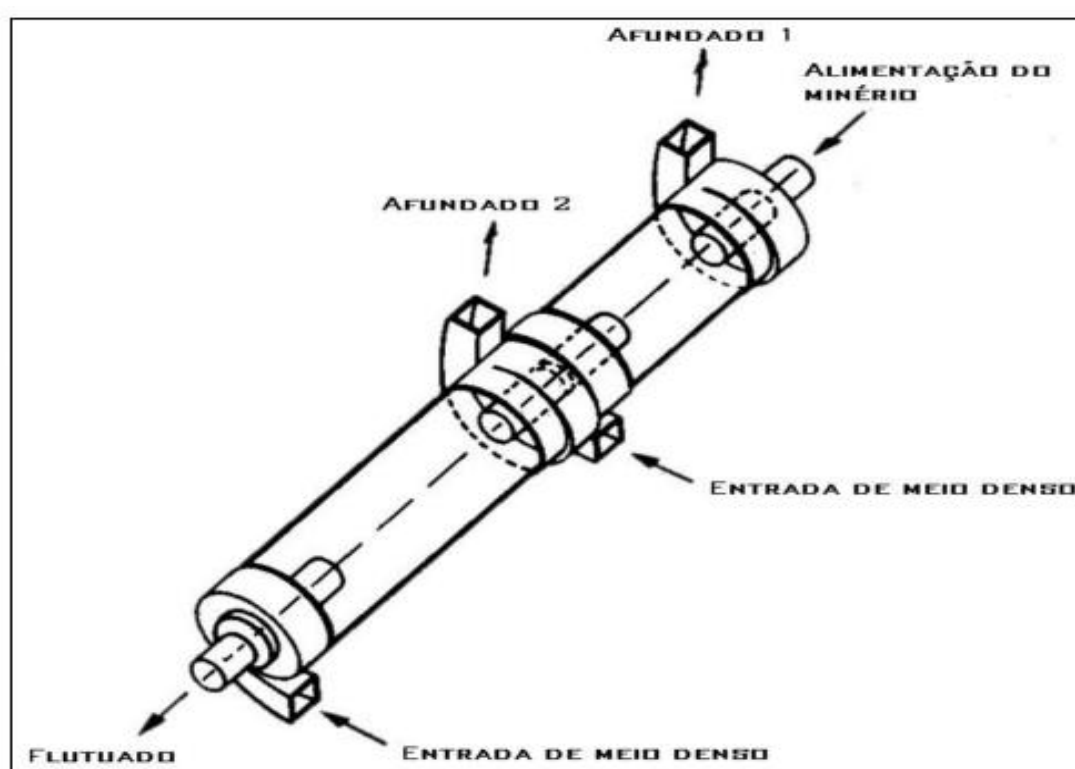


Figura 3.4: Separador Tri-Flo. Fonte: WILLS (1988)

Os separadores dinâmicos, com um dimensionamento adequado dos orifícios de entrada da alimentação e saída dos produtos, podem tratar alimentações com uma proporção variável de leves para pesados.

Os fatores que influenciam na seleção do tipo de equipamento são: capital disponível, espaço requerido para a instalação, tamanho máximo da partícula a ser tratada, capacidade de alimentação, densidade de separação. A alimentação deve ser molhada antes da entrada no separador, para uma melhor eficiência de separação.

3.5. Aplicações da Separação em Meio Denso

O uso da separação em meio denso no setor mineral foi desenvolvido há mais de cinco décadas, iniciando com o beneficiamento de carvões minerais, e encontrou aí um amplo campo de aplicação com o desenvolvimento de muitos tipos de equipamentos. Nas últimas décadas, a separação em meio denso tem sido também aplicada no beneficiamento de minerais metálicos, principalmente na fase de pré-concentração onde se descarta uma boa parte da ganga, antes mesmo que seja alcançada a liberação total das partículas valiosas do minério.

Os processos de separação em meio denso oferecem algumas vantagens sobre outros processos gravíticos. Neles há possibilidade de realizar separações precisas em uma determinada densidade, com elevada eficiência de separação, mesmo na presença de uma boa quantidade de minerais de densidades próximas à do meio. A densidade de separação pode ser rigorosamente controlada dentro de uma faixa em torno de 5 kg/l, e a densidade de separação pode ser variada com relativa rapidez, durante a operação, caso seja necessário. O processo é, contudo, um pouco mais dispendioso, principalmente devido aos equipamentos adicionais necessários à limpeza e recuperação do meio denso e sua recirculação no circuito. Porém estes custos são atenuados ou até compensados por outras vantagens econômicas no processo, como, por exemplo, a sua alta capacidade de processamento e a possibilidade de automação do circuito, diminuindo assim os custos operacionais.

O processo de separação em "meio estático" é aplicado quando os minerais a separar se apresentam a granulometrias grossas, pois como se sabe, a eficiência de separação decresce com a diminuição de tamanho das partículas, devido a uma baixa velocidade de sedimentação destas.

3.6. Controle e Avaliação das Operações de Separação em Meio Denso

Para um bom desempenho das operações de separação em meio denso são necessários, principalmente: uma boa preparação da alimentação; vazão de alimentação adequada ao equipamento; controle da densidade de corte; controle granulométrico do material usado no meio denso (ferrosilício ou magnetita, os mais usados); controle da pressão de entrada da alimentação (caso, por exemplo, dos ciclones de meio denso); controle da pressão de entrada do meio denso e pressão de saída dos pesados (caso da separação em DWP).

Existem diversos métodos para avaliar o desempenho das operações de separação em meio denso na indústria, principalmente no caso do beneficiamento de carvões. Estes métodos estão distribuídos nos chamados critérios dependentes e critérios independentes.

3.6.1. Critérios Dependentes

Os critérios dependentes mais usados, são apresentados a seguir:

- a) **Eficiência orgânica:** Existem diversas formas de definir a eficiência de separação de um equipamento ou de uma usina de beneficiamento; uma muito usada na separação de carvões é a eficiência de recuperação ou eficiência orgânica, proposta por Fraser e Yancey.

$$E(\%) = \frac{\text{Recuperação de carvão lavado}}{\text{Recuperação teórica}} \times 100 \text{ (Equação 3)}$$

Aqui, a recuperação teórica é a percentagem de carvão contido na alimentação com o mesmo teor de cinzas do carvão lavado. Este dado pode ser tirado da curva de lavabilidade do carvão em questão.

- b) **Material deslocado total:** define-se como material deslocado total, a quantidade de material de rejeitado presente no concentrado, somado à quantidade de material de concentrado presente no rejeitado, guardando-se as devidas proporções entre concentrado e rejeitado. Essas quantidades são medidas em termos percentuais. Quanto menores as proporções de material deslocado, melhor o desempenho do equipamento. As medidas são feitas com base na densidade de corte do equipamento e em testes densimétricos realizados em laboratório, com os produtos da separação (concentrado e rejeitado).
- c) **Eficiência de separação metalúrgica:** Esta forma de eficiência de separação, muito usada em beneficiamento de minérios, é calculada pela expressão:

$$E(s) = \frac{rv - rg}{rv} \times 100 \text{ (Equação 4)}$$

Onde: $E(s)$ = eficiência da separação;

rv = recuperação metalúrgica do mineral útil; rg = recuperação metalúrgica da ganga.

3.6.2. Critérios Independentes

Os critérios independentes são derivados da curva de partição do equipamento, também conhecida como curva de Tromp. Com a construção dessa curva, pode-se medir a eficiência de separação do equipamento.

Para construir a curva de Tromp, é necessário conhecer a recuperação em massa do produto pesado, obtido na operação industrial e as curvas de lavabilidade do concentrado e do rejeitado. Com base nestes dados, pode-se calcular a alimentação reconstituída ou calculada e os coeficientes de partição, os quais fornecem a percentagem de cada fração densimétrica, ou densidade média, de material que se dirige para os produtos pesados. Colocando os coeficientes de partição, de 0 a 100, no eixo das ordenadas e as densidades médias das faixas densimétricas no eixo das abscissas, pode-se traçar a curva de Tromp.

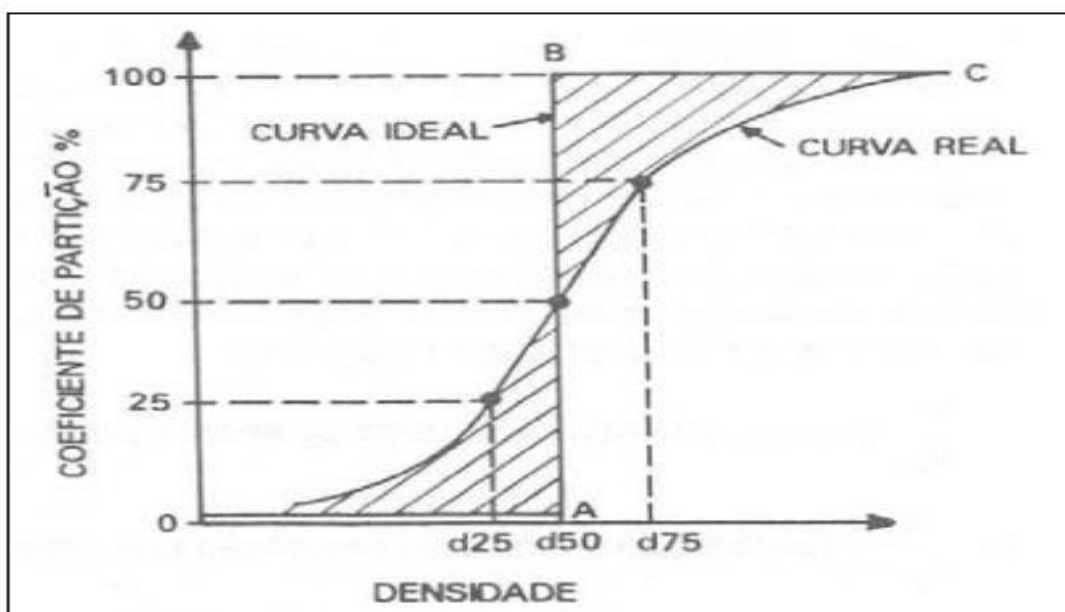


Figura 3.5: Curva típica de Partição. Fonte: Chaves (2001)

A curva OABC representa a curva ideal, onde todas as partículas de densidades menores que a densidade de corte iriam para o flutuado, enquanto as partículas de densidades maiores, iriam para o afundado. Entretanto, na prática isto não acontece, pois partículas de densidades próximas à densidade de corte podem dirigir-se à fração flutuada ou à afundada. Para estes casos, tem-se a curva real, também, construída com base em probabilidades associadas às diferentes classes de partículas, que se dirigirem ao afundado. A área hachurada entre as curvas ideal e real, corresponde a quantidade de material deslocado, também conhecido como “misplaced material”.

A densidade d_{50} , referente ao coeficiente de partição de 50%, é chamada de densidade efetiva de separação ou simplesmente de densidade de partição (d_p). O segmento, na curva real, correspondente aos coeficientes de partição de 25% e 75% é, na grande maioria dos casos, um segmento de reta; quando não o é, se aproxima bastante deste, podendo ser considerado na prática, como tal.

A inclinação desse segmento em relação à vertical, já dá uma idéia da eficiência de separação, ou seja, quanto mais próximo ele estiver da vertical, mais eficiente será a separação. **Esta eficiência de separação** pode ser medida pelo chamado "erro provável de separação" ou "ecart probable" (E_p), que é definido pela metade da diferença entre as densidades correspondentes aos coeficientes de partição de 75% e 25%, ou seja:

$$E_p = \frac{d_{75} - d_{25}}{2} \text{ (Equação 5)}$$

Onde E_p representa o "Erro Provável" da separação.

Para uma separação ideal $E_p = 0$. Portanto, quanto menor E_p , mais a curva se aproxima da vertical, e mais eficiente será o processo de separação. Na prática, E_p usualmente situa-se na faixa de 0,01 - 0,08.

Outro índice que pode ser usado para medir a eficiência de separação de um equipamento, é a chamada imperfeição (I). E_p é mais usado para caracterizar os equipamentos de separação em meio denso, enquanto que "I" é mais usado para caracterização dos equipamentos de separação, cujo meio é a água ou o ar (caso dos jígues, mesas, espirais, ciclones pneumáticos etc.) As relações entre I e E_p são as seguintes:

$$I = \frac{E_p}{d_p} \text{ (Equação 6) para equipamentos de separação em meio denso.}$$

$$I = \frac{E_p}{d_p - 1} \text{ (Equação 7) para equipamentos de separação cujo meio é a água.}$$

Onde "I" representa a "Imperfeição" do Separador)

De acordo com alguns autores, os valores de (I) variam de 0,07 para ciclones de Meio denso a 0,175 para jígues.

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO DO SEPARADOR DE MEIO DENSO

4. AVALIAÇÃO DO SEPARADOR DE MEIO DENSO

4.1. Generalidades sobre o Tratamento do Minério na Mina do Chitotolo

O processo de separação do Diamante na mina do Chitotolo faz-se através de uma sequência de operações nomeadamente: Fase I que inclui as operações de pré-tratamento (desagregação, lavagem e crivagem); Fase II que inclui a separação do Minério em meio denso e a recuperação do meio denso e seguidamente a Fase Final que inclui a recuperação do diamante por Raio X e Selecção manual.



Figura 4.1: Lavaria de Pré-tratamento do Chitotolo

4.1.1. Fase I – Lavaria de Pré-Tratamento

O conglomerado provém da mina por meio dos camiões (Figura 4.2) e é depositado junto á lavaria num local que é denominado de *stockpile*. Com ajuda de uma pá carregadora, o conglomerado é alimentado numa tremonha e depois passa por uma grelha vibrante com duas malhas de 150 mm e 100 mm e, com ajuda de um monitor hidráulico o conglomerado é lavado e desagregado.

As rochas maiores do que a dimensão da malha da grelha são considerados *oversize* e as menores são consideradas *undersize* e passam pelo lavador acoplado a um trommel devido ao seu sentido rotacional. Aqui o material é lavado, desagregado e enviado a um outro trommel com uma malha de 25 mm onde passa por uma separação granulométrica: A classe de - 25 mm é levada ao crivo vibrante de preparação com malha de 1 mm, onde são retirados os finos e as lamas e é depois enviado para o silo, pronto para alimentar o meio denso. O produto com dimensão +25 mm é considerado como *oversize* e é colocado num silo de rejeitados onde depois é carregado por camiões até a escombreira (conforme ilustra o esquema na figura 4.3).



Figura 4.2: Carregamento e transporte do Minério à Lavaria

4.1.2. Fase II – Lavaria de Meio Denso

Depois da fase de pré-tratamento acabar e se ter o produto diamantífero com as dimensões entre (- 25 +1) mm, é colocado numa correia transportadora (no Chitotolo as correias têm uma capacidade de 50t/ h, comprimento 20 m e velocidade 1,59 m/s). Estas correias levam o material até ao crivo de preparação (enxugo). Este crivo tem a função de remover finos e possíveis lamas aderentes. Após a remoção dos finos o produto vai para caixa de mistura (onde é misturado com o meio denso) de onde é enviado para o ciclone com a ajuda da bomba do ciclone do tipo Warman 6/4E (45Kw). O ciclone de 400 mm de diâmetro tem uma capacidade de alimentação de 50 ton/h,

A SMD, cujo Ferro Silício é do tipo ciclone 60 com densidade igual a $2,62 \text{ g/cm}^3$, apresenta um afundado que é o concentrado que provavelmente apresenta diamante, e um flutuado que é o rejeitado que teoricamente não apresenta diamante (Fluxograma simplificado do tratamento do minério, página 37 figura 4.3).

O flutuado é posteriormente descarregado pelos camiões e levado até à escombreira. O afundado que é colocado numa bilha, chamada de caixa, passa por um processo de reconcentração, que consiste em fazer passar o produto pelo mesmo processo de separação com objectivo do seu apuramento. O afundado do apuramento é posto numa bilha e é levado para a Estação de Escolha. O flutuado do apuramento vai para a escombreira.

4.1.3. Recuperação do Meio

Sendo o FeSi caro, há necessidade de evitar a sua perda desnecessária, razão pela qual ele é recuperado. Assim tanto o afundado como o flutuado ao saírem do ciclone, passam por uma zona de drenagem do crivo do ciclone, onde a maior parte do meio que os acompanha passa para o tabuleiro infra-crivo, vai para a panela ou tanque do meio através de um tubo cuja descarga faz-se com certa inclinação sobre a superfície livre do meio denso na panela, activando-lhe os movimentos de circulação e agitação que são necessários á homogeneização do meio denso utilizado.

Porém o afundado e o flutuado ao saírem da zona de drenagem do crivo do ciclone, levam ainda razoável quantidade de FeSi, pelo que a recuperação deste produto se faz submetendo o afundado e o flutuado na parte final do crivo do ciclone, isto é, na zona de lavagem a água sob pressão. O FeSi, os finos e água proveniente da lavagem do concentrado e rejeitado passam para infra- crivo da zona de lavagem de crivo do ciclone seguindo para o separador magnético, que elimina a água e os finos, estabiliza a densidade bem como do meio denso em circulação.

Atendendo a que as maiores perdas de FeSi nos circuitos se verificam nos separadores magnéticos, através da vazão de concentrado e rejeitado do crivo do ciclone, e quando ocorrem obstrução ou deficiências nas bombas de secção de ciclonagem, as válvulas de vazamento dos finos no tabuleiro do separador magnético e a reguladora de pressão da água de lavagem do produto do crivo do ciclone, devem ser reguladas de modo que os finos do separador magnético não tenham uma saída demasiada fraca para não arrastarem o FeSi, especialmente quando este é muito denso.

A pressão da água de lavagem no crivo deve ser suficiente para isentar o FeSi do concentrado e rejeitado à saída da unidade.

Na saída da lavaria de Meio denso é recolhido o concentrado e transportado para a última Fase, onde é feita a separação por Raio X e Seleção Manual, onde é guardada sob condições de máxima segurança.

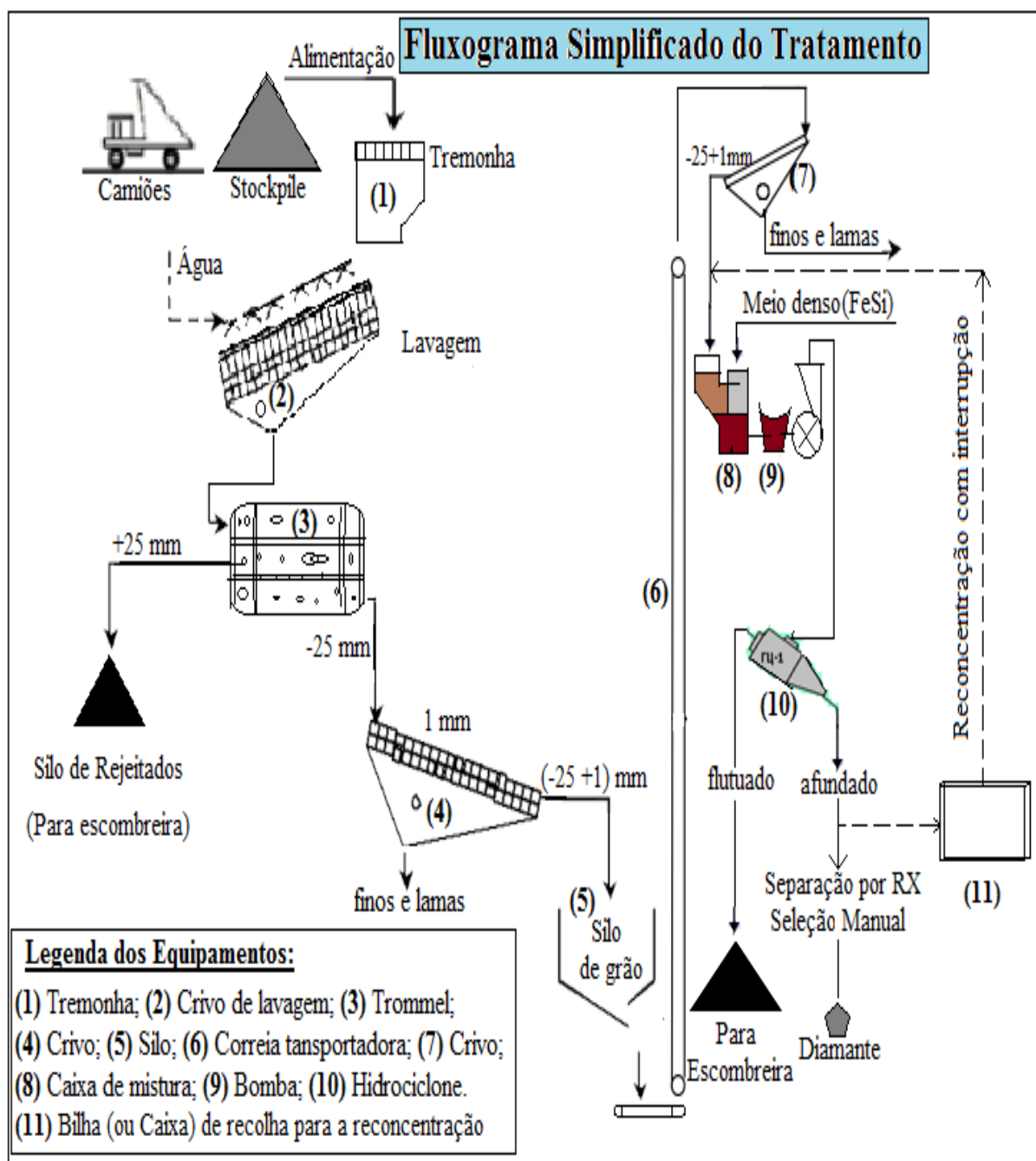


Figura 4.3: Fluxograma simplificado do Tratamento de Minério da Lavaria de Chitotolo

4.2. Critérios da Avaliação do Separador

Conforme já aludido no Capítulo 3, existem diversos métodos para avaliar o desempenho das operações de separação em meio denso na indústria, e estes métodos estão distribuídos nos chamados critérios dependente e critérios independentes. Neste trabalho adoptou-se os Critérios Independentes para se avaliar o desempenho do separador de Meio Denso.

Como factores de escolha está a simplicidade matemática, disponibilidades dos dados bem como o intervalo de aplicação, visto que a Curva de Partição permite-nos ter uma ideia da ineficiência da separação devida ao “separador” ou ao operador do separador, dando então resposta ao objectivo central deste trabalho.

4.2.1. Determinação da Curva Média de Partição

De acordo com Simão e Giovetty (2007) os testes de cristais têm sido usados para se ter uma rápida avaliação duma instalação de meio denso. Este teste consiste no uso de cristais de várias dimensões e densidades, cristais esses que apresentam a mesma gama de densidade do minério. Estes cristais são colocados no circuito durante alguns minutos, pelo menos 20 minutos e depois são recolhidos tanto na descarga do concentrado, como na descarga do rejeitado. Faz-se um balanço do número de cristais por densidade recuperados no concentrado e perdido no rejeitado. Com estes dados pode-se então traçar a curva de tromp e dela obtermos informações como a Densidade de corte (dc) e o Ep (Erro provável).

Segundo os mesmos Simão e Giovetty (2007) a chave para o sucesso quando se decide fazer teste de cristais é a preparação da instalação que consiste numa limpeza em todos os lugares por onde passam os cristais. Outro factor importante tem a ver com o número de cristas por cada densidade que deverá ser alto, pois obteremos resultados mais próximos dos exactos. Aconselha-se pelo menos o uso de 100 cristais para cada densidade.

Assim, com base nas curvas de tromp (Anexo A) que foram obtidas para diferentes valores de densidade do Meio Denso com resultado dos testes de eficiência realizados com cristas, obteve-se os coeficientes de partição para cada densidade de separação, apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Coeficientes de Partição do Sink com base nos testes com cristais

Intervalo de Densidade	%Partição do afundado (<i>Sink</i>) com base nos testes com cristais para diferentes densidades				
	d=2,5	d=2,55	d=2,57	d=2,60	d=2,62
-2,7	0	0	0	0	0
+2,7 -2,8	0	0	0	0	0
+2,8 -2,9	0	0	0	0	0
+2,9 -3,0	0	0	0	0	0
+3,0 -3,1	0	0	4	0	0
+3,1 -3,2	0	0	100	0	0
+3,2 -3,3	35	0	100	16	0
+3,3 -3,4	100	100	100	100	40
+3,4 -3,5	100	100	100	100	84
+3,5	100	100	100	100	100

a) Análise de Regressão

Muitos problemas em engenharia e ciências envolvem explorar as relações entre duas ou mais variáveis. De acordo com Douglas Montgomery e Runger a “Análise de regressão” é uma técnica estatística para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis. Uma equação (ou modelo) de regressão é tipicamente usada na previsão de observações futuras de y ou para uma resposta média em nível particular de x .

Douglas Montgomery e Runger definem que, em geral, quando a variável dependente ou de resposta, y , está relacionada a n variáveis independentes ou regressoras, x , o modelo é chamado de “Regressão linear Múltipla” com n variáveis regressoras.

Tendo em conta os dados da tabela 4.1, partiu-se para uma análise de regressão (com recurso a uma das ferramentas do excel) a fim de se determinar a curva média de partição. Nesta análise, adoptou-se como variável dependente ou de resposta a curva de partição com densidade de separação $d = 2,60$ por esta ser a densidade de separação usada na lavaria da mina do Chitotolo, e as demais curvas de partição foram consideradas como variáveis independentes ou regressoras.

Após recurso à regressão linear múltipla uma das ferramentas do excel (Anexo B) obteve-se os dados da tabela 4.2, como resultado da estimação da curva de partição média.

Tabela 4.2: Dados da estimação da Curva média de Partição

Intervalo densimétrico	Nº de Observações (n)	Variável de resposta (y) e variáveis regressoras (x_i)					Partição Média (Estimação)
		Y	X_1	X_2	X_3	X_4	$\bar{y}$
-2,7	1	0	0	0	0	0	-1,8192E-18
+2,7 -2,8	2	0	0	0	0	0	-1,8192E-18
+2,8 -2,9	3	0	0	0	0	0	-1,8192E-18
+2,9 -3,0	4	0	0	0	0	0	-1,8192E-18
+3,0 -3,1	5	0	0	0	4	0	-1,8192E-18
+3,1 -3,2	6	0	0	0	100	0	-1,8192E-18
+3,2 -3,3	7	16	35	0	100	0	16
+3,3 -3,4	8	100	100	100	100	40	100
+3,4 -3,5	9	100	100	100	100	84	100
+3,5	10	100	100	100	100	100	100

b) Curva Média

Seguidamente partiu-se para a determinação dos parâmetros, também chamados de coeficientes de regressão, bem como a construção do modelo de regressão linear a fim de se poder fazer uma previsão ou se construir um intervalo de observações futuras.

A função da Curva Média de Partição é: $\bar{y} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4$ onde a, b_1, b_2, b_3, b_4 são os coeficientes de regressão, conforme ilustrado na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Coeficientes parciais de regressão linear Múltipla

Parâmetros ou coeficientes de Regressão					Curva média de Partição (Modelo)
a	b_1	b_2	b_3	b_4	$\bar{y}$
-1,819E-18	0,457	0,543	0	8,122E-20	$\bar{y}$ $= -1,82 \cdot 10^{-18} + 0,46x_1$ $+ 0,54x_2 + 0x_3$ $+ 8,12 \cdot 10^{-20}x_4$

Assim tanto o modelo da tabela 4.3 bem como os resultados da estimação da tabela 4.2 nos ajudam construir a curva média.

Esta curva média conforme pode se observar na figura 4.4, coincidiu exactamente com uma das curvas de partição com densidade de $2,60 \text{ g/cm}^3$, demonstrando assim uma aproximação perfeita do modelo em estudo.

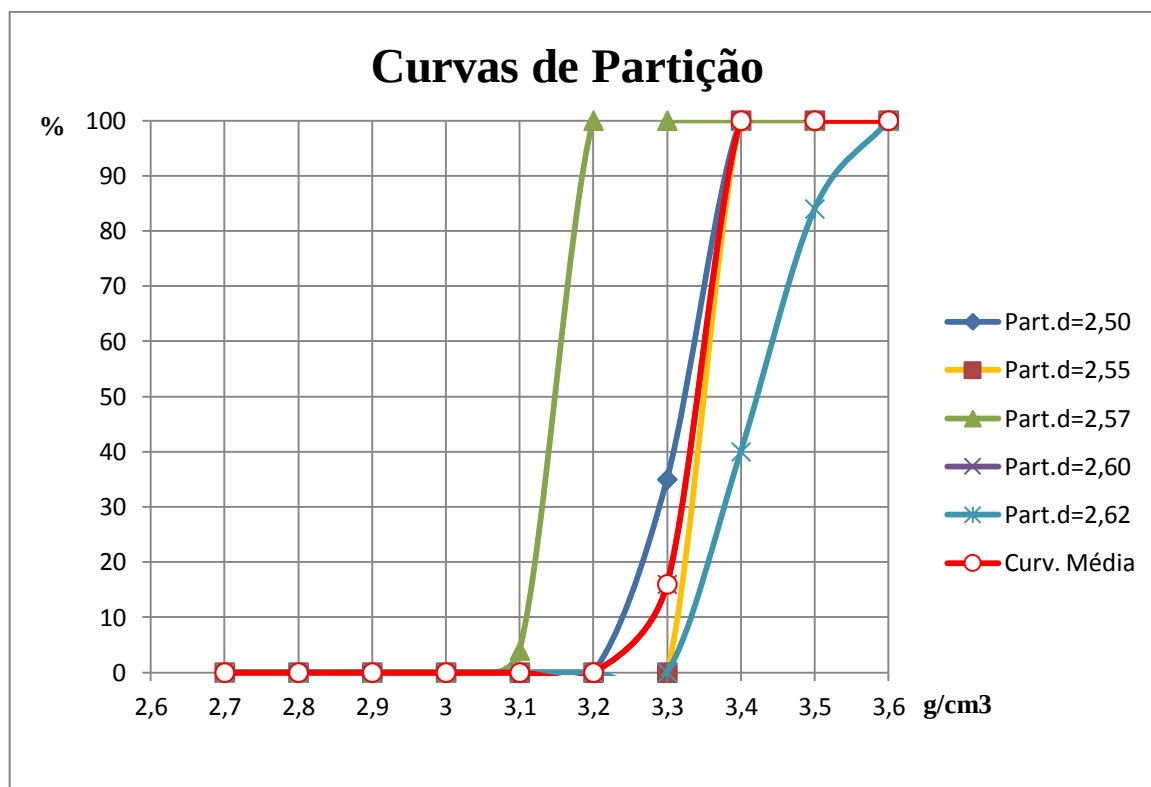


Figura 4.4: Estimação da Curva Média de Partição

c) Estatística dos Resultados

A análise estatística nos ajudará a entender a variabilidade dos resultados da estimação de modo a garantir a fiabilidade destes mesmos resultados. Assim após uma análise completa de regressão obteve os seguintes dados estatísticos resumidos na tabela 4.4, ou os dados gerais em Anexo B.

Tabela 4.4: Principais dados estatísticos da análise de Regressão

Estatística de Regressão					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	Quadrado de R	Erro-padrão
Regressão	4	20270,4	5067,6	1	7,23051E-15
Residual	5	2,61401E-28	5,228E-29		
Total	9	20270,4			

4.2.2. Cálculo da Imperfeição do Separador

Com base na Curva média de partição (figura 4.5), determina-se outras variáveis, tais como, a densidade efectiva de separação (ou densidade de partição “ d_p ”), as partições do 1º Quartil e do 3º Quartil, chamadas de d_{25} e d_{75} respectivamente, cujos valores estão na tabela 4.5.

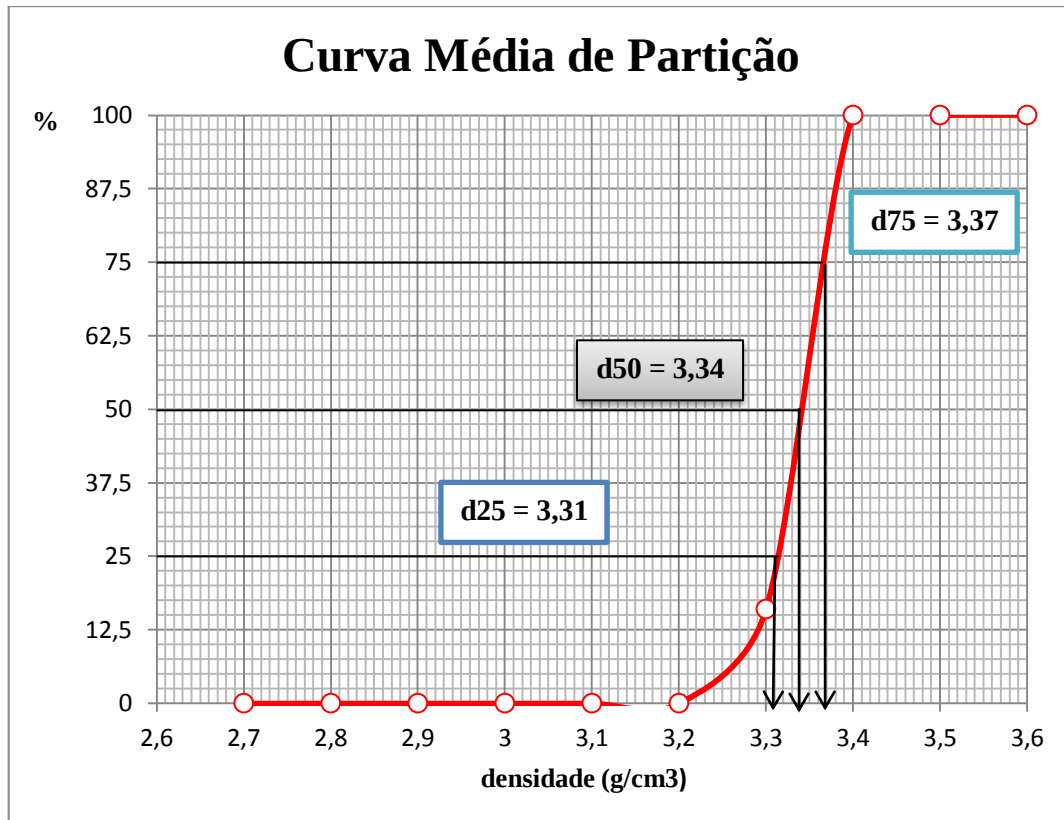


Figura 4.5: Parâmetros da Curva Média de Partição

Tabela 4.5: Principais parâmetros da curva média de partição

Parâmetros ou Variáveis da Curva de Partição		
d_{25}	d_p (d_{50} ou α_{50})	d_{75}
3,31	3,34	3,37

a) Dados

$d_{25} = 3,31$ densidade na qual se obtém 25% de produto afundado;

$d_{50}(\alpha_{50}) = 3,34$ densidade na qual se obtém 50% de afundado, também chamada de d_c (densidade de corte) ou ainda de d_p (densidade de partição), é a densidade efectiva da separação.

$d_{75} = 3,37$ densidade na qual se obtém 75% de produto afundado

b) Fórmulas

$$E_P = \frac{d_{75} - d_{25}}{2} \text{ (representa o “Erro Provável” da separação)}$$

$$I = \frac{E_P}{d_P} \text{ (representa a “Imperfeição” do Separador)}$$

c) Resolução

1º Passo: Calcular o Erro Provável da Separação

$$E_P = \frac{d_{75} - d_{25}}{2} = \frac{3,37 - 3,31}{2} = \frac{0,06}{2} = 0,03$$

2º Passo: Calcular a Imperfeição do Separador

$$I = \frac{E_P}{d_P} = \frac{0,03}{3,34} = 0,00898 \cong 0,01$$

A tabela 9 resume as variáveis determinadas a partir da curva média de partição e os valores do Erro da separação e Imperfeição do separador calculado com base nestas mesmas variáveis.

Tabela 4.6: Resumo dos principais parâmetros da eficiência da separação

Parâmetros				
d_{25}	d_{75}	$d_P (d_{50})$	E_P	I
3,31	3,37	3,34	0,03	0,01

4.2.3. Cálculo da Massa do Sink

De modo a se prever os resultados da recuperação em massa, com base nos teste com cristais e então aferir-se também sobre eficiência da separação da lavaria da Mina do Chitotolo determinou-se também a massa do Sink.

Tabela 4.7: Cálculo da Massa do Sink

Intervalo densimétrico	Massa de Cristais	Coeficiente de Partição (α_s) da Curva Média	(<i>massa de cristais</i> $\times$ α_s)
			Sink
-2,7	100	0	0
+2,7 -2,8	100	0	0
+2,8 -2,9	100	0	0
+2,9 -3,0	100	0	0
+3,0 -3,1	100	0	0
+3,1 -3,2	100	0	0
+3,2 -3,3	100	0,16	16
+3,3 -3,4	100	1	100
+3,4 -3,5	100	1	100
+3,5	100	1	100
Total	1000		316

Com base nos resultados da tabela X, calculou-se a massa do *Sink* dividindo o total da percentagem de *Sink* pelo total da massa de cristais:

$$Sink = \frac{316}{1000} \times 100 = 31,6\%$$

4.3. Discussão dos Resultados

Dos cálculos realizados, com base nos dados obtidos a partir dos testes com cristais, tem-se os seguintes resultados:

4.3.1. Curva Média de Partição

Com base nesta curva obteve-se como densidade de corte ou de partição (d_{50} ou dp) o valor de $3,34 \text{ g/cm}^3$, este valor nos indica, se comparamos com o valor da densidade de separação da lavaria de $2,6 - 2,7 \text{ g/cm}^3$ segundo Simão e Giovetty, que existem partículas com densidade superior à densidade de separação que estão sendo rejeitadas para o flutuado, visto que a separação, isto é, o corte está ocorrendo efectivamente à uma densidade de $3,34 \text{ g/cm}^3$ e não próximo de $2,6 \text{ g/cm}^3$, indicando deste modo algum “Erro provável”. Esta diferença ou alteração no valor da densidade de separação ocorre muitas das vezes devido a outras variáveis, tais como percentagem de sólidos, densidade das partículas, etc.

Analizando os valores de $Ep = 0,03$ e de $I = 0,01$ (Erro provável de separação e Imperfeição) e partindo do princípio de que para uma separação ideal ou perfeita $Ep = 0$, esta separação não é perfeita mas está dentro dos limites de um processo de separação eficiente que ronda usualmente entre 0,01 a 0,08. Já os valores de Imperfeição (I) vão até 0,07 para ciclones, logo tem-se uma imperfeição também dentro dos limites industriais para uma separação eficiente.

4.3.2. Estatística dos Resultados

A estatística dos resultados da análise de regressão para a curva média demonstra que estamos diante de uma estimação boa, ou seja, um modelo adequado, visto que os parâmetros estatísticos como:

Resíduos (desvios): Descreve o erro no ajuste do modelo, para fornecer informações acerca da adequação do modelo ajustado, rondam a volta de zero, isto é, $1,8 \times 10^{-18}$ conforme pode ser observado em Anexo B – Resultado residual.

Variância do erro e Erro-padrão ou Desvio-Padrão: Na tabela 4.4 a variância é representada como a Média quadrática dos resíduos (MQ_R) e da análise de regressão obteve-se como variância o valor de $5,2 \times 10^{-29}$, um valor extremamente pequeno, já o desvio-padrão obteve-se o valor de $7,2 \times 10^{-15}$.

Coeficiente de determinação (R^2): Uma medida largamente usada para um modelo de regressão é a razão de soma dos quadrados. O coeficiente é frequentemente usado para julgar a adequação de um modelo de regressão ($0 \leq R^2 \leq 1$).

Frequentemente, refere-se a R^2 como a quantidade de variabilidade nos dados. Da análise de regressão obteve-se o valor de $R^2 = 1$, isto é 100% da variabilidade dos dados.

4.3.3. Recuperação em massa do Sink

Dos cálculos realizados, com base nos testes com cristais, prevê-se uma recuperação em massa de 31,6% para o sink, o que corresponde à um afundado com aproximadamente 15,8 ton/h e um flutuado (rejeitado) de 34,2 ton/h, tendo em conta que o ciclone funciona com uma capacidade de alimentação de 50 ton/h. É uma boa recuperação mas se para os objectivos da Empresa significar uma baixa na recuperação do sink, isto deve-se a outros factores e não necessariamente factores ligados ao Separador, como por exemplo a possibilidade falhas humanas durante o circuito todo e/ou falhas técnicas que podem estar a ocorrer no Trommel (onde há fortes possibilidades de o diamante aderir ao material argiloso e ser rejeitado, razão pela qual houver a necessidade de reforçar os estágios de lavagem antes de ser enviado para o Trommel) e no Meio Denso (onde as percentagens de Ferro Silício, o espessamento, a viscosidade e a pressão na alimentação podem estar a contribuir para se obter uma recuperação baixa) bem como a falta de outros estágios de concentração do rejeitado (chamado de Reclamação ou *Scavenger* para maximizar a recuperação). Mas tendo em conta que os testes com cristais é um método indicativo estes resultados obtidos a partir dos testes com cristais, são apenas dados indicativos que podem ser contestados a partir de um teste piloto.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

A realização deste trabalho permitiu concluir que:

- a) Com base nas curvas de partições, realizadas a partir dos testes com cristais é possível determinar uma “Curva média de partição” recorrendo à análise de regressão:

$$\bar{y} = -1,82 \cdot 10^{-18} + 0,46x_1 + 0,54x_2 + 0x_3 + 8,12 \cdot 10^{-20}x_4$$

Onde x_1, x_2, x_3 e x_4 são os coeficientes das curvas de partição com densidade de separação de 2,5; 2,55; 2,57 e 2,62 g/cm³ respectivamente.

Da estatística dos resultados da análise de regressão verificou-se que é um modelo adequado visto que muitos dos parâmetros estatísticos tais como os desvios, variância, erro-padrão rondam a volta de zero.

- b) Tendo em conta a Curva média de Partição determinou-se os parâmetros dp , d_{25} e d_{75} e com estes calculou-se os valores do(a):

- ❖ Erro Provável da separação ($Ep = 0,03$): Está dentro dos valores normais de eficiência de 0,01 a 0,08;
- ❖ Imperfeição da separação do Equipamento ($I = 0,01$): Está óptimo, visto que os valores normais de imperfeição vão até 0,07 para equipamentos como o ciclone.

Assim, com base nos resultados dos testes de eficiência feitos com cristais, pode-se concluir que a eficiência do separador de meio denso é alta, ou seja, o separador é eficiente.

- c) A recuperação em massa do Sink previsto, com base nos testes com cristais de 31,6% correspondendo a 15,8 ton/h da capacidade da alimentação, é boa mas se do ponto de vista dos objectivos da Empresa for baixa, isto não se deve necessariamente à factores ligados ao separador, mas sim a outros factores como falhas humanas e/ou falhas técnicas, a falta de estágios de reclamação (tratamento do rejeitado para maximização da recuperação).

Todavia, visto que a eficiência dos separadores depende de uma diversidade de factores ou variáveis, tais como pressão da alimentação, taxa de alimentação, a forma das partículas, variáveis geométricas dos separadores e estes por sua vez afectam o desempenho da separação, é necessário um estudo detalhado de cada variável.

5.2. Recomendações

Assim com base no exposto acima, e levando em conta também os estudos já feito por Simão e Giovetty (2007) sobre as propriedades do meio denso (como a estabilidade, viscosidade, etc.) recomendamos à Empresa, Sociedade Mineira do Chitotolo ou à outros Estudantes, o seguinte:

- ✓ Estudar o controlo e otimização da taxa de alimentação no desempenho do equipamento, em termos de eficiência;
- ✓ Estudar a pressão da alimentação ao ciclone no desempenho do separador;
- ✓ Estudar os requisitos para uma concentração eficiente;
- ✓ Avaliar os factores que afectam a boa recuperação em massa do sink;
- ✓ Aumentar um estágio de concentração (apuramento) de modo ininterrupta, isto é, contínuo sem interrupção da Alimentação;
- ✓ Aumentar um estágio de concentração do rejeitado do meio denso, para maximizar a recuperação;
- ✓ Propor um novo *Flowsheet* (Fluxograma) de tratamento para a Lavaria;
- ✓ Às Empresas Diamantíferas, de uma forma geral, disponibilizarem as informações (os dados) necessária para a realização de trabalhos que refletem a realidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AQUINO, J. A. Concentração em meio denso. Rio de Janeiro: CETEM, (CI-11/81), 1981.
- [2] BURT, R. O. The theory of heavy medium separation. In: Gravity concentration technology. New York: Elsevier, Cap. 5. 1984.
- [3] CHAVES, A. P. “Classificação”. In: CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios, 3ª ed. São Paulo: Signus, V.1.2001.
- [4] DOUGLAS C. Montgomery e GEORGE C. Runger. Estatística aplicada e probabilidade para Engenheiros. 4ª Edição.
- [5] D.G. Osborne. Coal Preparation Technology. Vol. 1. 1988.
- [6] Fundo Rodoviário. Ministério das Finanças. Lunda Norte. (2014)
- [7] HEAVY–MEDIA Separation process fine ore concentration. Ore Dressing Notes, New York, n. 12, Aug. 1943.
- [8] LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5ª Edição, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- [9] OLIVEIRA, Silvio Luiz de.: Tratado de metodologia científica: projetos de pesquisa, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.
- [10] SAMPAIO, C. H; TAVARES, L. M. M. Beneficiamento Gravimétrico : Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Editora da UFRGS, Porto Alegre. 2005
- [11] SIMÃO, H. K; GIOVETTY, R. Factores que afectam as características de um meio denso (Mina de Chitotolo). FEUAN, Luanda. 2007
- [12] SYMONDS, D. F. Selection and sizing of heavy media equipment. In: Design and Instalation of Concentration and Dewatering Circuits. SME/AIME, 1986.
- [13] WILLS, B. A. Heavy medium separation. In: Mineral Processing Technology. New York: Pergamon Press, 4 ed., Cap. 11, p. 420-456, 1988.
- [14] <https://mapio.net/a/91320237/?lang=ro>. Acessado em 15 de Abril de 2021
- [15] https://pt.wikipedia.org/wiki/Lunda_Norte. Acessado em 15 de Abril de 2021
- [16] <https://www.jornaldeangola.ao/ao/noticias/detalhes>. Acessado em 12 de julho de 2021

ANEXOS

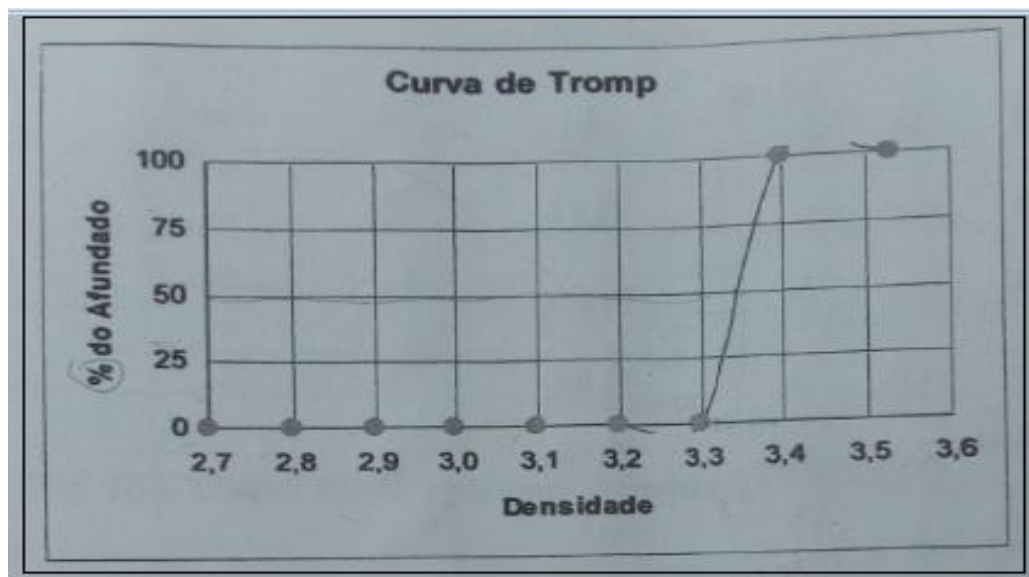
ANEXO A

Os gráficos das Curvas de Partição, realizados com base nos testes com cristais, por Simão e Giovetty, em seu trabalho “Factores que afectam as características de um meio denso (Mina de Chitotolo)”.

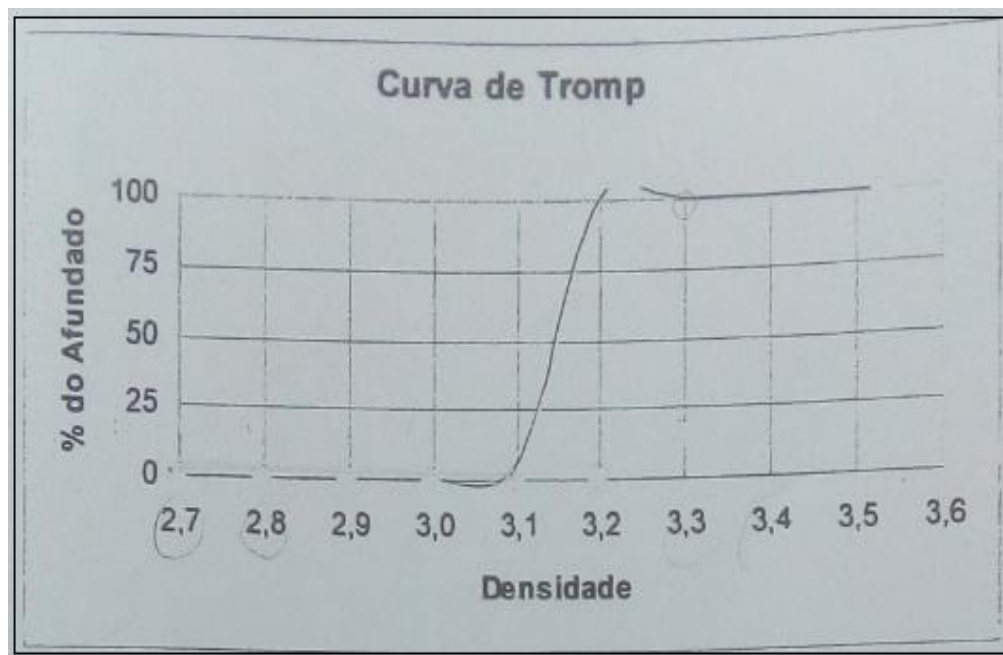
- 1) **Curva de Partição com densidade de $2,50 \text{ g/cm}^3$ na Alimentação (Densidade de Separação)**



- 2) Curva de Partição com densidade de $2,55 \text{ g/cm}^3$ na Alimentação (Densidade de Separação)



- 3) Curva de Partição com densidade de $2,57 \text{ g/cm}^3$ na Alimentação (Densidade de Separação)



- 4) Curva de Partição com densidade de $2,60 \text{ g/cm}^3$ na Alimentação (Densidade de Separação)



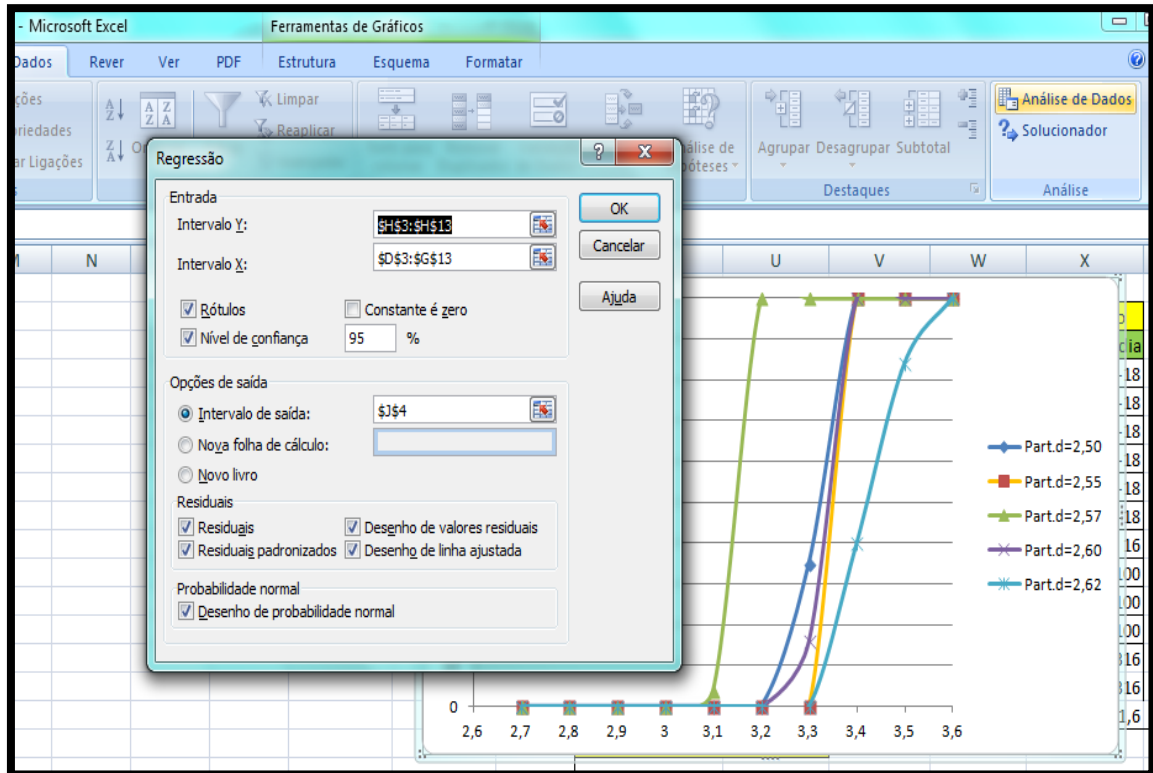
- 5) Curva de Partição com densidade de $2,62 \text{ g/cm}^3$ na Alimentação (Densidade de Separação)



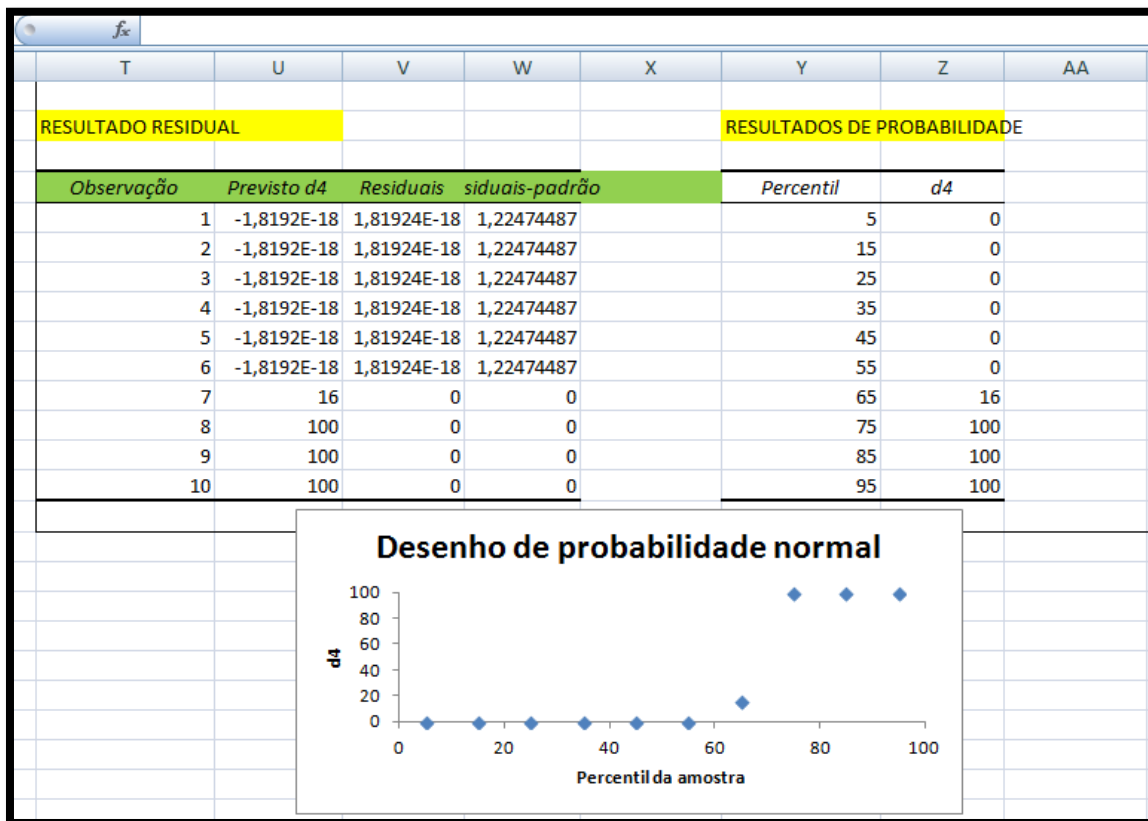
ANEXO B

As etapas da Análise de regressão com recurso à uma das ferramentas do Excel a fim de se determinar a curva média de partição, bem como a estatística da regressão.

1) Entrada dos dados – Variáveis do modelo em estudo



2) Saída dos dados – Resultado da estimação



3) Saída dos dados – Estatística dos resultados (Erros, Variância e outros)

SUMÁRIO DOS RESULTADOS								
Estatística de regressão								
R múltiplo	1							
Quadrado de R	1							
Quadrado de R ajust	1							
Erro-padrão	7,23051E-15							
Observações	10							
ANOVA								
	gl	SQ	MQ	F	F de significância			
Regressão	4	20270,4	5067,6	9,69314E+31	6,60971E-80			
Residual	5	2,61401E-28	5,228E-29					
Total	9	20270,4						
	Coeficientes	Erro-padrão	Stat t	valor P	95% inferior	95% superior	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interceptar (a)	-1,8192E-18	3,25972E-15	-0,0005581	0,999576287	-8,38121E-15	8,37757E-15	-8,38121E-15	8,37757E-15
b1	0,457142857	2,92062E-16	1,5652E+15	2,02031E-75	0,457142857	0,457142857	0,457142857	0,457142857
b2	0,542857143	2,78433E-16	1,9497E+15	6,73726E-76	0,542857143	0,542857143	0,542857143	0,542857143
b3	0	7,97828E-17	0	1	-2,05088E-16	2,05088E-16	-2,05088E-16	2,05088E-16
b4	8,12159E-20	1,64557E-16	0,00049354	0,999625295	-4,22925E-16	4,23087E-16	-4,22925E-16	4,23087E-16