

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIAS DE MINAS, METALURGIA E DE
MATERIAIS

**Eficiência de Corte dos Ciclones de Meio Denso da Planta de Beneficiamento da Mina de
Carvão da Vale- Moatize, Moçambique**

Leandro Peres Alberto

Dissertação para obtenção do título de mestre em Engenharia

Porto Alegre

2016

Leandro Peres Alberto

Eficiência de Corte dos Ciclones de Meio Denso da Planta de Beneficiamento da Mina de Carvão da Vale- Moatize, Moçambique

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral,
Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Dr Carlos Hoffmann Sampaio

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice- Reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIAS DE MINAS, METALURGIA E DE
MATERIAIS

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Ficha Catalográfica

Rxxc Alberto, Leandro Peres

Eficiência de corte dos ciclones de meio denso da Planta de beneficiamento da Mina de carvão da Vale-Moatize, Moçambique; Brasil-RS/Leandro Peres Alberto. -2016.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de minas, Metalurgia e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

Orientador: Carlos Hoffmann Sampaio.

1. Carvão: Mina da Vale Moatize. 2. Carvão: Caracterização. 3. Beneficiamento. I. Sampaio, Carlos Hoffmann, orient. II. Título.

CDU: ()

Leandro Peres Alberto

Eficiência de Corte dos Ciclones de Meio Denso da Planta de Beneficiamento da Mina de Carvão da Vale- Moatize, Moçambique.

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia – Área de Concentração Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharias de Minas, Metalurgia e de Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio-PPGE3M/UFRGS

Coordenador do PPGE3M:

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Aprovado em: / / 2016

Banca Examinadora:

Prof. Dr:

Prof. Dr:

Prof. Dr:

Dedico este trabalho à minha mãe, Hírdina Lúcia Banco Macedo, ao meu pai, (*in memóriam*) Alberto Daniel Alfai, à minha esposa, Helena António Cintura e à minha filha, Áulea.

Imensurável é a minha gratidão e meus agradecimentos aqueles que me indicaram os caminhos da educação e que nunca pouparam para me oferecer muito mais do que o destino a eles concedeu.

Essa vitória é nossa

“Pode-se vencer pela inteligência,
pela sorte ou pela habilidade,
mas nunca sem trabalho”

Destoef

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS.....	XV
RESUMO.....	XVIII
ABSTRACT	XIX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivos geral	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. MOÇAMBIQUE	3
2.1.1. Localização geográfica	3
2.2. ÁREA DE ESTUDO	8
2.2.1. Localização geográfica do distrito de Moatize, superfície e população.....	8
2.2.2. Clima; relevo e solos	9
2.2.3. Grau de estudo da bacia de Moatize.....	10
2.3. CARVÃO MINERAL	16
2.3.1. Importância do carvão mineral	16
2.4 SEPARAÇÃO GRAVÍTICA	17
2.5. CURVAS DE SEPARABILIDADE DENSIMÉTRICA	18
2.6. SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO	20
2.6.1. Aspectos gerais	20
2.6.2. Tipos de meio denso.....	22
2.6.3. Separação em meio denso em laboratório	27
2.6.4. Densidade e reologia do meio denso.....	29

2.6.5. Influência da reologia do meio denso na separação	31
2.6.6. Princípio de separação em meio denso.....	33
2.6.7. equipamentos principais de meio denso	34
2.7. CICLONES DE MEIO DENSO	37
2.7.1. Princípio de funcionamento	37
2.8. EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO	42
2.8.1. Grau de eficiência.....	44
2.8.2. Densidade de separação (ρ_{50}).....	46
2.8.4. Erro provável médio (Epm)	47
2.8.5. Imperfeição do corte.....	47
2.8.6. Fatores que influenciam a curva de partição.....	48
2.9. A VALE	49
2.9.2. Britagem e classificação	50
2.9.3. Fluxograma de circuito de finos.....	51
2.9.4. Ciclones de meio denso da Vale Moçambique	52
3. MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1. AMOSTRAGEM.....	54
3.2. HOMOGENIZAÇÃO	55
3.3. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS	56
3.3.1. Classificação granulométrica	56
3.4. ANÁLISES DENSIMÉTRICAS.....	57
3.5.1. Análise imediata.....	59
3.6. LEVANTAMENTO DA CURVA DE SEPARABILIDADE	60
3.7. CONSTRUÇÃO DA CURVA DE TROMP.....	60
3.7.1. Balanço de Massa.....	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL NA ALIMENTAÇÃO	68

4.3.EFICIÊNCIA DO PROCESSO	69
5. CONCLUSÃO	73
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	74

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente agradeço Á Deus por ter me oferecido todas as condições para a realização deste trabalho, por todas as oportunidades que encontrei pelo caminho e pela vida saudável e determinação que pude empregar na realização dos meus objetivos;
- Ao meu orientador professor Doutor Ing. Carlos Hoffmann Sampaio que, além do conhecimento transmitido, muito me incentivou para elaboração deste trabalho. Sua postura amigável e acessível facilitou muito o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço também pelas incansáveis iniciativas na organização das etapas do curso desde as atividades acadêmicas, passando pela elaboração da dissertação, publicação de artigos e, finalmente, a conclusão.
- Ao professor Irineu pelas diretrizes e o compartilhamento de seus conhecimentos.
- Agradecimento especial ao pesquisador Dr. Gerson Miltzarek, pela importante contribuição durante todas as etapas da pesquisa. Sua disponibilidade durante as amostragens, análises, interpretação dos dados e elaboração da dissertação foi fundamental para esta realização.
- A equipe do laboratório da intertek da Vale-Moçambique pela coleta e disponibilização das amostras de carvão utilizadas neste trabalho.
- À equipe de LAPROM e LTM do projeto Carvão de Moatize, equipa fundamental na realização das amostragens, tratamento das amostras e análises, sempre com muita presteza.
- Aos meus colegas do Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), pela convivência sadia e descontraída, que no decorrer desta caminhada contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, e também ajudaram a tornar mais alegres o meu dia a dia.
- Ao meu amigo Aurich Vaz Semana Dias... que acreditou no meu trabalho... que me ajudou a superar os diversos obstáculos dessa trajetória e acreditou em mim quando nem eu mais acreditava...que mesmo à distancia me deu todo suporte para continuar nos momentos mais difíceis, me ensinando a abandonar coisas levianas e nunca desistir do que realmente vale a pena...

- A minha filha Áulea peço desculpas pelas horas em que não lhe dei a merecida atenção, e em especial, a minha esposa Helena António Cintura, que com amor e sabedoria soube suportar as minhas ausências.
- A todos meus irmãos, que são a razão de todas as minhas conquistas. Por vocês, pelo apoio de uma vida inteira, é que estou aqui. Amo vocês incondicionalmente!
- Finalmente, a minha mãe Hírdina Lúcia Banco Macedo e a meu saudoso pai (*in memoriam*) a quem dedico este trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização geográfica de Moçambique a (esq.). Mapa de divisão administrativa a (dir.).....	3
Figura 2: Bacias do Karroo em Moçambique e principais aspectos geográficos da zona de Tete-Moatize.....	4
Figura 3: Principais bacias carboníferas de Moçambique.....	5
Figura 4: Ilustra a localização geográfica da província de Tete e a divisão administrativa do distrito de Moatize.	9
Figura 5: Esboço Geológico da Região de Tete-Moatize.	11
Figura 6: Esboço da serie produtiva de Moatize.....	14
Figura 7: Mapa Geológico da área de Tete-Moatize (adaptado de Folha No. 1633, 1:250.000, GTK Consortium, 2006) com os pontos de amostragem () nas camadas André (AN), Grande Falésia (GF) e Sousa Pinto (SP):	16
Figura 8: Curva de Separabilidade.....	19
Figura 9: Esquema do teste afunda-flutua.....	27
Figura 10: Influência das características do material formador do meio-denso e das variáveis do processo nas características do meio-denso e no desempenho do processo.....	33
Figura 11: Efeito do tamanho de partícula no desvio provável médio em separadores a meio-denso estáticos e dinâmicos.....	35
Figura 12: Diagrama esquemático de um ciclone a meio-denso:.....	39
Figura 13: Efeito do tamanho de partícula na curva de Tromp de ciclones a meio-denso	40
Figura 14: Etapas de um processo de concentração a meio-denso:.....	41
Figura 15: Diagrama esquemático de separação em dois produtos.....	42
Figura 16: Curva ilustrando a determinação do rendimento e do teor de cinzas teórico do concentrado de carvão.....	43
Figura 17: Curvas de partição relativas a uma separação ideal (esquerda) e real (direita).....	45
Figura 18: Curvas de Tromp mostrando os índices de avaliação de desempenho independentes	46
Figura 19: Circuito de britagem na alimentação.....	51
Figura 20: Circuito de espirais.....	52
Figura 21: Circuito de separação de meio denso da Vale-Moatize	53
Figura 22: Representa a composição da camada Chipanga em exploração pela mineradora.	54

Figura 23: A fig (a esquerda) ilustra ciclones de meio denso de onde foram colhidas as amostras e a fig (a direita) Ilustra as amostras recebidas pela mineradora.	55
Figura 24: Ilustra as amostras do carvão concentrado em Ciclones da Vale-Moatize	55
Figura 25: Ilustra o quarteador Jones usado no trabalho.....	56
Figura 26: Ilustra peneiras sobre um agitador mecânico.....	57
Figura 27: A fig (a esquerda) Ilustra o processo de separação por meio denso e a fig (a direita) ilustra o processo de secagem das amostras na capela.....	58
Figura 28: Moinho de disco orbital usado.....	59
Figura 29: Forno mufla usado para análises de teor de cinzas	60
Figura 30: Balanço de massa dos ciclones estudados	61
Figura 31: Curvas de separabilidade do concentrado Dmc_1 com as densidades	63
Figura 32: Curvas de separabilidade do concetrado Dmc_1 com teor de cinzas	63
Figura 33: Curva de separabilidade de rejeito Dmc_1	65
Figura 34: Curvas de rejeito Dmc_1	65
Figura 35: Curvas de separabilidade concentrado Dmc_2	66
Figura 36: Curvas de separabilidade do concentrado Dmc_2	67
Figura 37: Curva de tromp do DMC_1 da vale estudada no beneficiamento de carvão da camada chipanga.....	70
Figura 38: Curva interpolada de tromp do DMC_2 da Vale estudada no beneficiamento de carvão da camada chipanga.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Escala de Bird	20
Tabela 2 -Principais de líquidos orgânicos usados em ensaios de afunda-flutua e suas densidades:	24
Tabela 3- Resultados de teste flutua-afunda para carvão.....	28
Tabela 4- Características dos principais líquidos densos.....	29
Tabela 5- Ensaio densimétricos do concentrado DMC_1	62
Tabela 6- Ensaio densimétricos do rejeito DMC_1	64
Tabela 7- Ensaio densimétricos do carvão concentrado Dmc_1	66
Tabela 8- Ensaio densimétricos da alimentação do Concentrado Dmc_2	68
Tabela 9- Ensaio densimétricos do carvão térmico Dmc_2	69
Tabela 10- Resultados de coeficientes de partição do Dmc_1	69
Tabela 11- Resultados de coeficientes de partição do Dmc_2	70
Tabela 12- Parâmetros derivados da curva de partição do DMC_1 estudado -.....	71
Tabela 13- Parâmetros derivados da curva de partição do DMC_2 estudado	72

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

A-amostra.

AF-Afundado.

apud-citado por.

ASTM- American Society for Testing and Materials.

C-Carbono.

CC- Critério de concentração

CHPP - Coal hard Preparation Plant

CPP - Coal preparation plant

Cz(%)-Teor Cinzas.

Cz-cinzas.

dc-densidade de corte.

d-densidade.

Dmc- Dense medium cyclone

DWP- dynawhirlpool

E(s) = eficiência da separação

Epm- Erro provável médio

et al- e outros.

Fc - força centrífuga

Fg - força gravitacional

fg - figura

FL-flutuado.

g/cm³-grama por centímetros cúbicos.

g-grama/ aceleração da gravidade

H-Hidrogênio.

h - horas

hab./km- habitante por quilómetro

I - Imperfeição

Kg- quilograma.

LAPROM- Laboratório de processamento mineral.

LC - Lower chipanga

LCU - Lower chipanga upper

LTM - Laboratório de tratamento mineral

m-massa.

MC - Middle chipanga

Mf - massa da polpa de meio denso

min - minuto

ml- mililitro

mm- milímetro.

Mp - massa da partícula

M.calc - massa calculada

M. recal - massa recalculada

N- Nitrogênio.

NGM- *Near Gravity material*.

O- oxigênio.

r - raio do cyclone

rg- recuperação metalúrgica da ganga

R_i - coeficientes de partição

rv -recuperação metalúrgica do mineral útil;

ROM- *Run-of-mine*.

RS-Rio Grande do Sul.

Tab-tabela

T_a- teor médio da alimentação

T_c- teor médio do concentrado

T_r- teor médio do rejeito

t/m³ - tonelada por metro cúbico

UFRGS -Universidade Federal Rio Grande do Sul.

UCB - Upper chipanga base

USD - Moeda em dólares.

V- volume de líquido de densidade/ velocidade tangencial

Y_c^{*} - O rendimento teórico

Y_c – O rendimento do concentrado

ρ₂₅, ρ₅₀ e ρ₇₅- São densidades de separação

%C- teor de carbono total.

%- percentagem.

- mesh

< - menor.

> - maior.

°C- graus celsius.

+1mm- Retido em peneira de 1mm.

-1mm- Passante em peneira de 1mm

-50mm- passante em peneira de 50mm.

RESUMO

O presente trabalho tem como tema eficiência de corte dos ciclones de meio denso da planta de beneficiamento da mina de carvão da Vale- Moatize, Moçambique. O foco deste trabalho centra-se na avaliação de eficiência de ciclone de meio denso. As amostras utilizadas nos estudos foram provenientes de ciclones de meio denso da usina da mineradora da Vale-Moatize, de onde foram coletadas amostras em dois ciclones (Dmc_1 e Dmc_2) sendo que o concentrado do primeiro Ciclone alimenta o segundo ciclone, de onde se obtém dois produtos finais (Carvão metalúrgico e térmico). Este roteiro compreendeu a caracterização, comparação das características de lavabilidade e curvas de Tromp. Estas amostras foram processadas de forma padronizada de modo que os resultados obtidos pudessem ser comparados. As amostras foram secadas a 60°C de modo a retirar o excesso de humidade. Em seguida foram quarteadas e encaminhadas para o processo de densimétricos. Após o processo densimétrico nas densidades 1,3 á 2,2, seguiu se a análise imediata de cinzas. Com os resultados densimétricos e químicas foi plotado as curvas de separabilidade densimétrica. Quanto aos aspectos de lavabilidade do carvão, apesar da diferença na densidade de corte nos dois ciclones de meio denso, verifica-se uma alta liberação do material orgânico em relação ao material inorgânico nas densidades 1,3; 1,4; e 1,5g/cm³ devido ao processo de formação do carvão e o tempo de carbonificação com que esta matéria orgânica ficou submetida apresentando maiores dificuldades de separação na densidade 1,3 nos dois ciclones. Os parâmetros avaliados foram: densidade de corte (D50), Erro provável médio (EPM) e Imperfeição (I). Os ciclones mostraram desempenhos satisfatórios. O Dmc_1 e Dmc_2 apresentaram uma boa eficiência de corte com índice de precisão de 0,02 e 0,05 respectivamente. Portanto mesmo com alimentação bastante variáveis os ciclones apresentaram um densenho muito similar isto se deve a independência da distribuição densimétrica na alimentação.

Palavra-chaves: Carvão mineral, Curvas de Tromp, Separação por meio denso, Parâmetros de eficiência.

ABSTRACT

The present work focuses on cutting efficiency of dense medium cyclones from the Vale-Moatize coal mine beneficiation plant, Mozambique. The focus of this work focuses on the evaluation of dense medium cyclone efficiency. The samples used in the studies were obtained from dense medium cyclones of the Vale-Moatize mining plant, from which samples were collected in two cyclones (Dmc1 and Dmc2) and the concentrate of the first Cyclone feeds the second cyclone, from which one obtains Two final products (metallurgical and thermal coal). This script comprised the characterization, comparison of the washability characteristics and Tromp curves. These samples were processed in a standardized way so that the results obtained could be compared. The samples were dried at 60 ° C to remove excess moisture. Then they were quarteted and headed for the densimetric process. After the densimetric process at densities 1.3 to 2.2, immediate ash analysis was followed. With the densimetric and chemical results the densimetric separability curves were plotted. Regarding the washability aspects of the coal, despite the difference in cut density in the two cyclones of dense medium, there is a high release of the organic material in relation to the inorganic material in the densities 1,3; 1.4; And 1.5g / cm³ due to the process of formation of the coal and the carbonization time with which this organic matter was submitted presenting greater difficulties of separation in the density 1,3 in the two cyclones. The evaluated parameters were: cut density (D50), Mean Probable Error (EPM) and Imperfection (I). Cyclones showed satisfactory performances. The Dmc1 and Dmc2 presented a good cutting efficiency with an accuracy index of 0.02 and 0.05 respectively. Therefore, even with very variable feeding, the cyclones showed a very similar performance, due to the independence of the density distribution in the feed.

Keywords: Mineral Coal. Tromp curves. Separation by dense. Efficiency parameters

1. INTRODUÇÃO

A separação por meio denso é uma separação gravítica, sendo considerada a melhor separação de corte em relação aos meios gravíticos, isto se deve a precisão na separação de soluções com diferença de densidade de até 0,1. Este método de classificação baseia-se no emprego de um meio denso, no qual deve possuir uma densidade intermediária entre os minerais de interesse e aqueles que não se desejam utilizar.

O crescimento da demanda faz com que concentradores sejam alimentados com minérios mais complexos e mais pobres, conseqüentemente mais difíceis de tratar. O aproveitamento desses minérios requer métodos de tratamento mais elaborados o que implica em maiores custos operacionais e redução da margem de lucro das empresas. O investimento em pesquisa mostra-se fundamental para assegurar a competitividade das empresas mineradoras dedicadas à extração de minérios de carvão, abrindo perspectiva de aprimoramento dos processos e manutenção das características de seus produtos.

A Vale-Moatize vem investindo fortemente em pesquisa e desenvolvimento, visando aperfeiçoar as rotas de processo estabelecida nas suas unidades de concentração na planta I, bem como suportar tecnicamente a seleção de tecnologias para projetos de expansão na planta II.

É devido a essa ampla versatilidade associada a suas amplas faixas de concentração, que os ciclones de meio denso são hoje utilizados nos mais variados setores industriais, principalmente no tratamento de minério.

Numero de Tromp define-se como sendo a relação $(t/h \text{ afundado}) / (t/h \text{ alimentação})$ calculada por fração densitária. Todos os classificadores, incluindo os ciclones de meio denso, podem ter sua eficiência medida através de sua curva de Tromp. A curva de Tromp permite avaliar a precisão de separação em equipamentos de concentração gravimétrica de maneira independente da distribuição densimétrica da alimentação (Tromp, 1937 *apud* Sampaio e Tavares, 2005).

Sabendo-se da importância desse assunto realizou-se esse trabalho com o intuito de avaliar a eficiência de concentração de carvão mineral por meio denso (magnetita) utilizando ciclones e orientar a Vale-Moçambique na tomada de decisão no sentido de aperfeiçoar o processo de beneficiamento de carvão.

1.1. JUSTIFICATIVA

A relevância deste estudo está relacionada principalmente devido à grande aplicação dos ciclones de meio denso em indústrias minero-metalúrgicas na classificação mineral. A exigência de um maior conhecimento da eficiência tecnológica de classificação por ciclones e a escassez de pesquisas sobre o assunto, impulsionaram a realização desse trabalho que avaliou e caracterizou a operação unitária de classificação utilizando os ciclones nas etapas do processo de concentração do carvão mineral da empresa Vale-Moatize

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos geral

- Avaliar a eficiência do beneficiamento de carvão em ciclone de meio denso através da caracterização dos seus produtos (Concentrado e Rejeito).

1.2.2. Objetivos específicos

- Correlacionar a distribuição densimétrica aos teores de cinzas;
- Verificar a eficiência de operação no corte dos ciclones nas diferentes densidades;
- Levantar as curvas de partição, envolvendo os principais parâmetros para separação erro provável e imperfeição;
- Descrever experimentalmente o desempenho de ciclones de meio denso de acordo com critérios usuais de eficiência (Curva de Tromp);
- Comparar os os resultados dos parâmetros de eficiência obtidos nos procedimentos experimentais, com os dados disponíveis na literatura;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MOÇAMBIQUE

2.1.1. Localização geográfica

Moçambique se localiza na costa sudeste do continente africano, tendo como limites a Leste o oceano Índico, a Norte a Tanzânia, o Malawi e a Zâmbia, a Oeste o Zimbabwe e a África do Sul e a Sul a Suazilândia. Tem uma superfície de 799.380 km², que se estende Norte-Sul voltando para o Índico com que se confronta ao longo de 2.515 km de linha da costa. É um país com mais de 20 milhões de habitantes que nos últimos anos está a sair da pobreza absoluta.

O território moçambicano está dividido em onze províncias, de Norte a Sul nomeadamente: Cabo Delgado, Niassa, Nampula, Zambézia, Tete, Manica, Sofala, Inhambane, Gaza, Maputo e incluindo a cidade capital de Maputo que goza o estatuto da província. Cada uma das províncias tem uma capital provincial de Norte a Sul são: Pemba, Lichinga, Nampula, Quelimane, Tete, Chimoio, Beira, Inhambane, Xai-Xai, Matola.

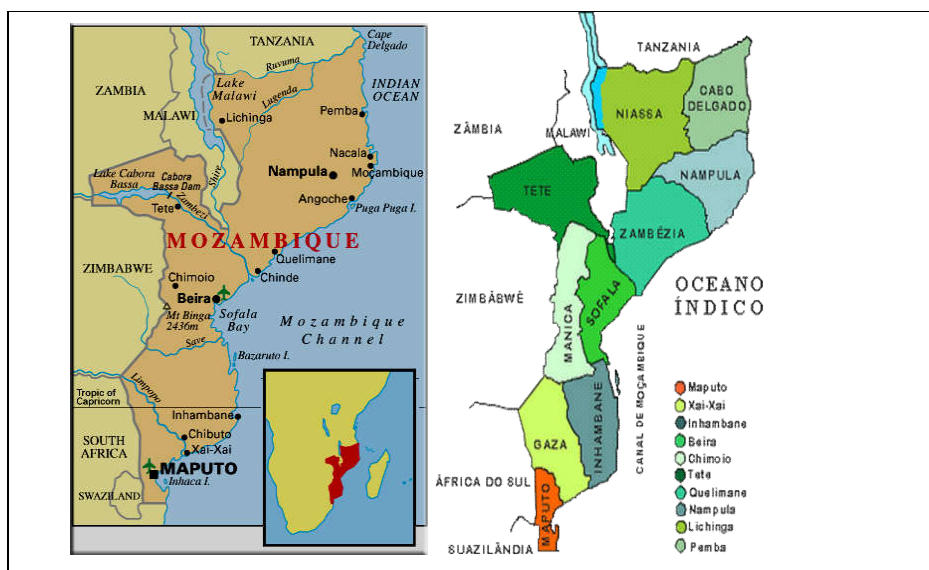


Figura 1: Mapa de localização geográfica de Moçambique a (esq.). Mapa de divisão administrativa a (dir.)

Fonte: Selemane e Sampaio *apud* <http://www.acil.org.mo/por/pcs_Mozambique.htm>. Acessado em 11/03/2011 e endereço <http://www.portaldogoverno.gov.mz> acessado em: 08/02/21011:

2.1.2. Principais bacias carboníferas

A Bacia de Moatize tem sido uma das regiões moçambicanas em que se têm fundado esperanças pela existência de recursos minerais importantes. Como consequência desta perspectiva, nesta região tem sido incutida maior número de estudos geológicos, quer sistemático, quer localizado com o objetivo de reconhecimento de determinadas mineralizações, e posteriormente a sua avaliação econômica dessas jazidas.

No território moçambicano podem ser mencionadas as principais bacias carboníferas, sendo Chicôa-Mecúcoè, Mucanha Vuzi, Moatize-Muarazi-Minjova, N'condedzi-Mutarara, Sanângoè-Metidzi, Canxixe, Mpotepote, Maniamba e Lugenda (Vasconcelos & Pedro, 2004).

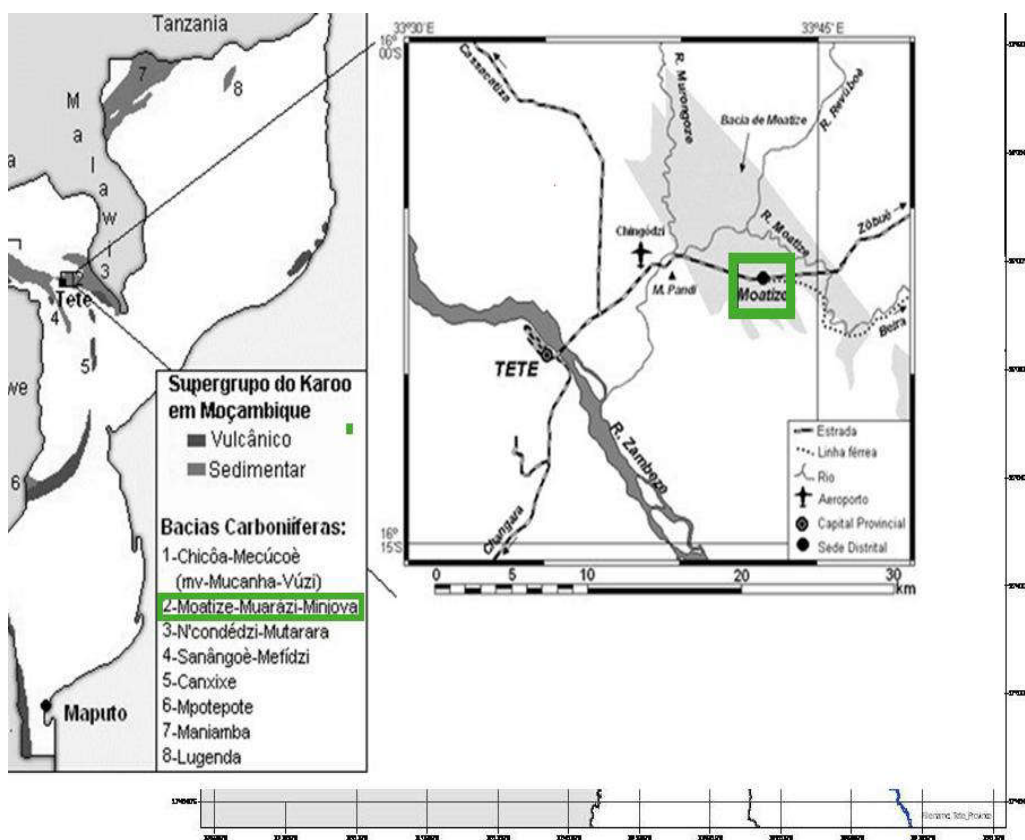


Figura 2: Bacias do Karoo em Moçambique e principais aspetos geográficos da zona de Tete-Moatize

Fonte: [Vasconcelos & Pedro, 2004].

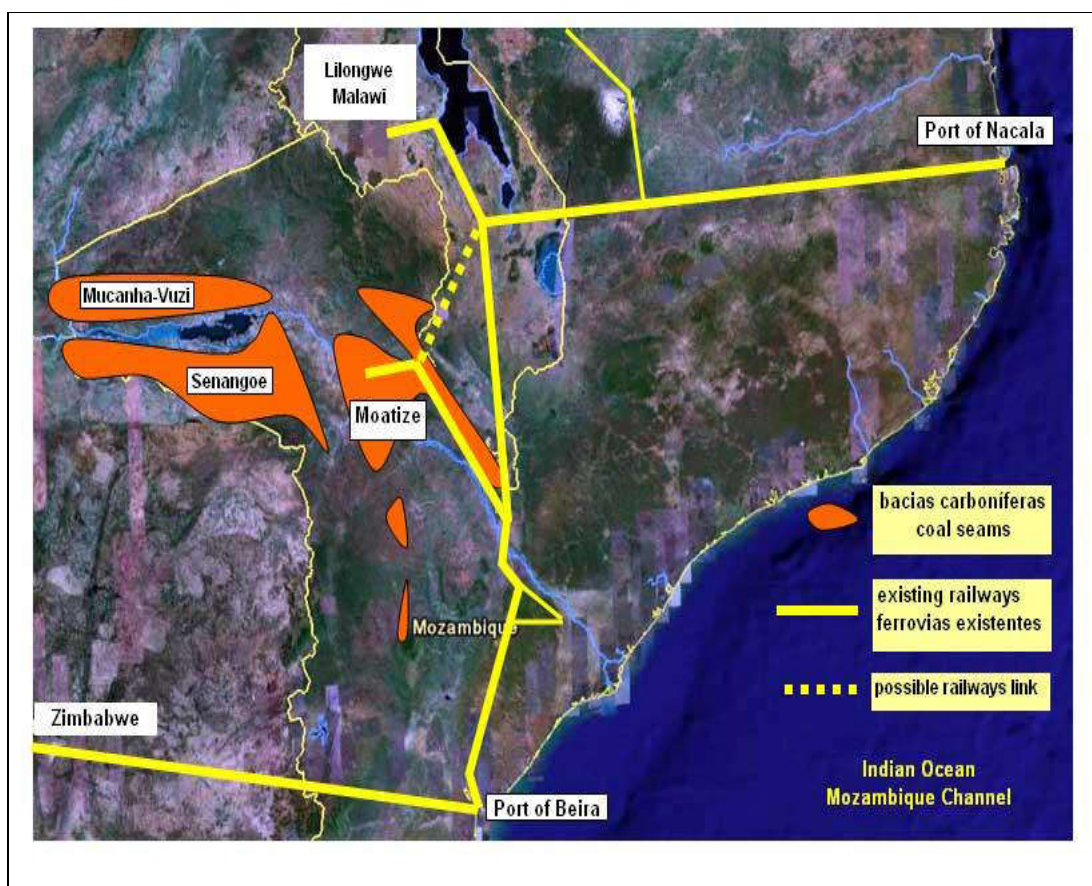


Figura 3: Principais bacias carboníferas de Moçambique

Fonte: Selemane e Sampaio *Apud* <[http:// www.vale.com](http://www.vale.com)>].

As bacias de Moatize, pelos resultados revelados por estudos recentemente apresentados por várias pesquisas realizadas, mostram que a rede de bacias carboníferas não exploradas do Mundo se encontra na província de Tete e a geologia corrente afirma que, para além destes campos de Moatize, estima que a Vale, antiga Companhia do Vale do Rio Doce, alguns quilómetros a oeste se estendem os depósitos de Mucanha-Vuzi (reservas > 3 biliões de toneladas) e de Senâgoe (reservas > 1 bilião de toneladas). Com reservas estimadas em cerca de 2,4 biliões de toneladas, em caso de avanço do mega-investimento da Vale em Tete, Moatize poderá produzir mais de 20 milhões de toneladas anuais do carvão bruto R.O.M (*run-of-mine*), das quais 10 a 12 Mt/ano (milhões de tonelada por ano) de carvão metalúrgico para exportação.

2.1.3. Situação mineira

Moçambique é um país muito rico em minério, e a exploração das jazidas de carvão, ferro e outros metais, pedras preciosas e minerais pesados, estão em plena expansão. Este setor, que tradicionalmente representa a maior parte das exportações do país, oferece grandes potencialidades de investimento na próxima década.

O ano de 2011 constituiu uma marca importante para o sector mineiro porque se deu início à exportação de carvão. Há várias empresas ativas na exploração do carvão, incluindo a multinacional australiana Rio Tinto. Os mais importantes jazigos de carvão encontram-se na província de Tete. A empresa de carvão Ncondezi, ativa naquela província, estima as reservas em 4655 mil milhões de toneladas de carvão. Rio Tinto, a companhia mineira australiana, vai começar a explorar uma mina na província de Tete.

A operadora brasileira Vale Moçambique, juntamente com a Rio Tinto, espera exportar mais de 100 milhões de toneladas de carvão para a Índia nos próximos 5 anos. Um dos clientes mais importantes é a Tata Steel. É provável que na próxima década a exportação de carvão venha a suplantar a de alumínio, tradicionalmente o produto de exportação mais importante do país.

Outras companhias estrangeiras também investiram fortemente neste setor. A companhia irlandesa Kenmare Resources explora depósitos de areias ricas em minerais pesados na província de Nampula, de onde extrai ilmenite e zircão. A companhia inglesa Gemfields adquiriu uma posição maioritária num depósito de rubi na província de Cabo Delgado. O grupo Baobab Resources, tem um projecto em estudo para explorar os jazigos de minério de ferro, vanádio e titânio, na província de Tete. As reservas são estimadas em 750 milhões de toneladas. Por fim, o grupo Rovuma Resources, encontrou depósitos de níquel na província de Cabo Delgado, com uma reserva estimada em 20 milhões de toneladas de níquel.

Um resumo de alguns dos projetos no setor mineiro em Moçambique, de norte a sul:

- Cabo Delgado: Grafite em Ancuabe
- Nampula e Maputo: Fábricas de cimento da Osho Cement em Nacala e Salamanga (investimento de 600 milhões USD).
- Tete: Moatiza Mines (investimento de 1535 milhões USD); Projeto Carvão. de Benga (investimento de USD 849 milhões)

- Gaza: Chibuto projeto de minerais pesados (investimento de \$ 1382 milhões).

Em Moçambique, numa altura em que o mundo está com olhos postos ao território nacional, tendo em conta o bom que se regista nos últimos tempos no que diz respeito à descoberta e exploração dos recursos minerais, particularmente relacionados com Carvão Mineral de Moatize, o país ainda tem muito por ser descoberto e explorado.

Assim, o governo moçambicano lança o desafio e convida os investidores, tanto nacionais assim como estrangeiros, a avançarem com propostas concretas para iniciarem investimento no setor mineiro nacional. Moçambique dispõe de uma vasta gama de recursos minerais, grande parte dos quais ainda não explorados, tais como metais básicos, fosfatos, rochas ornamentais, bauxita, minério de ferro, tantalite, pedras preciosas e semipreciosas, grafites e outros. O país possui grandes depósitos de areias pesadas ao longo da costa, tendo um deles, em Moma, entrado em produção em 2007 e prevendo-se para o futuro o desenvolvimento de outros projetos em outras áreas com projeção as de Chibuto, na província de Gaza [MEDIAX. Recursos minerais em Moçambique- “Temos ainda por explorar” Redação: Quinta feira, 22 de Julho de 2010] citado por (Selemane e Sampaio, 2011)

O país tornou-se, nos últimos tempos, no maior produtor de gás natural na região da África Austral. Foi recentemente feita a descoberta de novas jazidas de hidrocarbonetos, com particular destaque para a descoberta na bacia do Rovuma, fato que é uma razão clara para que os investidores tenham forte apetência por Moçambique.

No que diz respeito ao carvão mineral, Moçambique é considerado no futuro mais próximo como podendo ser um dos países com maiores reservas deste recurso mineral a nível mundial. “Existem diversas bacias carboníferas identificadas em diferentes áreas do país, nas províncias de Tete, Niassa, Cabo Delgado e Manica”; algumas delas presentemente a serem avaliadas através de trabalhos de pesquisa no âmbito de mais de 100 títulos mineiros atribuídos a várias identidades (pessoas singulares e coletivas) [MEDIAX. Recursos minerais em Moçambique “Temos ainda por explorar” Redação: Quinta feira, 22 de Julho de 2010.

A maior reserva de carvão mineral em Moçambique, se encontra localizada no distrito de Moatize, na província de Tete, no centro do país, e pretende integrar a lista dos maiores produtores e exploradores de carvão mineral no mundo. Os projetos de exploração de carvão em Moçambique se multiplicam nos últimos tempos promovidos sobre tudo por

transnacionais e empresas indianas, brasileira e australiana, permitindo ao país exportador de eletricidade a partir da barragem hidroelétrica de Cahora Bassa (HCB), localizada na província de Tete, reforçar o estatuto de potência energética regional e com o desenvolvimento do projeto de Moatize, espera-se que o país se torne no segundo maior produtor africano de carvão depois da África do Sul.

Estima-se que mais de 800 licenças de prospecção e pesquisa de minerais incluindo carvão mineral foram autorizadas pelo governo até Fevereiro de 2011, além de o país dispor de recursos naturais, este número crescente de investidores na área mineral se deve também de um ambiente propício para atração de investimentos.

2.2. ÁREA DE ESTUDO

2.2.1. Localização geográfica do distrito de Moatize, superfície e população

O distrito de Moatize, que dista a sensivelmente 20 km do Município de Tete, situa-se a NE da cidade capital provincial entre os paralelos 15° 36'' e 16° 38'' latitude Sul e entre os meridianos 32° 16'' e 34° 28'' de longitude Este. É limitado ao Norte pelos distritos de Chiúta e Tsángano, a Este pela República do Malawi, a Sul pelo distrito de Tambara, Guro, Changara e município de Tete através do rio Zambeze e Mutarara através do rio Mecombedzi e a Oeste pelos distritos de Chiúta e Changara (MAE, 2005).

Com uma superfície de 8.455 km² e uma população recenseada em 2007, 113.409 habitantes e estimada a data de 01 de Janeiro de 2005, em 143.663 habitantes, o distrito de Moatize tem uma densidade populacional 17 hab./km. A relação de dependência económica potencial é de aproximadamente 1:1, isto é, por cada dez crianças ou anciões existem dez pessoas em idade ativa. A população é jovem (48% abaixo dos quinze anos de idade), majoritariamente feminina, taxa de masculinidade de 48% e de matriz rural (taxa de urbanização de 23%). Administrativamente o distrito tem três Postos administrativos: Moatize, Kambulatsitsi e Zóbuè que, por sua vez, estão subdivididos em nove localidades, a saber: Moatize, Benga, Mpanzu, Msungu, Kambulatsitsi, Mecungas, Zóbuè, Capridzanje e Ncodeze (MAE, 2005).

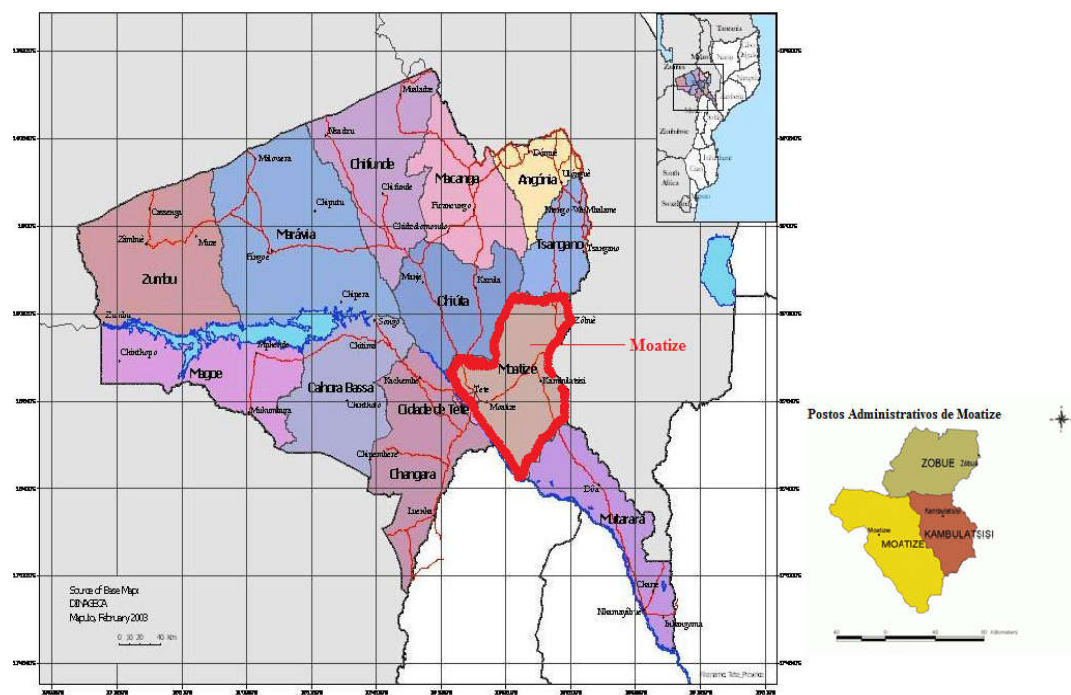


Figura 4: Ilustra a localização geográfica da província de Tete e a divisão administrativa do distrito de Moatize.

Fonte- Adaptado, Dinageca, Fevereiro/2003.

2.2.2. Clima; relevo e solos

No distrito de Moatize, ocorrem dois tipos de climas nomeadamente o tipo “seco de estepe com inverno seco-BSW”, na parte sul do distrito e do tipo “tropical chuvoso de savana AW” no norte do distrito. Os dois tipos de clima observam duas estações distintas, a estação seca e chuvosa, onde a precipitação média anual é cerca de 644 mm, enquanto a evapora transpiração potencial média anual está na ordem de 1.626mm.

A maior queda pluviométrica ocorre, sobretudo nos períodos compreendido entre Dezembro de um ano a Fevereiro do ano seguinte, e a temperatura média está na ordem dos 26.5°C, onde as médias anuais máxima e mínima são de 32.5 a 20.5°C respetivamente.

Geomorfologicamente, o distrito ocorre parcialmente no vasto complexo gnaiisso-granítico do cinturão de Moçambique (Mozambique belt) onde sobresaem em forma de inselbergs as rochas intrusivas do pós-karoo (MAE, 2005).

Destas geofomas de terreno resultam vários agrupamentos de solos destacando-se os seguintes: solos castanho-acinzentados, castanho-avermelhados pouco profundos sobre rochas calcárias e os derivados de rochas basálticas, estes últimos, podendo ser

avermelhados, castanho-avermelhados ou pretos, são ainda de profundidade variável e caracterizados por apresentarem boas capacidades de retenção de nutrientes e água, fendilhados quando secos e plásticos e pegajosos quando molhados. Ocorrem ainda em pequenas manchas solos aluvionares, em particular nos terraços dos rios Révubùè e Zambeze (MAE, 2005).

2.2.3. Grau de estudo da bacia de Moatize

A bacia carbonífera de Moatize, a mais conhecida de entre as diversas bacias de carvão existentes no país, foram realizados no passado diversos trabalhos de pesquisa geológica detalhada e presentemente existem vários bilhões de toneladas de carvão prontas para ser produzidas. Dentre vários trabalhos publicados sobre a área em referência, importa destacar os trabalhos de descrições, destacando fundamentalmente a descrição de afloramentos do sistema de Karroo e do Complexo Gabro Anortosítico de Tete (Coelho, 1969).

Em 1966, F. Real, no seu trabalho intitulado “Geologia da bacia do Zambeze”, faz referência as características geológicas e mineiras desta bacia, dando muita importância ao Karroo de Tete, onde estão inseridas importantes camadas de carvão. Este autor generaliza todos os dados existentes nesta província, por exemplo afirma que na bacia carbonífera de Moatize-Minjova as séries carboníferas apresentam uma espessura de 340 m.

R. S. Afonso (1978), no seu trabalho denominado “Geologia de Moçambique”, faz referência a distribuição do Karroo em Moçambique, sua origem e sequência Geológica incluindo a referência da existência de carvão na bacia carbonífera de Moatize.

Lopo Vasconcelos (1995), na sua tese de doutorado pela Universidade do Porto, em Portugal , estudou os carvões de Moatize com o tema: contribuição para o conhecimento dos carvões da bacia carbonífera de Moatize.

A província de Tete em particular foi palco de vários estudos Geológicos, os pioneiros nesses estudos em Tete, datam de 1920, onde estudantes e professores universitários Belgas, estudaram a bacia sedimentar, com particular incidência as camadas de carvão de Moatize, tendo concluído que em Moatize havia diferentes camadas de carvão que jaziam a diferentes profundidades.

Em 2007 e 2009 foi assinados dois contratos mineiros, com a Vale (Brasil) e Riversdale (Austrália) para Moatize e Benga respetivamente, que em conjunto contemplam a produção e exportação anual de cerca de vinte milhões de toneladas de carvão, a ocorrer dentro do primeiro semestre de 2011. O Governo moçambicano atribuiu, até nos finais de 2012, três novas concessões de pesquisa e prospeção de carvão, até ao momento, o Ministério dos Recursos Minerais já atribuiu 105 concessões de pesquisa e prospeção de carvão mineral; enquanto isso as Minas de Moatize e Benga em Tete, desenvolvidas pela companhia brasileira Vale e pela mineradora australiana Riversdale respetivamente, estão numa fase avançada (Selemane, 2011 *apud* disponível no endereço eletrónico e acessado em 08/03/2011: [htt: //www.africatoday.co.ao/pt/empresas/4918](http://www.africatoday.co.ao/pt/empresas/4918)).

Na província de Tete, cerca de 16 empresas estão licenciadas para a pesquisa de outros minérios, destacando-se ouro aluvional, platina, ferro, pedras preciosas, água mineral e metais básicos [Descobertos novos jazigos de carvão em Moçambique (Selemane ,2011 *apud* disponível no endereço eletrónico e acessado em 08/03/2011: [htt: //www.africatoday.co.ao/pt/empresas/4918](http://www.africatoday.co.ao/pt/empresas/4918)).

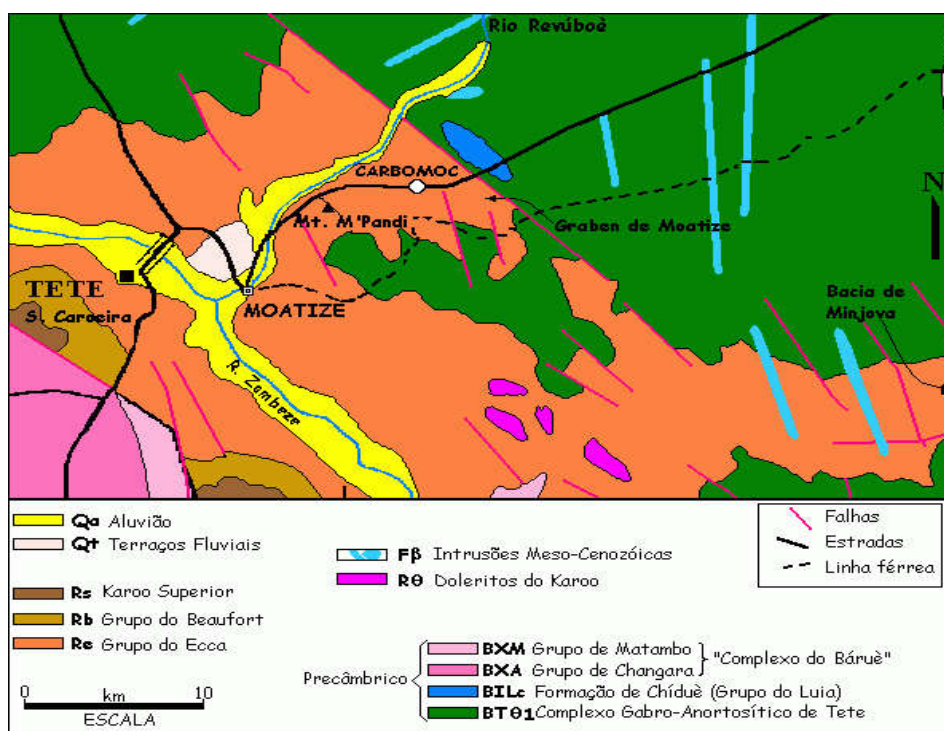


Figura 5: Esboço Geológico da Região de Tete-Moatize.

Fonte: Lopo Vaconcelos, Geologia do carvão, 2005

2.2.4. Enquadramento geológico da bacia de Moatize

A bacia carbonífera de Moatize localiza-se na província de Tete, a cerca de 20 km a nordeste da capital provincial, e a uns escassos 6 km do aeroporto de Chingódzi. A capital distrital de Moatize localiza-se dentro da bacia carbonífera, e situa-se na estrada que liga Tete ao Malawi, através da vila fronteiriça do Zóbuè (cerca de 90 km). Perto de Moatize há ainda a estrada que vai para a Zâmbia, através da fronteira de Cassacatiza.

A rede fluvial na Bacia de Moatize é constituída pelo Rio Revúboè, que corta a bacia no sentido NE-SW em direção ao Rio Zambeze, e pelos seus afluentes Rio Moatize, que corre na direção ESE-WNW, e Rio Murongódzi, que corre na direção NS. Em termos de orografia, a Bacia de Moatize apresenta um relevo aplanado algo ondulado, sendo bordejado a NE, NW e SW por zonas de montanhas referentes às formações precâmblicas. A feição mais notória é o Monte M'pandi, no limite SW da bacia, junto ao Rio Revúboè, com uma altitude de 321 m (GTK Consortium, 2006).

As formações de Moatize e Matinde são respectivamente equivalentes ao Dwyka Superior/Ecca Inferior e ao Ecca Médio/Superior da Bacia. A bacia carbonífera de Moatize está orientada no sentido NW-SE e está rodeada por gabros e anortositos da Suite Tete, de idade Mesoproterozóica (1600-1000 M.a), o limite NE da bacia é uma falha normal de cerca de 30 km de comprimento, orientada NW-SE. O limite SW é tanto por inconformidade, como também por contacto de falha, como é o caso da Falha do Monte M'pandi (Real, 1978).

A idade da série produtiva pode ser determinada devido à presença de numerosos fósseis vegetais, que são:

- *Glossopteris Indica* Shimper; *Glossopteris Browniana* Brongr; *Glossopteris Brancae* Gothan;
- *Glossopteris Stricta* Bunb; *Gangamopteris Cf. Obvata*; *Gangamopteris Cyclopteroides*;
- *Sphenophyllum Specioum* Royle; *Sphenophyllum thonnii* Mab; *Oblingifolium*; *Sigillariasp.*

A bacia carbonífera de Moatize, pertence ao Supergrupo do Karroo. A seqüência estratigráfica tem seis principais camadas de carvão, designadas de baixo para cima como: Souza Pinto, Chipanga, Bananeiras, Intermédia, Grande Falésia e André. A camada Chipanga é a mais espessa de todas e a única que foi explorada. A Bacia Carbonífera de Moatize pertence a uma bacia maior que se estende de Tete a Minjova, na fronteira com o Malawi,

que por sua vez se continua por este país adentro para a Bacia de Lengwe. Os limites NE e SW do graben são definidos por falhas de bordadura com direcção NW-SE. O graben de Moatize tem um comprimento aproximado de 35 km e uma largura média de 2 km. O acidente orográfico mais importante é o Monte M'pandi, com uma altitude de 320.8 m, situado na margem SW do graben, representando um braquianticlinal das rochas do embasamento.

Sobreposta à formação de Moatize encontra-se a formação de Matinde. As formações de Moatize e Matinde são respetivamente equivalentes ao Dwyka Superior/Ecca Inferior e ao Ecca Médio/Superior da Bacia. As camadas de carvão de Moatize estão inseridas no karroo justificando-se assim a importância desta unidade geológica. Na região de Moatize, superiormente à série produtiva, começa outra série sedimentar constituída por grão grosseiro à médio, grés arcósico e pequenas camadas lenticulares de calhau rolado e estratificação cruzada (F. Real, 1966).

O depósito de carvão de Moatize é constituído por rochas de origem sedimentar, tais como, siltitos e arenitos que são as litologias correspondentes a rocha estéril. O minério é composto por três camadas horizontalizadas principais de carvão com a seguinte nomenclatura: a Bananeiras, a Chipanga e a camada Souza Pinto, sendo apresentadas da camada mais rasa, para a mais profunda.

Série produtiva- esta é de grande interesse por nela estar englobada a importante camada de carvão. Esta série é caracterizada por possuir xistos, grés carbonosos, argilitos negros, por vezes piritosos. A idade desta série é de petmiano inferior, que, provavelmente se corresponde com o andar Ecca (F. Real, 1978).

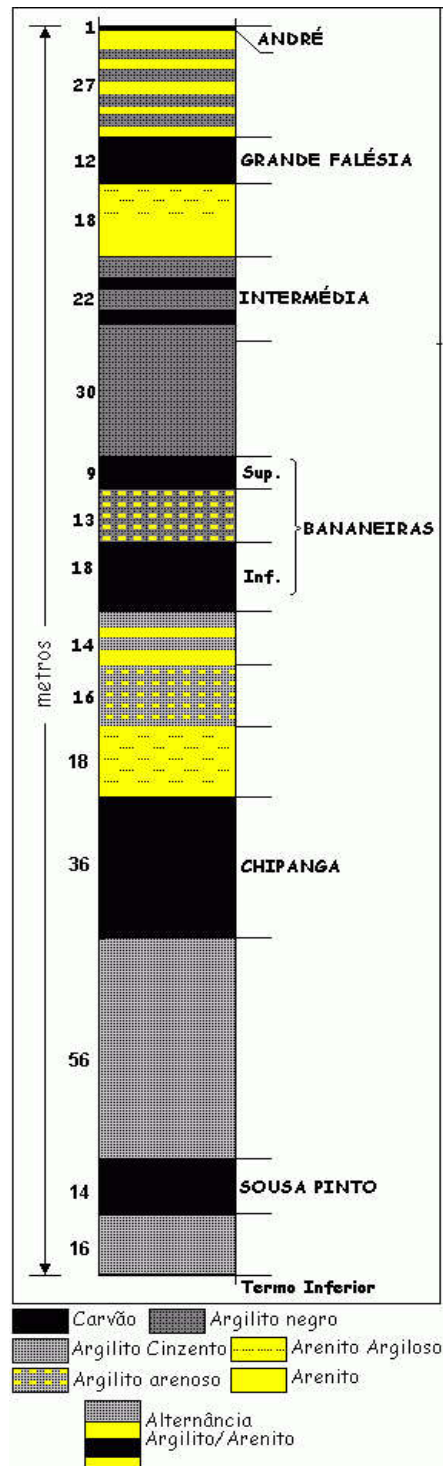


Figura 6: Esboço da serie produtiva de Moatize

Fonte: Lopo Vaconcelos

Entre as camadas de carvão existe novamente a presença de material estéril compostos por siltitos e arenitos o chamado “*interburden*”.

As camadas de carvão apresentam características distintas quanto a sua composição química e aproveitamento econômico.

A partir do modelamento realizado foi possível verificar intensa atividade geológica nas camadas de carvão de Moatize. Na série produtiva são conhecidas camadas de diferentes espessuras e designadas a partir da mais recente por:

1. André
2. Grande Falésia
3. Intermédia
4. Bananeira
5. Chipanga
6. Souza Pinto

1. Camada André- topo da série produtiva, constituída por bancadas de carvão interceptadas apenas por dois leitos finos de xistos carbonosos, piritosos com 1 à 2 m de carvão.

2. Camada Grande Falésia- constituída por xistos argilosos e carvões com 12 m de espessura.

3. Camada Intermédia- formada por argilito negro e níveis de carvão muito pequeno.

4. Camada Bananeira- a que corresponde a um complexo de xistos e carvão, este com fraca espessura e uma espessura de 9m superior e 18 m inferior, ambas intercaladas por argilito arenoso.

5. Camada Chipanga- a mais importante da série produtiva com uma camada basal de 2.5 à 3.6 de carvão, ou seja uma espessura de 36 m.

6. Camada Sousa Pinto - constituída por um complexo carbonoso com 14 m de espessura.

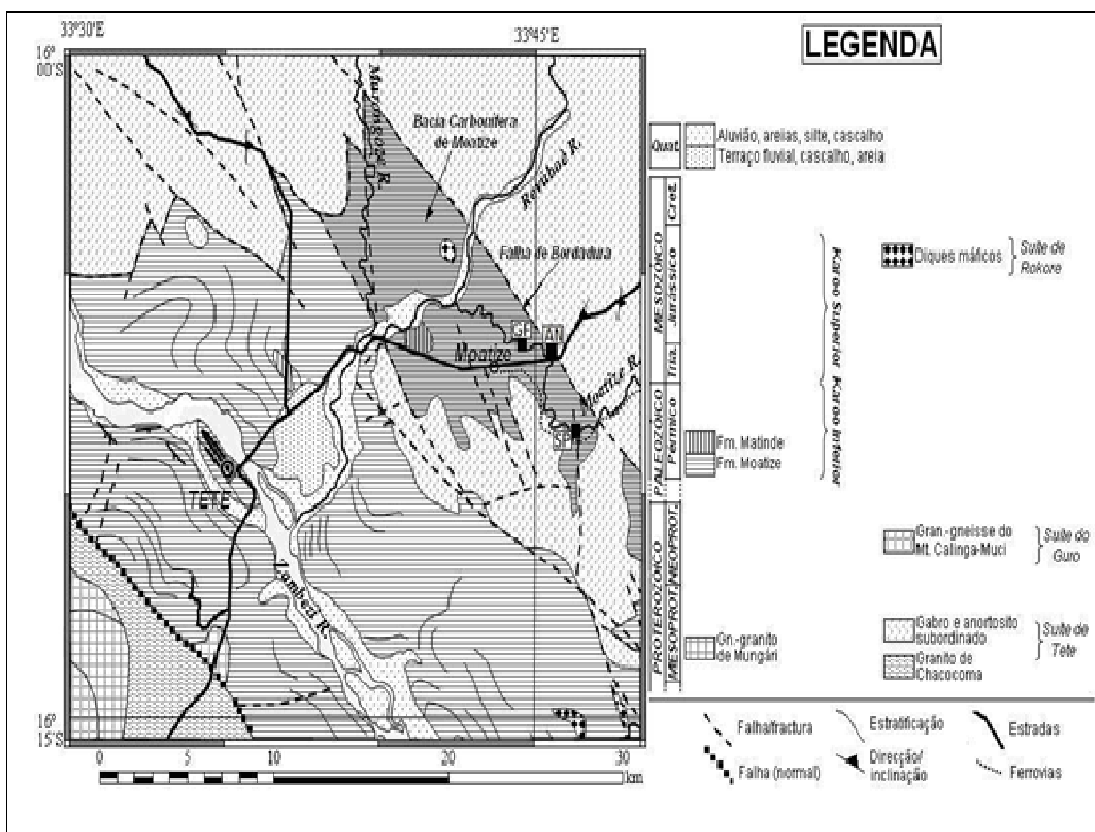


Figura 7: Mapa Geológico da área de Tete-Moatize (adaptado de Folha No. 1633, 1:250.000, GTK Consortium, 2006) com os pontos de amostragem () nas camadas André (AN), Grande Falésia (GF) e Sousa Pinto (SP):

Fonte- Lopo Vaconcelos, 2005

2.3. CARVÃO MINERAL

2.3.1. Importância do carvão mineral

O carvão mineral ou simplesmente carvão – é um combustível fóssil sólido formado a partir da matéria orgânica de vegetais depositados em bacias sedimentares. Por ação de pressão e temperatura em ambiente sem contato com o ar, em decorrência de soterramento e atividade orogênica, os restos vegetais ao longo do tempo geológico se solidificam, perdem oxigênio e hidrogênio e se enriquecem em carbono, em um processo denominado carbonificação (Balanço mineral Brasileiro, 2001).

O carvão é um recurso natural com extensa distribuição, sendo explorado em diversos países. O setor industrial relativo ao carvão divide-se em dois segmentos-chave: aquele relacionado ao carvão térmico e aquele relacionado ao carvão metalúrgico.

O carvão térmico é empregado nos processos de combustão para produzir vapor na geração de electricidade e calor. O carvão metalúrgico é usado principalmente para produzir o coque, utilizado como agente redutor nos altos-fornos no processo de produção de aço.

O carvão metalúrgico inclui carvão coqueificável e carvão utilizado com objectivos redutores, como por exemplo na injeção de carvão pulverizado (PCI).

Segundo o Balanço mineral Brasileiro (2001), O carvão é comercializado internacionalmente tanto por via terrestre como marítima, sendo que a maior parte da produção carbonífera do mundo é consumida pelos países que estão entre os principais produtores: China, EUA, Índia e Rússia. Outros países de destaque na produção mundial são Austrália e África do Sul, que concentra grande parte da produção registrada no continente africano. No entanto, ressalta-se que o mercado transoceânico é extremamente expressivo.

2.4 SEPARAÇÃO GRAVÍTICA

De acordo com Chaves e Filho (2013), os processos de concentração gravítica são os mais utilizados na mineração em termos de tonelagem processada e, em principio, os mais baratos no que diz respeito aos investimentos de instalação e custo operacional. Isto posto, é importante mencionar que dois grandes fatores limitantes desta técnica correspondem à necessidade de um considerável grau de liberação nas frações a serem beneficiadas e ao elevado consumo de água demandado, o que exige o desenvolvimento de um projeto eficiente para sua recirculação.

A separação de partículas por processos de classificação e concentração gravimétrica é inteiramente resultado do comportamento cinemático destas partículas em fluidos, o qual é influenciado pela granulometria, forma e densidade das partículas, bem como da densidade e reologia do fluido. Uma vez que as mesmas leis da física se aplicam em ambos os casos, uma separação gravimétrica eficaz somente pode ser realizada pela aplicação adequada de mecanismos e forças que favoreçam o efeito da densidade (Sampaio e Tavares, 2005)

As diferenças de densidade entre partículas individuais podem ser exploradas para realizar a separação entre as mesmas e concentrar os componentes de interesse (King, 2001). Esta diferença é aproveitada nos métodos de separação gravítica através da ação da força da gravidade atuando em conjunto com outras forças, como por exemplo, a resistência ao movimento oferecida por um fluido como a água ou o ar (WILLS, 1997).

Lins (2010) afirma que o critério de concentração (CC) é usado em uma primeira aproximação e fornece uma ideia da facilidade de se obter uma separação entre minerais por meio de processos gravíticos, desconsiderando o fator de forma das partículas minerais.

$$CC = \frac{|\rho_d - \rho_f|}{|\rho_l - \rho_f|}, \quad (1)$$

ρ_d e ρ_l são as densidades dos minerais pesado e leve, respectivamente

ρ_f é a densidade do meio de separação

Para Sampaio e Tavares (2005) essa separação será mais significativa para partículas de maior tamanho uma vez que o efeito da densidade se torna mais pronunciado nesse caso. Concomitantemente, para um processamento satisfatório, é necessário que a alimentação apresente uma distribuição granulométrica estreita, além de uma diferença significativa de densidade ou forma entre os constituintes de interesse.

2.5. CURVAS DE SEPARABILIDADE DENSIMÉTRICA

Segundo Sampaio e Tavares (2005) relatam que os ensaios sequenciais de afunda-flutua fornecem as informações necessárias para a preparação de curvas de separabilidade densimétricas de matérias. Estas curvas de separabilidade densimétricas também chamadas erroneamente de curvas de Lavabilidade são também conhecidas como curvas de Henry-Reinhardt.

Dessas curvas as mais usadas são Curva densimétrica, Curvas dos flutuados e afundados, Curva elementar e Curva de tolerância densimétrica ou *Near Gravity Material* (NGM).

A representação gráfica dos resultados obtidos nos testes de afunda-flutua é feita num diagrama cartesiano chamado de curva de separabilidade que apresenta a massa flutuada (expressa em %) no eixo das ordenadas e a densidade de separação no eixo das abscissas. Por razões práticas, a escala do eixo das massas é invertida, ou seja, cresce de cima para baixo (CHAVES e FILHO, 2013).

A forma usual de apresentação dos resultados dos testes de flutua-afunda é construir um diagrama único superpondo as curvas de lavabilidade e de teores, conforme apresentado na Figura (9).

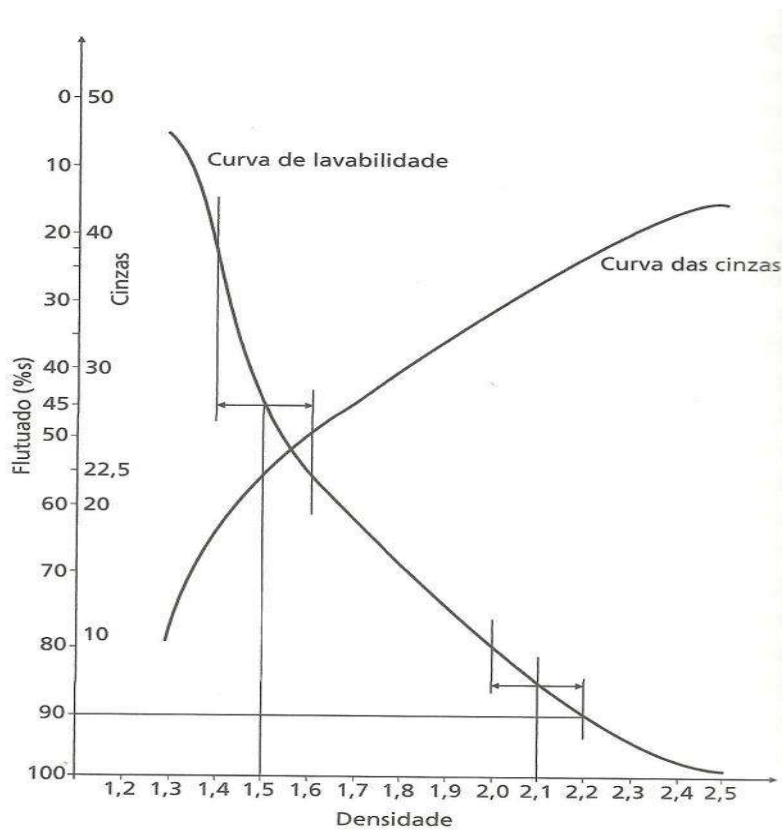


Figura 8: Curva de Separabilidade

Fonte: CHAVES e FILHO, 2013

A leitura deste gráfico fornece vários tipos de informações importantes, tais como:

- Massa fluada teórica para uma dada densidade de separação;
- Densidade necessária para obter teores e massas fluadas desejadas;
- Quantidade de material "*near gravity*" (porcentagem em massa de material entre o intervalo "densidade de separação +0,1" e "densidade de separação -0,1").

A quantidade de material "*near gravity*" representa a inclinação da curva de separabilidade na densidade de corte e está associada à dificuldade em beneficiar o minério. Ela é traduzida pela escala de Bird, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Escala de Bird

% near gravity	Problema de separação	Processo recomendado	Tipo
0 a 7	Simple	Qualquer um	Jigues, mesas, espirais, calhas, cones, meio denso
7 a 10	Moderadamente difícil	Processo eficiente	
10 a 15	Difícil	Processo eficiente e boa operação	
15 a 20	Muito difícil	Processo muito eficiente e operação por especialistas	Meio denso
20 a 25	Excessivamente difícil		
Acima de 25	Praticamente impossível	Processo excepcionalmente eficiente, limitado a poucos materiais	Meio denso com controle automático de processo

Fonte: (CHAVES e FILHO, 2013).

É importante frisar que a tabela de Bird, não leva em conta o tamanho das partículas e, em razão disso, o bom senso e a experiência não podem ser deixados de lado. As curvas de separabilidade são amplamente utilizadas para carvões sendo uma ferramenta preciosa na previsão de resultados de beneficiamento deste tipo de material. Como dito anteriormente, o grande problema de utilizá-las para outros minérios reside na dificuldade de encontrar líquidos com densidades adequadas a essas separações (CHAVES e FILHO, 2013).

2.6. SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO

2.6.1. Aspectos gerais

LEMYR (2011) sugere que a principal diferença entre a separação densimétrica e a concentração gravimétrica, pois a gravimétrica utiliza-se ar ou água como meio denso, portanto, como todos os minerais são mais densos as partículas minerais apresentam a mesma direção e sentido que a aceleração do campo ao realizar a separação, enquanto, a separação por meio denso apresenta dois produtos, um que flutua, devido a sua densidade ser menor que a do meio denso e o outro que afunda por possuir maior densidade que o meio.

Esse meio é obtido através da dissolução de sais em água ou pela dispersão também em água de partículas finas de material com elevada densidade (DUTRA, 2008).

Segundo Sampaio e Tavares (2005) o processo de separação em meio denso foi originalmente desenvolvido para o beneficiamento de carvões de difícil lavabilidade, para os quais o método de jigagem se mostrava ineficiente. A separação por meio denso é um método de classificação gravimétrica, sendo considerado o de maior precisão de corte, o qual baseia-se na diferença de densidade entre um meio fluido e os minerais a serem separados (SOUZA, 2013).

Campos *et al* (2010) avalia que 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.

Em 1911, a Du Pont patenteou um processo de separação, utilizando hidrocarbonetos clorados para obter meios densos de maior densidade. Com o prosseguimento das pesquisas, em 1917 veio a primeira aplicação comercial, quando foi patentado o processo Chance (CAMPOS, 2004).

Sampaio e Tavares (2005 *apud* Osborne, 1988) afirmam que diversas tentativas também foram realizadas no sentido de utilizar materiais como barita, argilas e rejeitos do beneficiamento de carvão (folhelhos) no preparo de meios-densos. A barita, por exemplo, foi amplamente utilizada em separadores estáticos a meio-denso (processo Barvoy) a partir da década de 30. Ela era cominuída até um tamanho médio de 25 μm e estabilizada com argilas meios-densos a base de galena encontram alguma aplicação na concentração de minerais metálicos, sendo recuperados posteriormente por meio da flotação (Jacobi, 1978). Na prática, devido à sua alta degradabilidade mecânica e elevado custo, o uso de galena é somente viável quando ela se encontra presente como um dos constituintes do próprio minério. O principal avanço na separação a meio-denso somente ocorreu após 1937, quando K. F. Tromp empregou com sucesso uma suspensão de magnetita fina e desenvolveu um processo de recuperação do meio.

Atualmente, é aplicado no beneficiamento de diferentes tipos de carvão, de diversos tipos de minérios e de materiais secundários, seja na geração de um pré-concentrado para uma etapa posterior de beneficiamento, geração de um produto final, um rejeito final para descarte, bem como na recuperação de metais ou ligas metálicas, em usinas de reciclagem (Campos *et al*, 2010).

2.6.2. Tipos de meio denso

Atualmente, os meios densos utilizados para a separação dos minerais são (PITA, 2004):

- Soluções aquosas de sais inorgânicos;
- Líquidos orgânicos;
- Fluidos paramagnéticos;
- Suspensões de sólidos em água.

Apesar da existência destes quatro meios densos, todos eles buscam possuir características imprescindíveis para serem considerados ideais em uma determinada aplicação, sendo elas (Kahn, 1997)

- Estabilidade de suspensão ou solução;
- Baixa viscosidade;
- Fácil ajuste de densidade;
- Boa miscibilidade com solventes;
- Transparente;
- Baixo custo;
- Não ser tóxico;
- Não ser corrosivo;
- Não reagir com a amostra;
- Possível de ser recuperado.

a) Soluções aquosas de sais inorgânicos

Esta solução iniciou com Soluções de cloreto de cálcio (CaCl_2), foram as primeiras soluções de sais inorgânicos a serem utilizadas na separação industrial de carvões, por meio dos processos Lessing e Bertrand (Campos *at al*, 2004).

A limitação da densidade máxima da solução em $1,35 \text{ g/cm}^3$, devido ao aumento de viscosidade e ao elevado custo de recuperação do meio-denso, tornou inviável o processo. Além disso, o caráter altamente corrosivo dessas soluções aquosas limitou a sua aplicação na separação a meio-denso na indústria (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Symonds, 1986).

AQUINO, *at al* (2007 *apud* BURT;1984) Afirma que os principais sais inorgânicos utilizados foram: cloreto de cálcio (CaCl_2) e cloreto de zinco (ZnCl_2). Estes sais, embora sejam mais baratos em comparação aos líquidos orgânicos e possibilitem o tratamento de amostras úmidas, não permitem a obtenção de soluções com densidade superior a $1,95 \text{ g/cm}^3$.

b) Líquidos orgânicos

Líquidos orgânicos, comumente usados em ensaios de afunda-flutua em laboratório (ver Tabela 2) no intervalo de $0,86$ a $3,3 \text{ g/cm}^3$, apresentam como vantagens a baixa viscosidade, a alta estabilidade e a facilidade no controle da densidade (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

Na aplicação atual dos líquidos orgânicos os que são mais empregados, ganhando destaque são: bromofórmio, iodeto de metileno e solução de Clerici (CAMPOS *at al*, 2004). Atualmente, os líquidos orgânicos (Tabela 2) são utilizados apenas em laboratório, na caracterização tecnológica de matérias-primas minerais ou carbonosas e outros materiais (Campos *et al*, 2010).

Tabela 2 -Principais de líquidos orgânicos usados em ensaios de afunda-flutua e suas densidades:

Líquidos	Fórmulas químicas	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)
Tetrabromoetano	$\text{CHBr}_2\text{CHBr}_2$	2,964	12	0,065	<1,0	0,1	151
Bromofórmio	CHBr_3	2,89	1,89	0,319	5	6-7	149,5
Iodeto de Metileno	CH_2I_2	3,325	2,6	1,42	1,3	5,6	180
Solução Cléricsi	$\text{CH}_2(\text{COOTI})_2\text{HCOOT}$	4,28	31	1,4	-	-	-
Tricloro-etano	CCl_3CH_3	1,33	-	2	-	32,5	74,1
Triclorobromo metano	CCl_3CH_3	2,001	-	0	-	-	-
Brometo de metileno	CH_2Br_2	2,484	-	-	-	-	97
Tribromo-fluormetano	CBr_3F	2,748	-	11,7	-	-52,7	-

(1) – Em relação à água a 4oC.

(C1) – Densidade (g/ml a 20oC)

(2) – Em relação a 54 mm de Hg.

(C2) – Viscosidade (cPa 20oC)

(3) – Com decomposição.

(C3) – Solubilidade em água (g/100 ml)

(4) – Média a 20o C

(C4) – Pressão de vapor (mmHg a 20oC)

(5) – Média a 25oC

(C5) – Temperatura (oC) de solidificação

(6) – Média a 760 mm de Hg

(C6) – Temperatura (oC) de ebulição.

(7) - Média a 15oC

Fonte: (Campos *et al.*, 2010).

As densidades intermediárias às dos líquidos densos listados na Tabela 1, poderão ser obtidas mediante a adição de diluentes ou solventes, tais como: álcool etílico (d = 0,89), tetracloreto de carbono (d = 1,59), NN-dimetil formamida (d = 0,93) e xilol (d = 0,85) e percloroetileno (d = 1,62). Para determinação da densidade de um meio obtido a partir da

mistura de dois líquidos densos ou de um líquido denso e um diluente é usualmente utilizada a seguinte equação:

$$V_2 = V_1 \frac{(d_1 - d)}{(d - d_2)} \quad (2)$$

Onde:

V_2 = volume de líquido de densidade d_2 (ml);

V_1 = volume de líquido de densidade d_1 (ml);

d = densidade da mistura desejada (g/cm^3);

d_1 = densidade do líquido 1 (g/cm^3);

d_2 = densidade do líquido 2 (g/cm^3).

c) Fluidos paramagnéticos

Fluido paramagnético é uma suspensão coloidal, à base de água, não tóxico, contendo partículas de ferrite micronizada abaixo de 100Å 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 ou a concentração do fluido (PITA, 2004)

d) Suspensões de Sólidos em Água

Para a obtenção de uma suspensão ideal de sólido em água, é necessário que o sólido a ser utilizado apresente as seguintes características: (CAMPOS *et al*, 2010).

- **dureza elevada** - para evitar a degradação das partículas, que geram finos durante a operação e, conseqüentemente, aumentam a viscosidade da polpa.
- **estabilidade química** - apresentar resistência à corrosão e não reagir com os minerais em estudo.
- **densidade elevada** - para que possa atingir a densidade que permita a separação dos minerais, tendo o meio denso viscosidade aceitável do ponto de vista operacional.
- **recuperação fácil** - o material sólido 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 a ser utilizado deve ser de granulometria fina, porém apresentar uma distribuição granulométrica, de tal forma que as frações ultrafinas não eleve a viscosidade do meio a níveis impraticáveis, do ponto de vista operacional. A participação de material (sólido) de granulometria excessivamente fina 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.

Atualmente, quase a totalidade das usinas que empregam separação a meio-denso, utiliza suspensões de magnetita ou de ferrosilício (ou uma mistura destas), devido à sua facilidade de recuperação por separação magnética. É importante ressaltar, no entanto, que materiais não-magnéticos permanecem como uma alternativa de baixo custo em separações a baixas densidades de materiais. Um exemplo é a separação de diferentes tipos de plásticos em suspensões de argilas, na qual a recuperação do meio se dá simplesmente por peneiramento (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Bevilacqua e outros, 2000).

A magnetita é o material de ocorrência natural mais empregado na preparação de meios-densos. Utilizada em separações com densidades de corte no intervalo de 1,3 a 2,4 g/cm³, ela encontra ampla aplicação no beneficiamento de carvões e de minerais leves, como grafita, gipsita e brucita. Quando misturada com ferrosilício, permite atingir densidades entre 2,3 e 2,9 g/cm³, sendo também útil na pré-concentração de minérios metálicos.

O baixo custo e o caráter não-corrosível e magnético da magnetita fazem com que a sua utilização seja bastante difundida. Como desvantagens, entretanto, devem ser citadas a alta dureza (dureza de 5,5-6,5 na escala Mohs) e abrasividade, que resultam no elevado custo de manutenção e na limitada vida útil dos equipamentos de beneficiamento.

Normalmente, a magnetita disponível no mercado é obtida como subproduto da concentração de outros minérios e apresenta teores de, aproximadamente, 62% de ferro contido, podendo conter até 10% de impurezas não-magnéticas. Ela usualmente apresenta densidade em torno de 4,8g/cm³ (ao invés de 5,18g/cm³ para a magnetita pura) e granulometria menor que 45 µm, sendo que sua moagem é normalmente realizada na própria usina de beneficiamento (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Aplan, 1985).

O *ferrosilício* (FeSi) é o material mais empregado na preparação de meios-densos utilizados no beneficiamento de minérios, pois permite atingir densidades de até $3,9 \text{ g/cm}^3$. Ele consiste de uma liga de ferro e silício (normalmente com 14 a 16% de silício) e que contém uma pequena quantidade de carbono (tipicamente inferior a 1%) (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Collins e outros, 1974).

2.6.3. Separação em meio denso em laboratório

Nos testes de afunda-flutua uma determinada quantidade de minério em uma faixa de tamanho específica é introduzida em um líquido denso de densidade previamente selecionada, sendo a fração flutuada (densidade menor do que a do líquido) separada da fração afundada (densidade maior do que a do líquido). O procedimento é repetido sucessivamente utilizando-se o material afundado e líquidos de diferentes densidades, conforme apresentado na Figura 10 (CHAVES e FILHO, 2013).

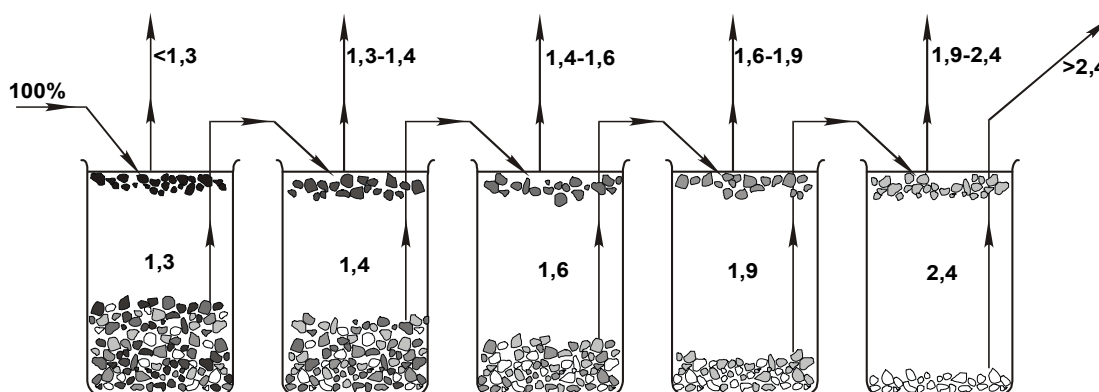


Figura 9: Esquema do teste afunda-flutua

Fonte: (Sampaio e Tavares, 2005)

Sampaio e Tavares,(2005) O número de intervalos de densidade depende de uma série de fatores, incluindo a disponibilidade de líquidos densos, custo, etc. Evidentemente, quanto maior o número de intervalos densimétricos, melhor será a caracterização densimétrica do material.

CHAVES e FILHO, (2013) Afirma ainda que finalizando o teste, os produtos obtidos são lavados cuidadosamente com solventes para remoção do líquido denso. Posteriormente, as amostras são secas, pesadas e analisadas quimicamente, sendo os resultados organizados conforme apresenta a tabela abaixo.

Tabela 3- Resultados de teste flutua-afunda para carvão

Densidade relativa	Frações		Unidades de cinzas	Unidades de cinzas acum.	Flutuado acumulado		Unidades de cz acum.	Afundado acumulado		Proporção flutuada acum. média (%)
	Massa (%)	Teor de cz (%)			Massa acum. (%)	Teor de cz (%)		Massa acum. (%)	Teor acum. (%)	
-1,3	7,9	3,8	0,30	0,30	7,9	3,8	28,00	100,0	28,0	4,0
1,3-1,4	29,7	7,0	2,08	2,38	37,6	6,3	27,70	92,1	30,1	22,8
1,4-1,6	30,1	15,4	4,64	7,01	67,7	10,4	25,62	62,4	41,1	52,7
1,6-1,9	8,8	35,8	3,15	10,17	76,5	13,3	20,98	32,3	65,0	72,1
1,9-2,4	11,6	69,4	8,05	18,22	88,1	20,7	17,83	23,5	75,9	82,3
+2,4	11,9	82,2	9,78	28,00	100,0	28,0	9,78	11,9	82,2	94,1
Σ	100,0		28,00							

Fonte: (Sampaio e Tavares, 2005) Adaptado

Este tipo de tabela fornece todos os dados obtidos a partir de um teste de afunda-flutua e suas informações podem ser utilizadas para construir as curvas de lavabilidade do minério ensaiado. É válido salientar que, apesar do exemplo dado anteriormente considerar os resultados de um teste de afunda-flutua de uma amostra de carvão (que corresponde ao mineral com o maior número de informações na literatura), ele é válido para qualquer substância mineral. (CHAVES e FILHO, 2013).

No ensaio de afunda-flutua, teoricamente não importa a granulometria das frações e por isto não seria necessário separar partículas de tamanhos diferentes. A realidade, porém, é diferente e, por razões operacionais, os ensaios são realizados em separado para frações específicas

De acordo com CHAVES E FILHO (2013), é importante frisar que, como regra geral, nunca se constrói a curva de lavabilidade para materiais finos ($<75\mu\text{m}$). Isto ocorre porque partículas finas não respondem bem à separação gravítica, de modo que essa informação seria de nenhuma valia. Além disto, as lamelas são extremamente defíceis para os processos densitários, pois por terem dimensões desprezíveis ficam em suspensão homogênea no líquido de separação, distribuindo-se aleatoriamente e contaminando os produtos. Ademais, alteraram a viscosidade do meio, prejudicando a separação das partículas mais grosseiras.

O principal problema dos testes de afunda-flutua está relacionado ao uso dos líquidos densos, substâncias estas, tóxicas, corrosivas e caras, que possuem elevado poder de volatilização e não são recicláveis. Ademais, o teste é bastante oneroso e demanda um controle cuidadoso em sua execução. Os líquidos densos mais utilizados e suas principais características são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Características dos principais líquidos densos

Líquido	Composição	Densidade (g/cm³)
Tricloroetano	CCL ₃ CH ₃	1,330
Triclorobrometano	CCL ₃ Br	2,001
Bromofórmio	CHBr ₃	2,860
Brometo de metileno	CH ₂ Br ₂	2,484
Tribromofluormetano	CB ₃ F	2,748
Tetrabromoetano	CHBr ₂ CHBr ₂	2,964
Di-iodeto de metileno	CH ₂ I ₂	3,325
Licor de Clerici	CH ₂ (COOTI) ₂ .HCOOTI	4,280

Fonte: CHAVES e FILHO, 2013

CHAVES e FILHO (2013), Salientam que outras densidades são obtidas mediante a utilização de um solvente adequado, como o tetracloreto de carbono (densidade 1,500g/cm³), acetona (densidade 0,788g/cm³), benzeno (densidade 0,879g/cm³) e álcool etílico (densidade 0,890g/cm³). Depois de utilizadas, as misturas são destiladas para recuperar o líquido denso. Como é possível observar, para separação de materiais com densidades mais elevadas, a única opção existente é o líquido de Clérici.

A solução de Clérici é extremamente venenosa ao contato e por ser rapidamente absorvida pela pele, pode causar dano ao sistema nervoso, rins, sistema digestivo e circulatório. Por isto, ao manusear o reagente, recomenda-se o uso de máscara de gás para evitar a inalação de seus vapores, além de roupas protetoras, óculos de proteção e luvas para evitar contatos com a pele (CHAVES e FILHO, 2013).

Tal fato limita a realização dos testes de afunda-flutua a materiais de densidades baixas como o carvão, o que impede a utilização desta valiosa ferramenta para uma vasta gama de minérios.

2.6.4. Densidade e reologia do meio denso

Além da densidade, as características mais importantes do meio-denso são a estabilidade e o comportamento reológico, as quais são inter-relacionadas. Estabilidade está associada à tendência dos sólidos formadores de sedimentarem, de modo que ela apresenta uma relação inversa com a velocidade de sedimentação dos sólidos sob a ação do campo dominante.

É geralmente recomendável que o meio apresente alta estabilidade. Caso contrário, se os sólidos sedimentam muito rapidamente, então separadores, tubulações e bombas serão soterrados e elevados gradientes de densidade existirão, tornando impossível uma separação precisa. Evidentemente, quanto maior a estabilidade da suspensão, menor a agitação necessária e menor a probabilidade de que partículas finas e outras com densidade próxima à do meio sejam deslocadas devido às correntes (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

Com isso, as propriedades inerentes a reologia de uma suspensão são influenciadas pelos seguintes fatores (CAMPOS *at al*, 2004):

- ✓ Viscosidade do meio fluido
- ✓ Concentração de sólidos;
- ✓ Tamanho e forma das partículas;
- ✓ Forças de interação entre as partículas.

O tipo de comportamento reológico do meio-denso determina a natureza da resistência oferecida ao movimento de uma partícula. Esta resistência pode ocorrer somente devido à viscosidade, como no caso de fluidos newtonianos, pseudoplásticos e dilatáveis, ou mais ainda devido à tensão de cisalhamento crítica, como no caso de fluidos de Bingham e pseudoplásticos com tensão crítica (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

Como se pode observar, com o aumento da concentração de sólidos ocorre o aumento da densidade da suspensão, contudo, na prática há um limite . Isso se deve a viscosidade da suspensão atingir o limite em que a fluidez do meio fica comprometida, dificultando a separação dos minerais, sendo assim, o limite da concentração de sólidos varia entre 70 e 86% em peso. Os minerais geralmente utilizados na preparação das suspensões são: barita, quartzo moído, magnetita moída, ferro-silício moído ou atomizado, chumbo atomizado e argilas (CAMPOS *at al*, 2004).

Características como a densidade, forma, distribuição granulométrica e propriedades físicas e químicas, como energia superficial, coercividade, permeabilidade e grau de oxidação afetam na reologia do meio, assim como, as características físicas e mineralógicas do meio influenciam as operações de meio denso. As propriedades hidrodinâmicas do material a ser separado em condições operacionais; as propriedades reológicas da suspensão sob condições operacionais; a granulometria do material a ser separado e a densidade do meio de separação; a viscosidade e o limite de escoamento da suspensão que idealmente devem ser o mais baixo

possível; a estabilidade da suspensão que deve ser a mais alta possível, são propriedades em que o desempenho de uma separação está relacionado (CAMPOS, et al, 2004).

Entretanto, mais importante que classificar o meio-denso quanto ao comportamento reológico, é estabelecer como a viscosidade aparente e a tensão crítica do fluido são afetadas pelas diversas variáveis operacionais do processo. (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

SAMPAIO e TAVARES (2005), afirmam ainda que, a viscosidade não é o único fator que deve ser levado em consideração na escolha da granulometria do meio-denso. A estabilidade da suspensão e a facilidade de recuperação do sólido também são fatores importantes. Considerando que concentrações volumétricas de sólidos entre 25 e 45% são normalmente utilizadas na indústria, a escolha da granulometria e da densidade deve ser feita de maneira a atingir a estabilidade necessária. Quanto mais grossos os sólidos, maior a taxa de sedimentação, menor a viscosidade do meio e mais fácil a recuperação do meio-denso. Por outro lado, quanto mais finos os sólidos, maiores a estabilidade e a viscosidade do meio e mais difícil será a sua recuperação.

2.6.5. Influência da reologia do meio denso na separação

(Sampaio e Tavares (2005), A concentração em meio-denso oferece uma alternativa mais direta e precisa, pois a separação é realizada em um fluido com densidade intermediária às dos constituintes que se deseja separar. Assim, existe uma diferença no sentido do vetor de velocidades de translação de diferentes partículas, o qual somente depende da partícula ser mais leve ou mais densa que o meio

A fim de se atingir uma alta precisão de separação em equipamentos de concentração a meio-denso, o material a ser separado deve ser capaz de se deslocar através da suspensão e reportar ao produto afundado ou flutuado. Caso alguma partícula for incapaz de realizar este movimento, permanecendo parada no meio-denso, a sua separação eficiente será impossível. Além disso, se a sua velocidade de sedimentação for muito reduzida, de maneira que a turbulência presente dificulta a sua separação, então a partícula será descarregada aleatoriamente.

Desta maneira, pode-se facilmente identificar pelo menos três motivos pelos quais a separação de dois materiais em um meio-denso com densidade intermediária pode não ocorrer perfeitamente:

- A existência de uma tensão mínima que a partícula precisa exercer a fim de iniciar o

movimento em fluidos não-newtonianos;

- O tempo insuficiente para a separação das partículas e o efeito da viscosidade na separação;
- A ação de correntes dispersivas que causam a remistura das camadas separadas, prejudicando a separação.

A influência da viscosidade na velocidade de sedimentação da partícula depende, essencialmente, do regime hidrodinâmico: enquanto partículas não sofrem qualquer influência da viscosidade no regime de Newton, aquelas que se deslocam no regime de Stokes sofrem influência significativa da viscosidade do meio.

Sampaio e Tavares (2005), afirmam que a fim de efetuar a sua separação em produtos com diferentes densidades, torna-se necessário controlar a velocidade de escoamento do fluido, o que faz com que esses processos sejam intrinsecamente dinâmicos.

Recomenda-se utilizar este método de concentração para minerais com densidade no intervalo de 0,4 a 19 g/cm³ e granulometrias mais grosseiras, variando entre 0,5 mm e 300 mm, para contribuir na eficiência do processo (PITA, 2004).

Sampaio e Tavares (2005) ressaltam que diversos aspectos das características físicas e reológicas de meios-densos influenciam no processo de separação, conforme é ilustrado resumidamente.

Diversos aspectos das características físicas e reológicas de meios-densos influenciam no processo de separação, conforme é ilustrado resumidamente na Figura abaixo

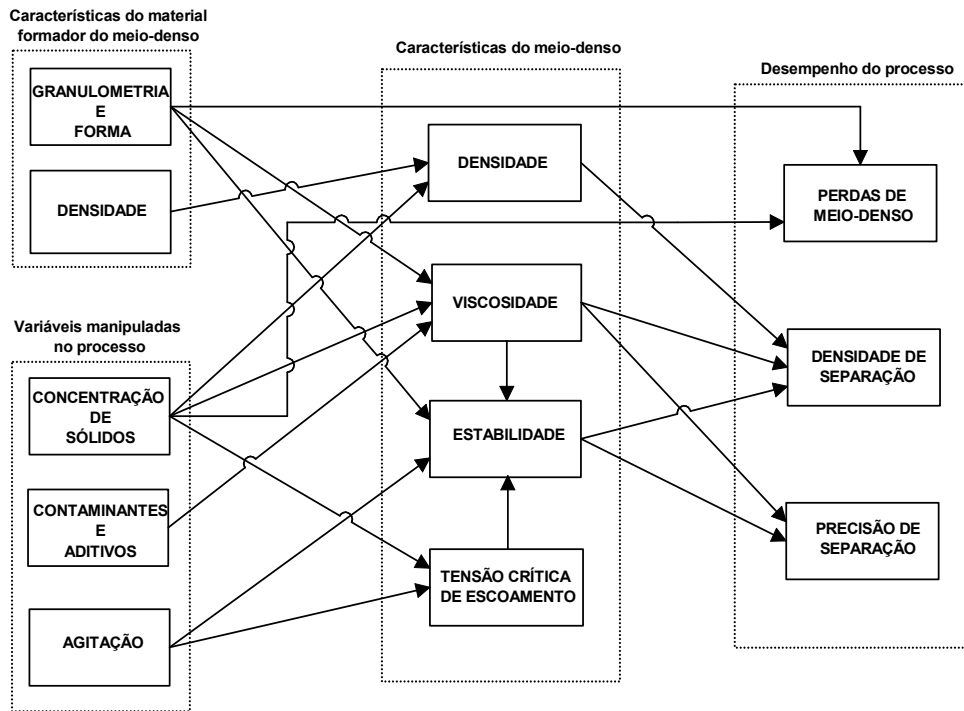


Figura 10: Influência das características do material formador do meio-denso e das variáveis do processo nas características do meio-denso e no desempenho do processo.

Fonte: (Sampaio e Tavares, 2005)

2.6.6. Princípio de separação em meio denso

A separação em meio denso pode ser estática ou dinâmica. A separação estática é realizada utilizando os equipamentos cone e tambor, enquanto a dinâmica utiliza ciclone e *dynawhirpool*. Na separação estática somente a força de gravidade é utilizada, enquanto na separação dinâmica, além da força da gravidade, atua, também, a força centrífuga. (Sampaio *at al*, 2007)

Para o meio estático, a separação dos minerais baseia-se na Equação abaixo:

$$F_g = M_p \cdot g - M_f \cdot g = (M_p - M_f) \cdot g \quad (3)$$

Onde:

F_g - força gravitacional; M_f - massa da polpa de meio denso;

M_p - massa da partícula; g - aceleração da gravidade.

F_g - força gravitacional; M_f - massa da polpa de meio denso;

M_p - massa da partícula; g - aceleração da gravidade.

A força gravitacional (F_g) poderá ser positiva ou negativa. Ela será positiva quando o peso da partícula ($M_p.g$) for maior do que o peso da polpa de meio denso ($M_f.g$) deslocada pela própria partícula, ou seja, a força de empuxo. Neste caso, a partícula afundará. Quando a força gravitacional for negativa, o peso da partícula ($M_p.g$) será menor do que o peso da polpa de meio denso deslocada ($M_f.g$) e, portanto, a partícula flutuará. Em meio dinâmico, a aceleração da gravidade é substituída pela aceleração centrífuga. Portanto, tem-se a Equação para a separação dinâmica:

$$F_c = (M_F - M_f) \left(\frac{V^2}{r} \right) \quad (4)$$

F_c - força centrífuga;

V - velocidade tangencial;

r - raio do ciclone ou *dynawhirlpool*

A superioridade da velocidade tangencial em relação à gravidade, ou seja, da força centrífuga com relação à gravitacional, permite maior capacidade aos ciclones e *dynawhirlpool*, bem como à separação do minério com granulometria mais fina.

2.6.7. equipamentos principais de meio denso

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. Neste último caso, a separação em meio denso é usada mais como etapa de pré - concentração (CAMPOS *et al*, 2010).

Sampaio e Tavares (2005), Nos separadores chamados estáticos, a força de campo dominante na separação do flutuado/afundado é a força da gravidade. Estes aparelhos são, basicamente, tanques nos quais o minério e o meio-denso são alimentados continuamente, ocorrendo a separação de um flutuado e um afundado.

Separadores estáticos a meio-denso devem apresentar algum tipo de mecanismo para elevar a fração que afunda, retirando-a do contato com o meio. Além disso, é também necessário que eles sejam dotados de algum dispositivo que permita agitar levemente a suspensão, a fim de melhor uniformizar a sua densidade ao longo de toda a altura do tanque.

Separadores estáticos a meio-denso apresentam elevada precisão de separação e desempenho muito pouco influenciado pelo tamanho de partícula, se comparado a separadores hidráulicos e pneumáticos. Entretanto, devido à agitação e à altura do separador, muitas vezes ocorre que as partículas mais finas e aquelas com densidades próximas à densidade do meio-denso (NGM), não tenham tempo suficiente de afundarem ou flutuarem. Isto está associado à sua baixa velocidade de sedimentação (ou até mesmo nula), causada pela elevada viscosidade e tensão crítica do meio. Assim, com a diminuição da granulometria da alimentação, diminui a precisão de separação, o que é ilustrado na Fig 11. Além do aumento do desvio provável médio (E_p), também é observado um aumento da densidade de separação com a diminuição do tamanho de partícula. (Sampaio e Tavares, 2005)

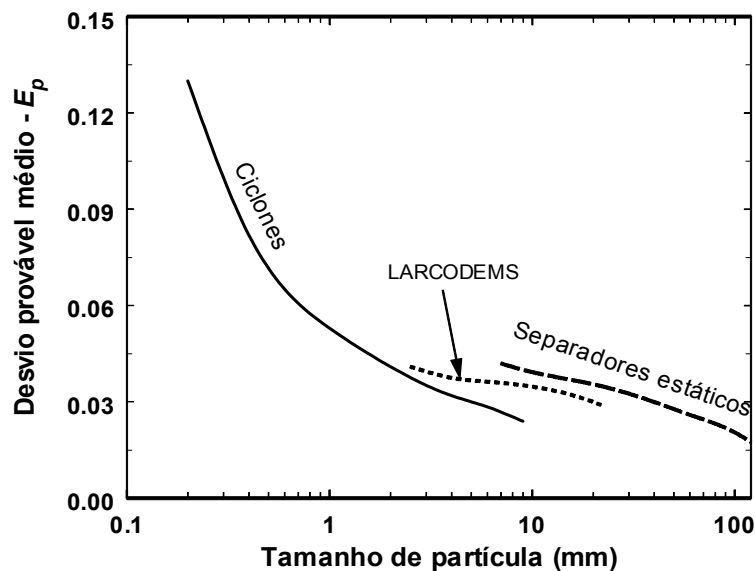


Figura 11: Efeito do tamanho de partícula no desvio provável médio em separadores a meio-denso estáticos e dinâmicos

Fonte: (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Osborne, 1988).

Uma característica importante da operação de separadores estáticos a meio-denso é a presença de algum tipo de corrente constante do meio, a qual tem o objetivo de:

- Manter as partículas do meio em suspensão;
- Prevenir a saturação do meio por partículas mistas (com densidades próximas ao meio - NGM);
- Permitir o transporte das partículas flutuadas para fora do separador.

Esta corrente ascendente gera uma diferença entre a densidade do meio e a densidade de separação (de corte). Quanto maior for a diferença, menor será o intervalo de tamanhos que pode ser separado efetivamente em um único equipamento. Portanto, os separadores estáticos a meio-denso mais precisos são aqueles que apresentam a menor corrente ascendente de fluido e a menor turbulência.

Para a inserção da alimentação e do meio denso nos equipamentos de separação estática pode-se fazê-la em recipientes de diversos formatos, quanto a remoção, o material que flutua é retirado por transbordo ou com a ajuda de pás, diferentemente do afundado, que necessita da criatividade no projeto do separador para ser removido, no qual, deve-se ater para evitar que o meio denso seja carregado juntamente com o produto afundado (PITA, 2004).

Em equipamentos onde a alimentação é feita na parte superior do separador, espera-se que a maior parte das partículas com baixa velocidade de sedimentação (sejam elas mistas ou de granulometria fina) seja descarregada junto ao flutuado e, em processos em que a alimentação é feita na parte inferior do equipamento, estes mistos e finos reportam ao material afundado.

Tratando de separadores dinâmicos devido à sua baixa velocidade de sedimentação, partículas finas são processadas com baixa precisão e afetam negativamente a capacidade de separadores estáticos a meio-denso (Sampaio e Tavares, 2005). Eles podem trabalhar em diversas situações, nas mais variáveis proporções de leves ou pesados, dependendo para o seu bom desempenho o dimensionamento adequado dos orifícios de entrada da alimentação e saída dos produtos (CAMPOS *at al*, 2004).

Uma alternativa é elevar a velocidade de sedimentação dessas partículas pelo aumento da aceleração do campo. O princípio pode ser aplicado de duas maneiras distintas: através da injeção tangencial de uma polpa (que contém o minério e o meio-denso) em um recipiente estacionário fechado (como um ciclone), ou pela introdução da polpa em um recipiente que gira a alta velocidade (como uma centrífuga). Enquanto o segundo encontra importantes aplicações na separação gravimétrica hidráulica, separadores dinâmicos a meio-denso são geralmente do primeiro tipo, os quais são capazes de gerar acelerações centrífugas até 40 vezes maiores que a da gravidade. (Sampaio e Tavares, 2005).

De modo geral, para a escolha de um equipamento tanto de separação estática quanto dinâmica, irão depender dos seguintes fatores (CAMPOS *at al*, 2004).

- Capital disponível;
- Espaço requerido para a instalação;
- Tamanho máximo da partícula a ser tratada;
- Capacidade de alimentação;
- Densidade de separação.

2.7. CICLONES DE MEIO DENSO

2.7.1. Princípio de funcionamento

Os ciclones de meio denso geralmente são aplicados no beneficiamento de minérios e de carvões e permitem tratar minérios de fina granulometria, podendo mesmo ser utilizado para purificar carvão com calibre inferior a 0.5mm (PITA, 2004).

SAMPAIO E TAVARES (2005), Ele é formado por duas seções justapostas, uma cilíndrica e uma cônica. No extremo da seção cilíndrica encontra-se um tubo, denominado *vortex finder*, através do qual o produto leve é retirado. Por outro lado, no extremo da seção cônica, um orifício, chamado *apex*, permite a retirada do produto denso. A alimentação do meio-denso e do minério é realizada por meio de um tubo posicionado tangencialmente ao corpo do ciclone (Fig 13) e próximo ao topo da seção cilíndrica.

A alimentação e o meio denso são introduzidos, tangencialmente e sob pressão no ciclone, o qual idealmente é instalado em posição inclinada, tal como se observa na figura 13, possibilitando que a alimentação seja feita por gravidade, de uma determinada altura manométrica. No caso dos ciclones DSM (Dutch State Mines), esta altura é de aproximadamente nove vezes o diâmetro do ciclone (PITA, 2004).

Ciclones com alimentação por gravidade são mais adequados à separação de materiais friáveis, os quais podem ser excessivamente degradados pela ação do bombeamento, ou ainda na separação de materiais muito abrasivos, que resulta em desgaste significativo de bombas e tubulações. Ela também apresenta a vantagem da economia de energia, uma vez que dispensa a operação de bombeamento (Sampaio e Tavares *apud* Osborne, 1988). Por outro lado, quando a alimentação é realizada por bombeamento, a configuração do circuito é mais simples e o pé direito da usina mais reduzido, uma vez que a peneira de deslamagem pode ser instalada no mesmo nível do ciclone, resultando em menores custos de investimento (Sampaio e Tavares, 2005).

A separação de partículas dentro de ciclones se dá pelo seu movimento relativo ao meio-denso como resultado da ação das forças centrífuga, de empuxo e de arraste. As partículas mais densas, que sofrem mais intensamente a ação da força centrífuga, se dirigem para próximo das paredes do equipamento, se movendo, então, ao longo da parede do ciclone e sendo descarregadas pelo orifício do *underflow*. O material mais leve, que sofre a ação intensa do empuxo, migra em direção à porção mais central do ciclone, sendo apanhado pela espiral ascendente para ser descarregado através do *vortex finder*.

Uma particularidade destes equipamentos é que devido a alta força centrífuga empregada possibilita a separação de partículas com granulometrias mais finas do que outros métodos gravíticos (PITA, 2004).

Em ciclones a meio-denso típicos, a força centrífuga que atua nas partículas na parte cilíndrica do ciclone é cerca de 20 vezes maior que a força gravitacional. Na parte cônica destes, a velocidade tangencial aumenta conforme a Equação 5, contribuindo para um aumento da força centrífuga e uma separação mais precisa. Inclusive, no orifício de descarga do ciclone (*apex*) a força centrífuga pode alcançar uma magnitude de cerca de 200 vezes a força da gravidade.

$$u_t r^n = \text{constante},^1 \quad (5)$$

sendo n uma constante.

¹ A relação entre a velocidade tangencial do fluido e o raio do equipamento é dada por (Bradley, 1965):

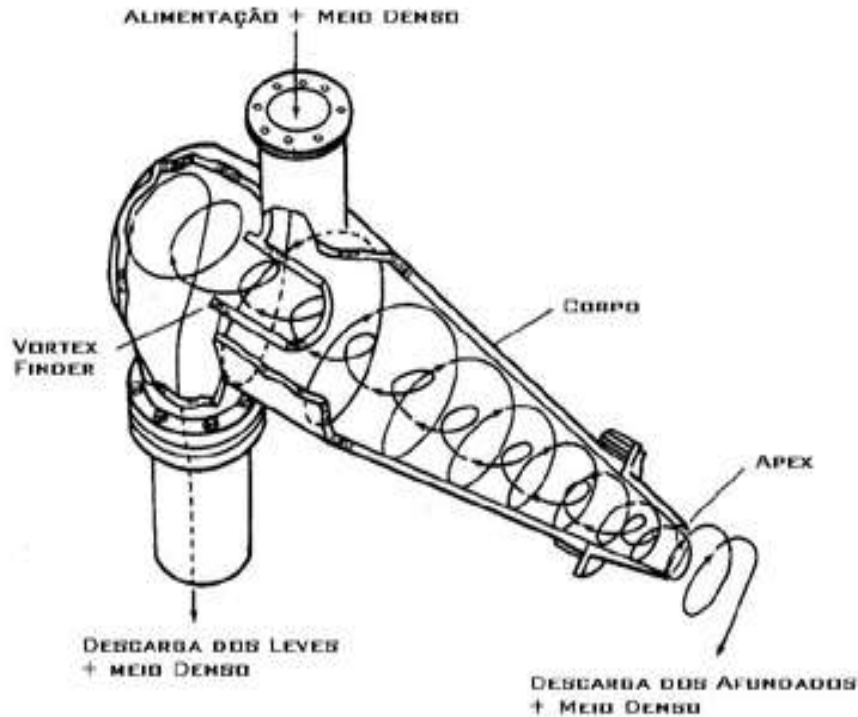


Figura 12: Diagrama esquemático de um ciclone a meio-denso:

Fonte: (Campos *at al*, 2010)

A dinâmica do ciclone de meio denso é complexa e diversas variáveis afetam a separação, tais como: (Aquino e Oliveira, 2007)

- 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.

2.7.2. Desempenho das operações de separação do Ciclone em meio denso

Segundo King (2001), nenhum classificador opera perfeitamente e não divide uma população de partículas em duas frações 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*.

A precisão de separação de ciclones a meio-denso é, em geral, comparável à de separadores estáticos a meio-denso, com valores de desvio provável médio variando entre 0,03 e 0,06 g/cm³, para o beneficiamento de carvão no intervalo de 50 a 0,5 mm (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Osborne, 1988).

Para além da granulometria, Figura 13, o diâmetro do ciclone exerce uma influência significativa na precisão de separação, especialmente no processamento de material fino. O aumento da precisão de separação com a diminuição do diâmetro do ciclone está associado ao aumento da força centrífuga (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Mengelers, 1982).

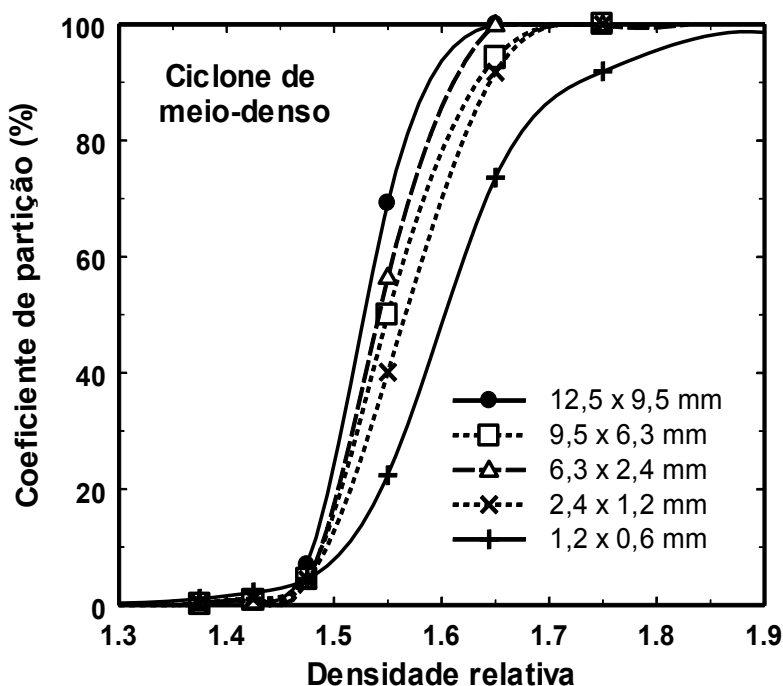


Figura 13: Efeito do tamanho de partícula na curva de Tromp de ciclones a meio-denso

Fonte: (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Derbrouck e Hudy, 1972).

2.7.3. Controle e avaliação

Para CAMPOS, *et al* (2004), 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).

SAMPAIO E TAVARES (2005), Embora úteis no controle de rotina de processos, o rendimento, a recuperação e o teor do produto são de utilidade muito limitada quando é necessário avaliar de maneira objetiva a eficiência de processos de concentração gravimétrica. Medidas de eficiência são especialmente úteis na análise comparativa do desempenho de diferentes usinas, na verificação de garantias de desempenho oferecidas por fabricantes de equipamentos durante o projeto e a posta-em-marcha de usinas, assim como na identificação de fontes de imprecisão no processo, permitindo a sua otimização.

De maneira geral os circuitos de meio denso normalmente apresentam as etapas de :

- Preparação da alimentação;
- Separação dos produtos flutuado e afundado no equipamento de concentração;
- Recuperação do material formador do meio-denso dos produtos separados;
- Regeneração da polpa de meio-denso.

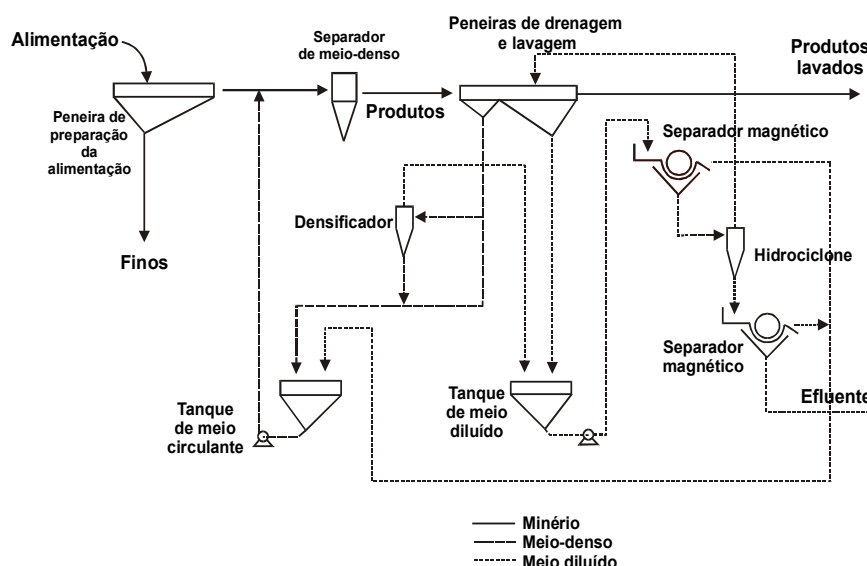


Figura 14: Etapas de um processo de concentração a meio-denso:
Fonte: Cocker *apud* Sampaio e Tavares(2005).

SOUZA (2013), A alimentação deve ser peneirada para a remoção de finos e lamas antes de alimentar o separador, ela deve ser molhada para prevenir que bolhas de ar aderidas a alguma partícula alterem a sua densidade. É necessário desaguar os produtos, flutuado e afundado, e recuperar o sólido que forma o meio denso, afinal, ele é um contaminante que pode prejudicar a qualidade do concentrado.

2.8. EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO

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.

Nos critérios chamados dependentes O emprego das principais fórmulas de eficiência requer que o rendimento do processo seja conhecido. No caso do beneficiamento de carvão, por outro lado, a qualidade dos produtos é avaliada pela proporção de resíduo após a calcinação, conhecido como o teor de cinzas.

considerando que o rendimento do concentrado (Y_c) é determinado tal que $Y_c + Y_r = 1$ e que $Y_c T_c + Y_r T_r = T_a$, representado pelo esquema abaixo, tem-se: (Sampaio e Tavares, 2005)

$$Y_c = \frac{T_r - T_a}{T_r - T_c} \times 100 \% \quad (6)$$

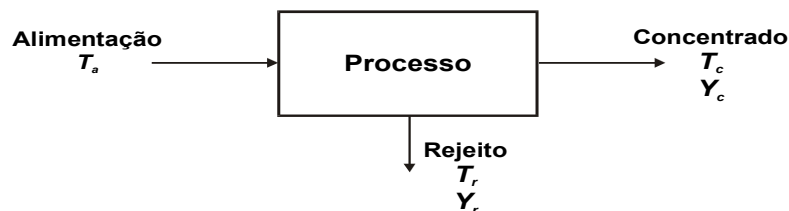


Figura 15: Diagrama esquemático de separação em dois produtos

Fonte: Sampaio e Tavares(2005)

As fórmulas de eficiência de separação básicas comparam os resultados reais obtidos, com aqueles de uma análise de afunda-flutua da alimentação. Exemplos são as eficiências de recuperação e de separação.

A eficiência de recuperação, também denominada eficiência orgânica no beneficiamento de carvão, é definida como a razão entre o rendimento do concentrado (Y_c) e o rendimento teórico (Y_c^*), sendo dada por (Fraser *at al* 1923 *apud* Sampaio e Tavares, 2005)

$$\text{Eficiência de recuperação} = \frac{Y_c}{Y_c^*} \times 100\% \quad (7)$$

O rendimento teórico (Y_c^*) representa, essencialmente, a proporção de material flutuado (no caso em que o concentrado é o produto flutuado) ou afundado (no caso em que o concentrado é o afundado) com mesmo teor que o concentrado. Ele é, geralmente, estimado por interpolação da curva dos afundados ou flutuados

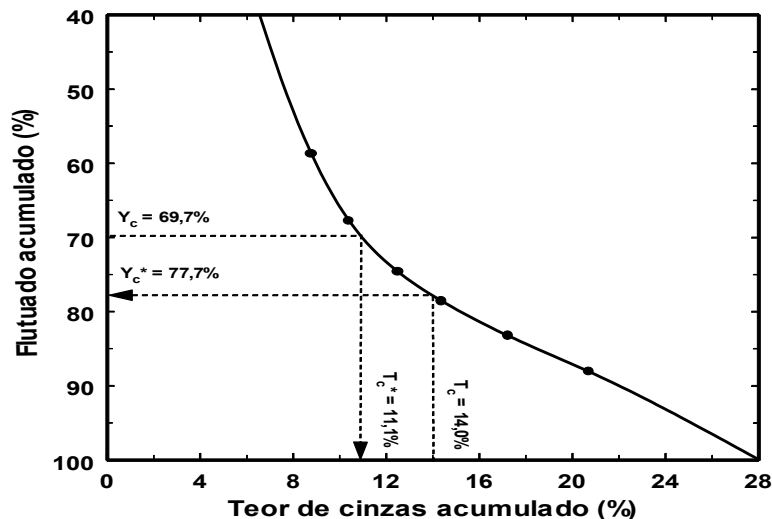


Figura 16: Curva ilustrando a determinação do rendimento e do teor de cinzas teórico do concentrado de carvão.

Fonte: Sampaio e Tavares, 2005

A eficiência de separação é baseada na diferença entre a recuperação de mineral de interesse e a de mineral de ganga no concentrado (Sampaio e Tavares, 2005 *apud* Schulz, 1970). Esta forma de eficiência de separação, muito usada em beneficiamento de minérios, é calculada pela expressão (Campos *at al*, 2004).

$$E(s) = \frac{rv - rg}{rv} \times 100\% \quad (8)$$

Onde:

- E(s) = eficiência da separação;
- rv = recuperação metalúrgica do mineral útil;
- rg = recuperação metalúrgica da ganga.

Embora existam muitas formulas já propostas para avaliar o desempenho de processos de separação gravimétrica a *International Standards Organization* (ISSO Satandard, 1975) estabeleceu para o beneficiamento gravimétrico de carvão , que os seguintes conceitos devem ser usados em conjunto na avaliação do desempenho (Osborne, 1988):

- A eficiência de recuperação ou o erro de teor (ou de cinzas);
- O material deslocado em cada produto;
- A densidade de separação;
- O desvio provável médio (E_p);

Os critérios independentes da performance caraterístico de uma unidade de beneficiamento não dependem significativamente da composição densimétrica do carvão, da alimentação ou da densidade de separação. Estes critérios são derivados da curva de partição de aparelho de concentração, também conhecidas como curvas de Tromp (Rubio, 1988).

2.8.1. Grau de eficiência

Se a recuperação em massa for encontrada para cada partícula de tamanho “x” da alimentação, é definida uma função que é normalmente independente da distribuição granulométrica dos sólidos, a qual é constante para determinadas condições operacionais. A função, ou curva assim obtida, tem o formato de um “S”, quando representada graficamente em função do diâmetro da partícula.

Esta curva é conhecida como a curva de Tromp, também conhecida como curva de partição, curva de erro, ou ainda como curva de distribuição de massa, que relaciona o coeficiente de partição (correspondente à percentagem do material da alimentação de cada densidade que reporta ao produto afundado) com a densidade , como representa a figura abaixo (SAMPAIO E TAVARES, 2005)

Este conceito foi desenvolvido por Tromp em 1937 e aplicado por Terra, em 1938.

Posteriormente foi aprimorado, descrevendo satisfatoriamente a classificação ao atribuir a cada classe de tamanho uma probabilidade que a partícula se dirija para a fração grossa (Lima,1998).

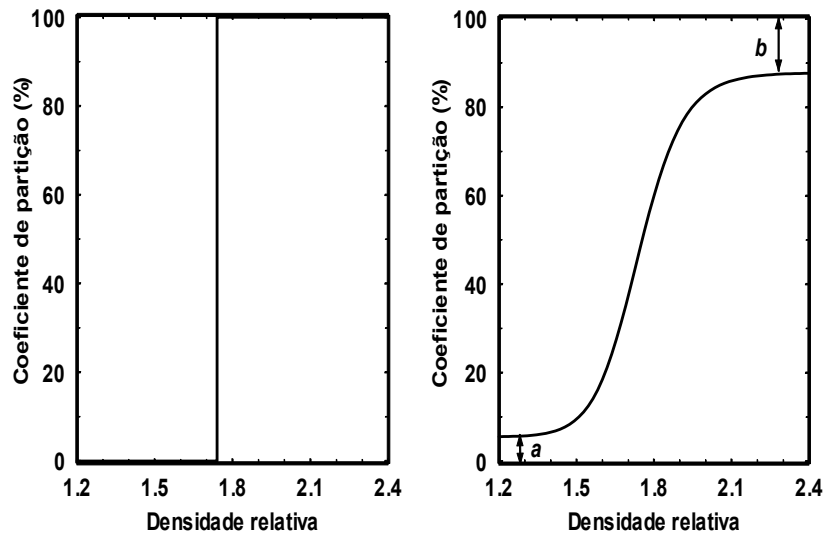


Figura 17: Curvas de partição relativas a uma separação ideal (esquerda) e real (direita)

Fonte: (Sampaio e Tavares, 2005)

Segundo Sampaio e Tavares (2005), A construção da curva de Tromp pode ser obtida tanto a partir das análises densimétricas dos produtos, quanto a partir do uso de traçadores densimétricos. A técnica mais precisa para medir distribuições densimétricas é a separação por afunda-flutua e para que ela forneça dados úteis na montagem da curva de Tromp, é essencial que os produtos dos provenientes dos equipamentos sejam fracionados nas mesmas densidades e ao longo do mesmo intervalo, de modo a evitar a necessidade de interpolação dos resultados.

Sampaio e Tavares, 2005, Afirnam ainda que além das distribuições densimétricas dos produtos, a montagem da curva de Tromp também requer o conhecimento do balanço de massas do processo. Este pode ser determinado pela pesagem dos produtos ou – mais usualmente – pelo balanço metalúrgico.

Assim, segundo Souza et al (2004), “A análise das curvas de partição é uma maneira simples e confiável de compreender os mecanismos de separação, dando suporte tanto aos modelos empíricos quanto aos modelos físicos”. Aliadas com a caracterização da alimentação, as curvas de partição fornecem resultados essenciais para controle do processo podendo ser utilizados a distribuição granulométrica das espécies presentes, o teor global e teor por faixa de tamanho, além da distribuição mássica dos produtos, como dados de entrada.

O rendimento do concentrado pode ser estimado usando a Equação 9. Inicialmente, a distribuição densimétrica da alimentação reconstituída é calculada a partir do balanço de massas e das distribuições densimétricas dos produtos. Em seguida, tomando-se cada fração densimétrica individualmente, os coeficientes de partição são calculados pela razão entre a proporção em cada classe de densidades que reporta ao produto denso e a proporção presente na alimentação. No caso em que o produto denso é o rejeito, os coeficientes de partição (R_i) são calculados por:

$$R_i = \frac{(Y_r)m_{rl}}{(Y_c)m_{cl} + (Y_r)m_{rl}} \times 100\% \quad (9)$$

2.8.2. Densidade de separação (ρ_{50})

A densidade de separação representa a densidade na qual uma partícula presente na alimentação tem a mesma probabilidade de reportar ao produto afundado ou flutuado. Na curva de Tromp, a densidade de separação é a densidade na qual o coeficiente de partição é 50%. A densidade de separação é uma importante variável de controle do processo. Na figura 19, a densidade relativa de separação (ρ_{50}) é 1,79, para esta situação específica segundo (Sampaio e Tavares, 2005)

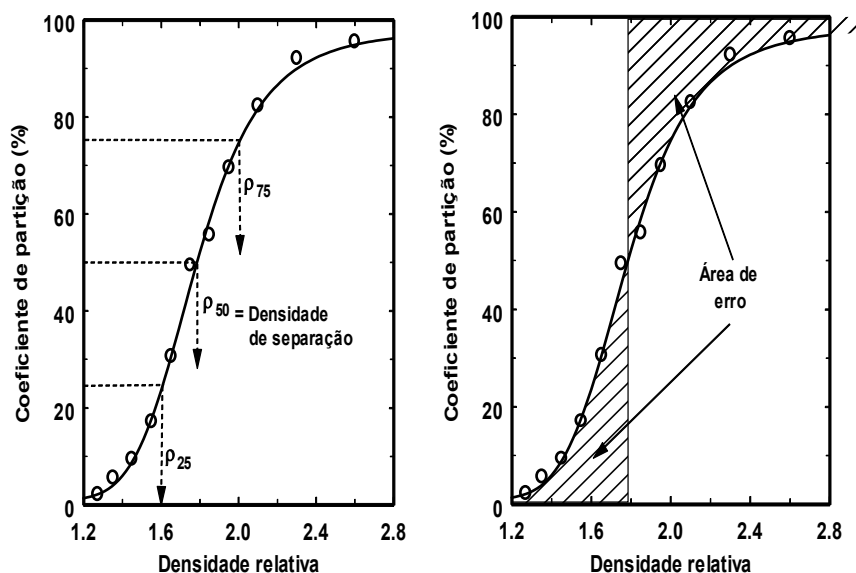


Figura 18: Curvas de Tromp mostrando os índices de avaliação de desempenho independentes

Fonte: Sampaio e Tavares, 2005

2.8.3. Índices de precisão

Diâmetro de corte não descreve bem o processo de separação, uma vez que diferentes separações podem apresentar o mesmo valor do (ρ_{50}) (Lima, 1998). Portanto é necessário outro parâmetro para definir melhor a eficiência da separação. Este parâmetro pode ser definido de diferentes formas, algumas vezes como a tangente à curva de eficiência, no diâmetro de corte, ou mais frequentemente, como a razão de dois tamanhos correspondentes a duas porcentagens diferentes sobre a curva do grau de eficiência em ambos os lados do (ρ_{50}).

2.8.4. Erro provável médio (Epm)

É o critério que representa a precisão de separação. É uma medida do desvio da curva de partição em relação a curva de separação perfeita. Numericamente pode ser calculado como pelas equações (Rubio, 1988),

$$Epm = D50 - D75 \quad (10)$$

OU

$$Epm = \frac{\rho_{25} - \rho_{75}}{2} \quad (11)$$

Quanto menor o Epm , maior a precisão de separação, de modo que uma separação perfeita resultaria em desvio provável nulo. O Epm varia tipicamente entre 0,02 para os equipamentos mais precisos (como separadores a meio-denso), e 0,3 para aqueles de menor precisão (como hidrociclones autógenos) (Sampaio apud Derbrouck e Hudy, 1972; Derbrouck, 1974).

2.8.5. Imperfeição do corte

Representa o coeficiente angular da reta que une os pontos cuja partição é 25% e 75%. Quanto mais próximo de zero o valor de $I_{25/75}$, melhor a eficiência do processo (Lima, 1998).

A imperfeição leva em consideração a influência da densidade de separação na curva de Tromp, pois quanto mais alta a densidade de separação, maior é o desvio da curva de partição real em relação à ideal. Isto se deve ao fato de que o ajuste da densidade de separação é tão difícil quanto maior a diferença em relação ao meio.

O cálculo diferenciado da imperfeição de equipamentos que utilizam água e meio-denso na separação sugere que o corte em separadores hidráulicos (jigues, mesas, espirais,

etc.) a altas densidades é mais difícil que nos a meio-denso. Os valores de imperfeição variam tipicamente entre 0,015 e 0,6 (Sampaio e Tavares, 2005)

A equação usada para equipamentos de separação em meio-denso é dada por (Sampaio e Tavares, 2005 apud Aso, 1950)

$$I = \frac{E_{pm}}{\rho_{50}} \quad (12)$$

enquanto que a equação para equipamentos de separação hidráulica é dada por

$$I = \frac{E_{pm}}{\rho_{50} - 1} \quad (13)$$

Alguns valores de imperfeição de equipamentos empregados em beneficiamento gravimétrico estão abaixo listados (Rubio, 1988),

- Ciclones de meio denso: 0,01 a 0,03
- Tanques de Meio Denso: 0,02 a 0,05
- Jigues : entre 0,08 a 0,3
- Mesa concentradora: 0,13 a 0,17

2.8.6. Fatores que influenciam a curva de partição

Segundo Rubio (1998) afirma que entre os principais fatores que definem a curva de partição (isto é, a sua forma) destacam-se:

a) Tipo de equipamento: Em beneficiamento de carvão, o carvão (sua qualidade) fica definido pela sua curva densimétrica e o equipamento fica definido pela sua curva de partição. Assim em função das características do próprio equipamento, os diversos processos apresentam uma maior ou menor imperfeição ou desvio de lavagem ótima.

b) Densidade de separação: A densidade operacional (corte) de determinado aparelho pode mudar o formato da curva de partição resultando diferentes curvas para várias densidades.

c) Granulometria de Alimentação: Cada fração granulométrica de carvão tem sua própria e única curva de partição. Como separação gravimétrica é baseada em diferenças de tamanho e densidade, as frações mais finas de carvão são beneficiadas menos eficientemente do que as frações graúdas. Deste modo, a imperfeição do aparelho aumenta para as frações mais fina.

2.9. A VALE

A Vale é uma mineradora global com sede no Brasil e atua em mais de 30 países, em cinco continentes, produzindo e comercializando minério de ferro, pelotas, níquel, concentrado de cobre, carvão, bauxita, alumínio e outros minerais. A missão da Vale de transformar recursos minerais em riqueza e desenvolvimento sustentável orienta as suas ações no relacionamento com todos os parceiros e na gestão dos impactos das suas atividades, acreditando na sua responsabilidade na procura do desenvolvimento sustentável. A Vale iniciou suas atividades em Moçambique em 2004, quando venceu o concurso internacional para o estudo de viabilidade do Projeto Carvão Moatize. Naquela época, a Vale ainda era conhecida internacionalmente como Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), e em Moçambique, respondia por sua razão social “Rio Doce Moçambique Lda”, e adoptava o nome: “RDMZ”. A partir de 2007, a Companhia Vale do Rio Doce adoptou o nome “Vale”, e em 2009 alterou sua razão social para: Vale S.A. Ainda em 2009, dado o novo posicionamento do grupo Vale, a Rio Doce Moçambique Lda, alterou sua razão social para Vale Moçambique Limitada, e passou também a adotar o nome o nome: Vale. A Vale em Moçambique vem desde então cumprindo o seu papel, pautada por uma atuação socioambiental responsável, e potencializando o desenvolvimento das comunidades.

Em sintonia com os objetivos do Governo de Moçambique, a Vale está a desenvolver a jazida carbonífera de Moatize como parte fundamental de sua estratégia de diversificação, que inclui: (i) tornar-se um importante fornecedor mundial de carvão metalúrgico; (ii) firmar-se na África como uma empresa mineradora de grande porte; (iii) fortalecer sua posição de parceria com o Governo de Moçambique nos campos de mineração, infraestrutura logística e energia (Aurecon, 2010)

2.9.1. FLUXOGRAMA DA USINA

A usina de beneficiamento de carvão mineral instalada na planta I, tem seus processos divididos em 4 (quatro) etapas: Planta de britagem, circuito de finos, circuito de Grossos e desaguamento. Este trabalho irá abordar de forma aprofundada no circuito de grossos. Os dados abaixo foram fornecidos pela carbonífera Vale-Moatize (Vale-Moatize, 2016)

2.9.2. Britagem e classificação

A Vale Moçambique, em sua unidade industrial, beneficia carvão mineral *run of mine* (bruto). Nesse processamento são produzidos dois produtos, Carvão metalúrgico com 10,5% de cinzas e 10% de umidade e carvão térmico com teor de cinzas entre 20-24,9%; a usina de beneficiamento com uma capacidade nominal de 4000 t/h, está constituída por 4 módulos, *Dmc*, espirais e circuito de flotação projetado para receber 1000 t/h de ROM de carvão.

Partículas finas são geradas primeiro no momento do processo de desmonte empregado na lavra como também são gerados no processo de britagem, compondo um montante de finos (partículas abaixo de 1 mm).

A unidade de transformação consiste em *ROM* que sai da mina com uma granulometria de 1200 mm e é encaminhado para uma britagem primária (britadores a rolos dentado) cujo o material britado e reduzido em ate 250 mm. O carvão da britagem primaria segue para britagem secundária (britador a rolos dentados) onde o é reduzido em ate 125 mm. O carvão da britagem secundária é submetido a um processo de classificação em peneiras de 50 mm. O oversize (+50 mm) da peneira segue a britagem terceária (britador a rolos lisos), enquanto que o undersize (-50 mm) junta-se com o carvão da britagem terceária (-50 mm) seguindo desta forma para o CHPP antecedidos por um dectetor de metal. A figura 19, mostra o circuito de britagem da mineradora.

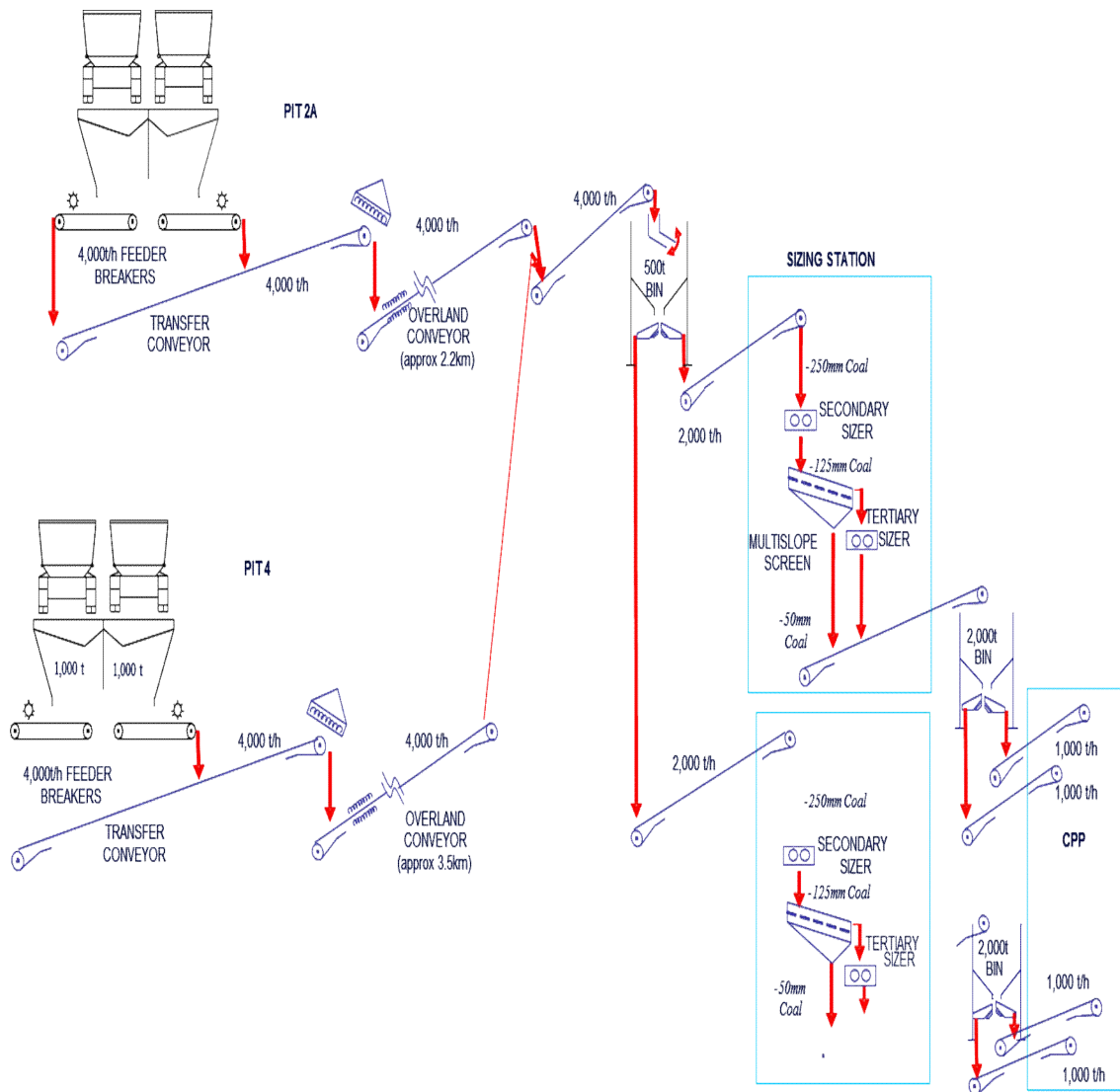


Figura 19: Circuito de britagem na alimentação

Fonte: Vale Moçambique, (2016), Modificado

2.9.3. Fluxograma de circuito de finos

Resumidamente o circuito de finos é composto pelas espirais (-1 mm + 25 mm) e a flotação (- 0,25 mm).

Cada módulo da CPP tem um circuito de espiral composta de quatro (4) bancos de espirais. Dentro de cada banco há oito (8) colunas de espirais. O produto a partir das espirais é encaminhado para o tanque (*Spiral Product Sump*) e em seguida é bombeado para os ciclones desaguadores.

A tecnologia de colunas de flotação instalados na mina Vale-Moatize visa produção de carvão coqueificável.



Figura 20: Circuito de espirais

Fonte- Vale Moçambique, (2016).

2.9.4. Ciclones de meio denso da Vale Moçambique

O carvão é conduzido na vazão mássica de 4000 t/h para um silo alimentador responsável pela alimentação de todo o circuito iniciando por uma peneira curva de 18 mesh, sendo o undersize (-1 mm) encaminhado a um tanque do Circuito de finos.

O retido da peneira (-50 mm +1 mm) são descarregados em tubos de grande diâmetro e liberados para o *Pre-Scalp Dense Medium Cyclone*. Este ciclone serve para separar o carvão do rejeito com a densidade de $1,500 \text{ g/cm}^3$, e é operada com um nível do reservatório entre 40 a 60%. O nível do reservatório é mantido, fornecendo meio correto suficiente para exceder as exigências da bomba de alimentação.

O carvão separado com densidade acima de $1,500 \text{ g/cm}^3$ é considerado rejeito final e o carvão com densidade menor ou igual a $1,500 \text{ g/cm}^3$ é o produto bombeado para o segundo ciclone.

O processo de concentração do segundo ciclone, apesar da semelhança na operação difere apenas no teor de corte. O concentrado do primeiro Ciclone é alimentado no segundo

ciclone *Coking, Dense Medium Cyclone* onde ocorre a separação do carvão coque e térmico usando densidade de $1,340 \text{ g/m}^3$.

O carvão acima desta densidade é o térmico, sendo transportado para as peneiras do carvão térmico para separar do meio denso e o produto passa para as centrifugadoras para a secagem. O carvão com densidade igual ou abaixo de $1,340 \text{ t/m}^3$ é o carvão metalúrgico que é transportado para as peneiras do carvão metalúrgico onde também ocorre a retirada do meio denso (magnetita), o produto passa para as centrifugadoras para a secagem.

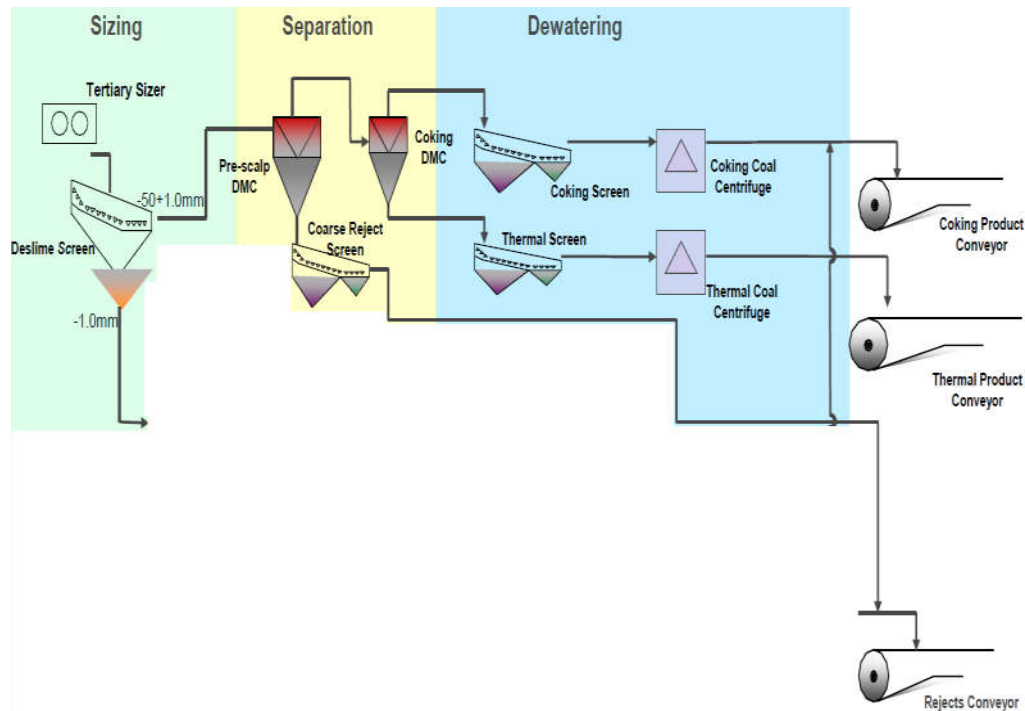


Figura 21: Circuito de separação de meio denso da Vale-Moatize

Fonte: Vale Moçambique, (2016), adaptado.

Para o bombeamento de meio denso (Magnetite) existe um nível de controle da densidade, e quando este nível baixa é necessário ser bombeada o meio denso para dentro do sistema a partir do tanque de magnetite com uma densidade de $1,7 \text{ t/m}^3$. Isso pode ser direcionado para o *Pre-scalp Correct medium sump* ou *coking correct medium sump* via caixa do divisor, como forma de recuperar a densidade de carvão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental deste trabalho consistiu na avaliação dos ciclones de meio denso equipamento de beneficiamento Gravimétrico que opera na Província de Tete-Moatize, na camada Chipanga, Figura 22. Os Dados são da mineradora Vale- Moatize e as suas análises foram realizadas no LAPROM - Laboratório Processamento Mineral da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

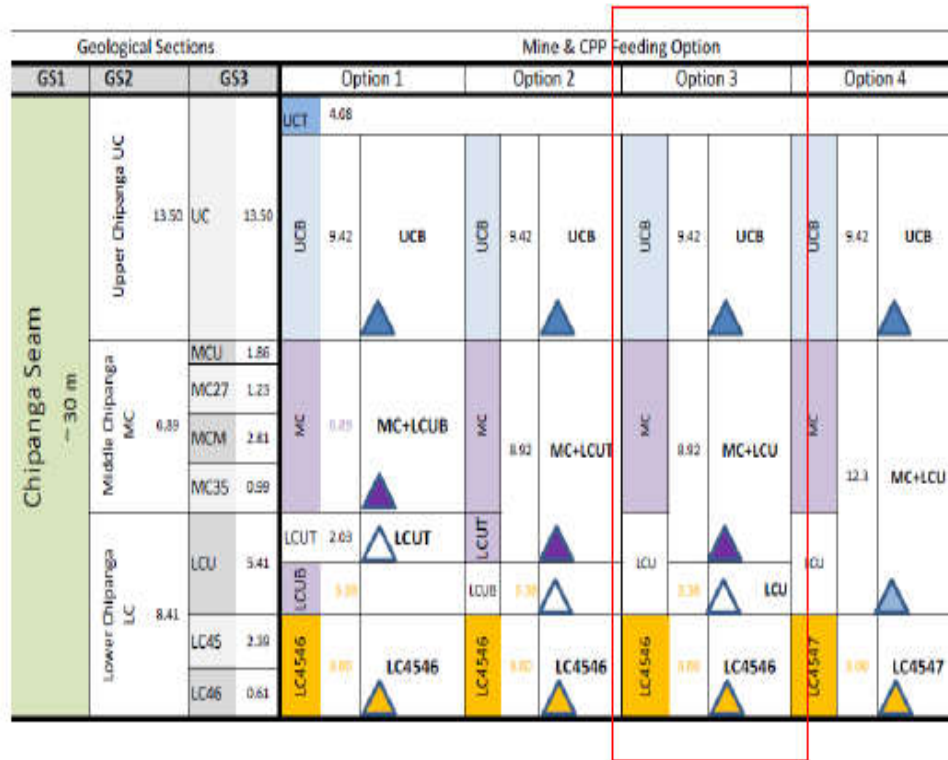


Figura 22: Representa a composição da camada Chipanga em exploração pela mineradora

Fonte- Vale-Moçambique, (2016)

3.1. AMOSTRAGEM

Com o intuito de avaliar a eficiência de ciclones a meio denso da mineradora Vale-Moatize, A empresa forneceu ao Laboratório Processamento Mineral (LAPROM), cerca de 76kg de amostra de carvão concentrado e rejeito proveniente da usina de beneficiamento. Foram medidas as massas e os teores da alimentação através de balanço de massas.



Figura 23: A figura (a esquerda) ilustra ciclones de meio denso de onde foram colhidas as amostras e a figura (a direita) ilustra as amostras recebidas pela mineradora.

Fonte: Autoria Própria, 2016 – LAPROM-UFRGS

3.2. HOMOGENIZAÇÃO

Cada uma das amostras recebidas, foi colocada durante 24h em uma estufa a 60°C para secar, ou foram, retirar o excesso de umidade e facilitar o peneiramento.



Figura 24: Ilustra as amostras do carvão concentrado em Ciclones da Vale-Moatize

Fonte: Autoria Própria, 2016 – LAPROM-UFRGS

Em seguida foram homogeneizadas e quarteadas em Quarteador Jones Modelo 1260 de modo a se obter a melhor mistura e representatividade possível do material a ser analisado.



Figura 25: Ilustra o quarteador Jones usado no trabalho

Fonte: Autoria Própria, 2016 – LAPROM-UFRGS

3.3. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

3.3.1. Classificação granulométrica

Para a realização da classificação granulométrica do material, foi utilizado peneira e um agitador mecânico de peneiras. Após a secagem em estufa em torno de 12 horas, a amostra foi transferida para uma peneira de 1mm, previamente montada.

Tanto o rejeito como o concentrado do ciclone do meio denso foi peneirado, para a retirada do material abaixo de 1 mm de modo a facilitar a etapa do afunda-flutua. A amostra foi depositada na peneira e sofreu uma agitação constante de até 2min até que as partículas menores passassem da malha.



Figura 26: Ilustra peneiras sobre um agitador mecânico

Fonte: Autoria Própria, 2016 – LAPROM-UFRGS

3.4. ANÁLISES DENSIMÉTRICAS

A separação por meio denso das amostras (afunda-Flutua) foram realizadas conforme a NBR 8738 (ASTM, 1984b) nas densidades 1,30; 1,40; 1,50; 1,60; 1,70; 1,80; 1,90; 2,0 e 2,2 g/cm³. O objetivo do procedimento foi obter dados para traçar as curvas de separabilidade densimétricas.

Os líquidos densos orgânicos utilizados nos ensaios foram o tribromometano (também denominado por bromofórmio) com densidade relativa de 2,89 g/cm³ e com fórmula química CHBr₃, tetracloroetileno (ou percloroetileno) com densidade relativa de 1,61 g/cm³ com a formula química C₂Cl₄.

Para diluição dos líquidos densos, com intenção de se obter densidades relativas desejadas utilizou-se o solvente orgânico Xileno (C₈H₁₀), de densidade relativa de 0,89 g/cm³. A preparação de meio denso se dava, quando necessário, através de misturas destes líquidos. Após a preparação do meio denso foram realizados ensaios de afunda-flutua em todas as amostras. Para a realização destes ensaios foram utilizados os seguintes materiais: Funil,

papel filtro, béquer, estufa disponível no LAPROM, dessecador, densímetro, Bastão de vidro, capelas Quimis.

As amostras foram quarteadas, reduzindo as mesmas a uma massa de aproximadamente 500 g cada uma. Cada amostra foi imersa inicialmente no recipiente contendo o meio denso de menor densidade, neste caso o meio denso com densidade relativa de 1,3 g/cm³. Um bastão de vidro foi usado para auxiliar na separação e liberar partículas aderidas nas paredes do béquer. A fração que flutuou foi retirada com auxílio de uma escumadeira da superfície do líquido e despejada em um funil forrado com papel de filtro. A fração afundada no meio denso também foi separado do líquido orgânico. Em ambos os casos foi necessário deixar o meio denso escorrer em um papel filtro para a futura reutilização. Ambas as frações (afundado e flutuado) foram secas em temperatura ambiente para a evaporação dos líquidos orgânicos. O material afundando na densidade anterior (inferior) foi novamente imerso em líquido denso na densidade superior neste caso a densidade relativa de 1,4 g/cm³.

O material flutuado foi removido como no procedimento anterior a seco. Esse procedimento foi repetido nas demais densidades ate atingir a densidade relativa máxima de ensaio 2,2 g/cm³. As frações flutuadas nas densidades 1,30; 1,40; 1,50; 1,60; 1,70; 1,80; 1,90; 2,0 e 2,2 g/cm³ juntamente com as porções afundadas em 1,5 e 2,2 g/cm³ foram pesadas e calculadas suas participações na massa total.



Figura 27: A fig (a esquerda) ilustra o processo de separação por meio denso e a fig (a direita) ilustra o processo de secagem das amostras na capela

Fonte: Autoria Própria, 2016 – LAPROM-UFRGS

Os resultados obtidos foram transcritos em uma planilha eletrônica para os cálculos e desenho das curvas de separabilidade densimétrica.

3.5. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS

3.5.1. Análise imediata

Para a caracterização das amostras, todas amostras do rejeito e concentrado foram realizadas a duplicata e realizados os procedimentos analíticos seguintes:

Para a análise imediata as amostras foram cominuidas em um moinho de disco orbital de forma a passar em uma peneira com abertura (quadrada) de 0,25mm (Tyler 60#).



Figura 28: Moinho de disco orbital usado

Fonte: Autoria Própria, 2016 – LAPROM-UFRGS

Na análise imediata foram determinadas os teores de cinzas de acordo com a NBR 8289 (ASTM, 1984a).



Figura 29: Forno mufla usado para análises de teor de cinzas

Fonte: Autoria Própria, 2016 – LAPROM-UFRGS

Os resultados obtidos foram transcritos em uma planilha eletrônica para os cálculos e desenho das curvas de separabilidade densimétrica, também chamadas de curvas de Lavabilidade.

3.6. LEVANTAMENTO DA CURVA DE SEPARABILIDADE

As curvas de Henry Renhardt (curva dos flutuados, curva dos afundados e curva densimétrica) foram elaborados a partir dos resultados dos ensaio de separação densimétrica em meios orgânicos e análise de cinzas. Tais curvas foram desenhadas em função de teor de cinzas para o material de alimentação dos ciclones. Estas curvas foram utilizadas para um melhor entendimento dos parâmetros teóricos de recuperação em cada faixa densimétrica estudada.

3.7. CONSTRUÇÃO DA CURVA DE TROMP

A curva de Tromp foram elaborados a partir dos resultados dos ensaios de separação densimétricas e das massas de alimentação do concentrado e rejeito.

Através da curva de Tromp verificou-se a eficiência do sistema. O tamanho de separação ou o tamanho de corte foi obtido com a probabilidade de 50%, ou seja, igual a chance da partícula ficar no concentrado ou rejeito. A eficiência de separação foi avaliada pelo erro provável médio.

3.7.1. Balanço de Massa

Um balanço de massas da etapa de classificação foi necessário com o intuito de calcular os dados da amostragem do carvão térmico. Com os dados fornecidos foi possível determinar as respectivas massas em densidades requeridas como também foi possível determinar o teor de cinzas para cada faixa densimétrica.

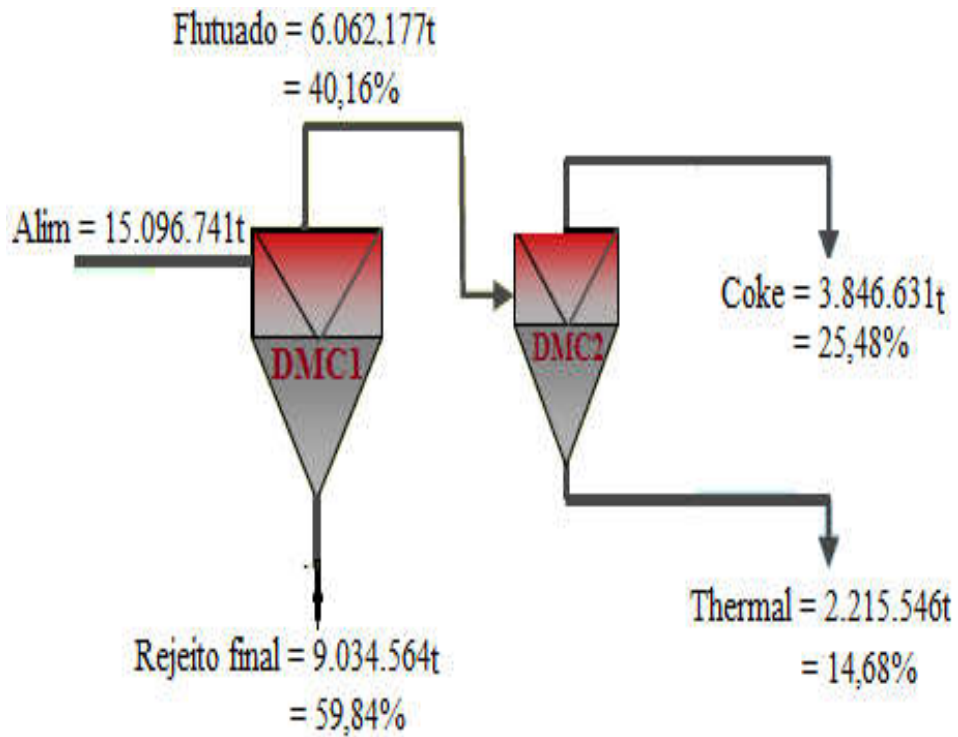


Figura 30: Balanço de massa dos ciclones estudados

Fonte: Autoria Própria, 2016 – LAPROM-UFRGS

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta informações sobre o funcionamento dos ciclones.

Caracterizaram-se o concentrado e o rejeito, e determinaram-se dados de eficiência de processo.

4.1. DADOS GERAIS DO PROCESSO

Tabela 5- Ensaio densimétrico do concentrado DMC₁

Faixa Densimétrica				Flutuado		Afundado	
	Massa (g)	Massa (%)	Cz (%)	Massa (%)	Cz.Acu	Massa (%)	Cz (%)
-1,3	2321,6	28,49	4,27	28,49	4,27	100	10,46
+1,3-1,4	5324	65,33	12,33	93,82	9,88	71,51	12,93
+1,4-1,5	496,4	6,09	19,09	99,91	10,44	6,18	19,25
+1,5	7,2	0,09	30,2	100,00	10,46	0,09	30,20
Total	8149,20	100	10,46				

Os valores da tabela 5, indicam que se trata de um carvão muito bom, pois no caso desta amostra verifica-se o teor de cinza médio de 10,46%.

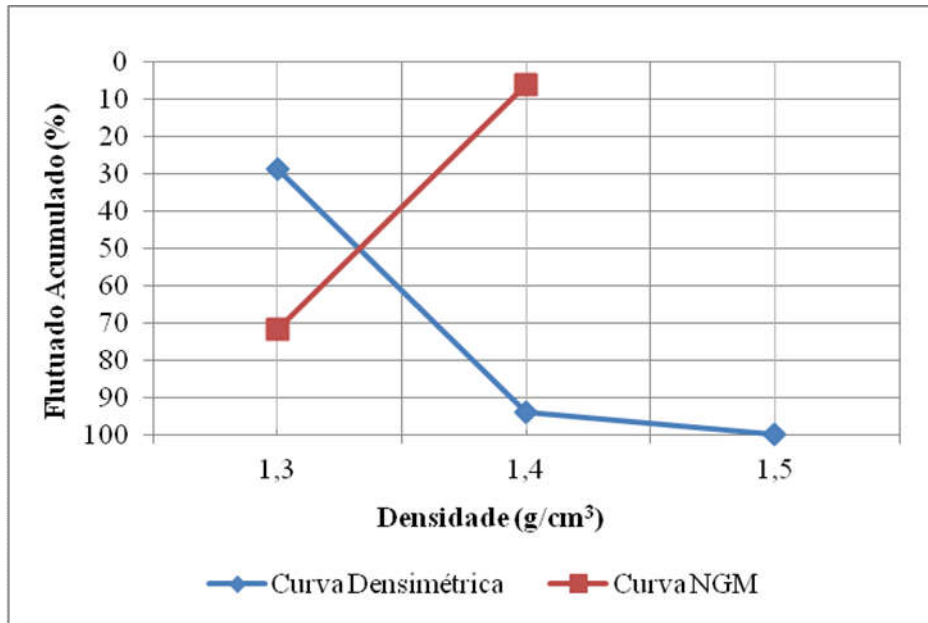


Figura 31: Curvas de separabilidade do concentrado Dmc₁ com as densidades

A figura 31, mostra uma alta liberação da matéria carbonosa no concentrado do Dmc₁, sendo que a maior parte do material se encontra nas densidades 1,3 e 1,5 g/cm³ ou seja este carvão possui alta liberação do material orgânico em relação ao material inorgânico.

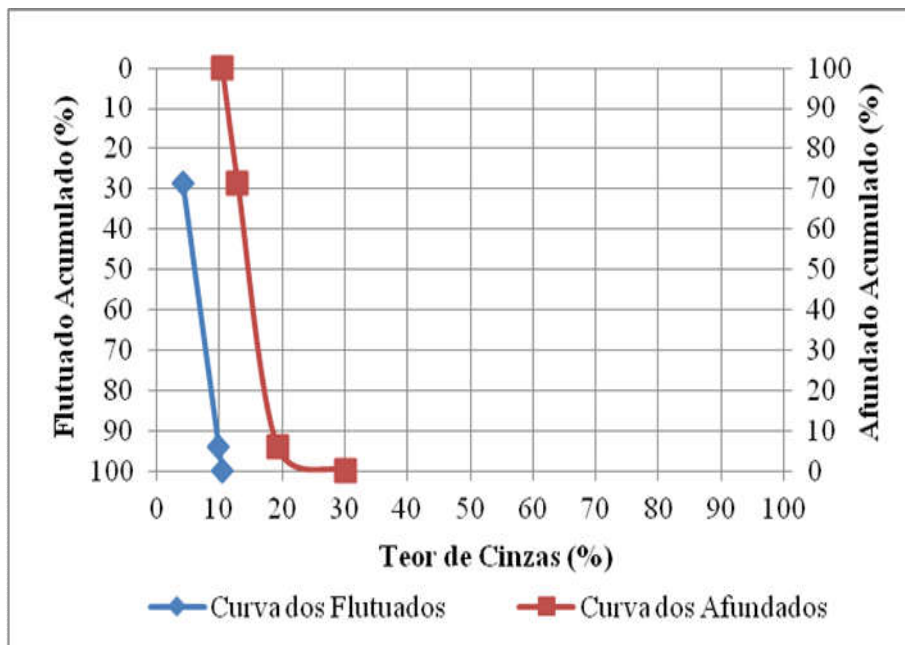


Figura 32: Curvas de separabilidade do concentrado Dmc₁ com teor de cinzas

Portanto verifica-se na figura 32, uma recuperação alta com baixos teores de cinzas o que significa na densidade 1,5, temos uma massa de 99,1% com teor de Cz de 30%.

Verificando a curva de NGM, pode-se notar que enfrenta-se uma certa dificuldade de beneficiar o carvão nas densidades de 1,3 a 1,35. Como por exemplo na densidade de corte de 1,3 com 20% de teor de Cz, o NGM seria aproximadamente de 70.1%.

Tabela 6- Ensaio densimétricos do rejeito DMC₁

Faixa Densimétrica	Massa (g)	Massa (%)	Cz (%)	Flutuados		Afundados	
				Massa (%)	Cz Acum.	Massa (%)	Cz Acum
-1,3	5,2	0,06	2,98	0,06	2,77	100	61,59
+1,3-1,4	11,60	0,12	12,18	0,18	9,12	99,94	61,62
+1,4-1,5	105,10	1,13	23,71	1,31	21,66	99,82	61,68
+1,5-1,6	875,30	9,39	31,46	10,70	30,26	98,69	62,12
+1,6-1,7	615,90	6,61	38,78	17,31	33,51	89,30	65,34
+1,7-1,8	719,10	7,71	46,64	25,02	37,56	82,70	67,46
+1,8-1,9	1185,70	12,72	52,15	37,74	42,48	74,98	69,60
+1,9-2,0	900,40	9,66	59,31	47,40	45,91	62,26	73,17
2,0-2,2	1185,50	12,72	67,01	60,12	50,37	52,60	75,71
+2,2	3718,40	39,89	78,49	100,00	61,59	39,89	78,49
Total	9322,20	100,00	61,59				

Os valores da tabela 6, indicam que se trata de um carvão não bom, pois no caso desta amostra verifica-se o teor de cinza médio de 61,59%.

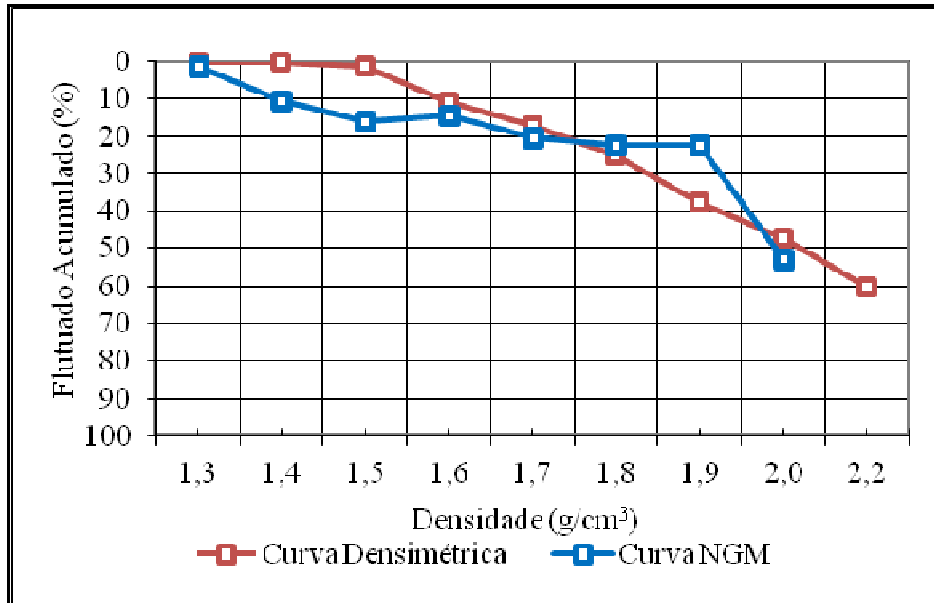


Figura 33: Curva de separabilidade de rejeito Dmc₁

A figura 33, mostra uma baixa liberação da matéria carbonosa, sendo que a maior parte do material se encontra na densidade 1,6 a 2,2 g/cm³. Ou seja este carvão apresenta pouca liberação do material orgânico em relação ao material inorgânico.

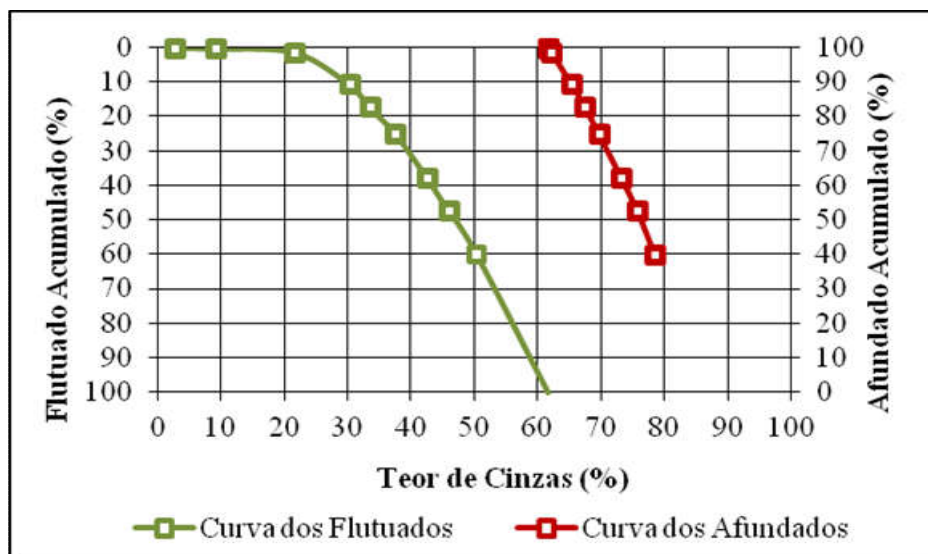


Figura 34: Curvas de rejeito Dmc₁

Para se obter o beneficiamento do produto com baixo teor de cinzas, ou seja abaixo de 30% de Cz a massa recuperada seria baixa. Por exemplo a recuperação mássica seria de 1,31%, figura 33.

Tabela 7- Ensaio densimétricos do carvão concentrado Dmc₁

Faixa Densimétrica	Massa (g)	Massa (%)	Cz (%)	Flutuados		Afundados	
				Massa (%)	Massa Cz.Acum.	Massa (%)	Cz (%)
-1,3	3090,3	33,08	2,15	33,08	2,15	100	8,55
+1,3-1,4	5647,2	60,44	10,25	93,52	7,38	66,92	11,71
+1,4-1,5	600,2	6,42	25,27	99,95	8,53	6,48	25,34
+1,5	5,3	0,06	32,78	100,00	8,55	0,06	32,78
Total	9343,00	100,00	8,55				

Os valores da tabela 7, indicam que se trata de um carvão muito bom, pois no caso desta amostra verifica-se o teor de cinza médio de 8,55%.

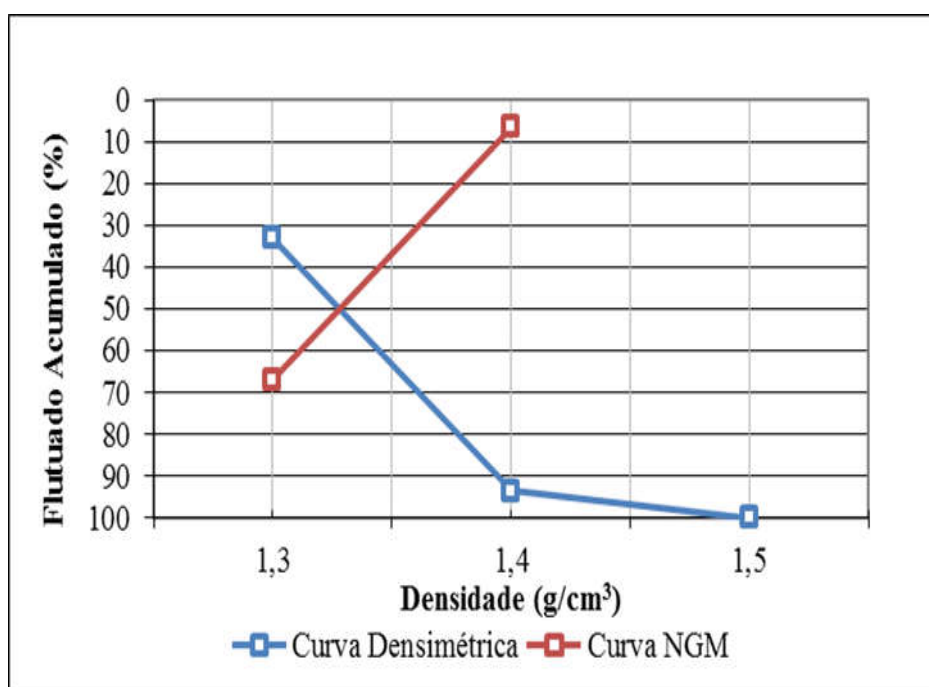


Figura 35: Curvas de separabilidade concentrado Dmc₂

A figura 35, mostra uma alta liberação da matéria carbonosa no carvão metalúrgico do Dmc₂, sendo que, a maior parte do material se encontra na densidade 1,3 e 1,4 g/cm³ ou seja este carvão possui alta liberação do material orgânico em relação ao material inorgânico.

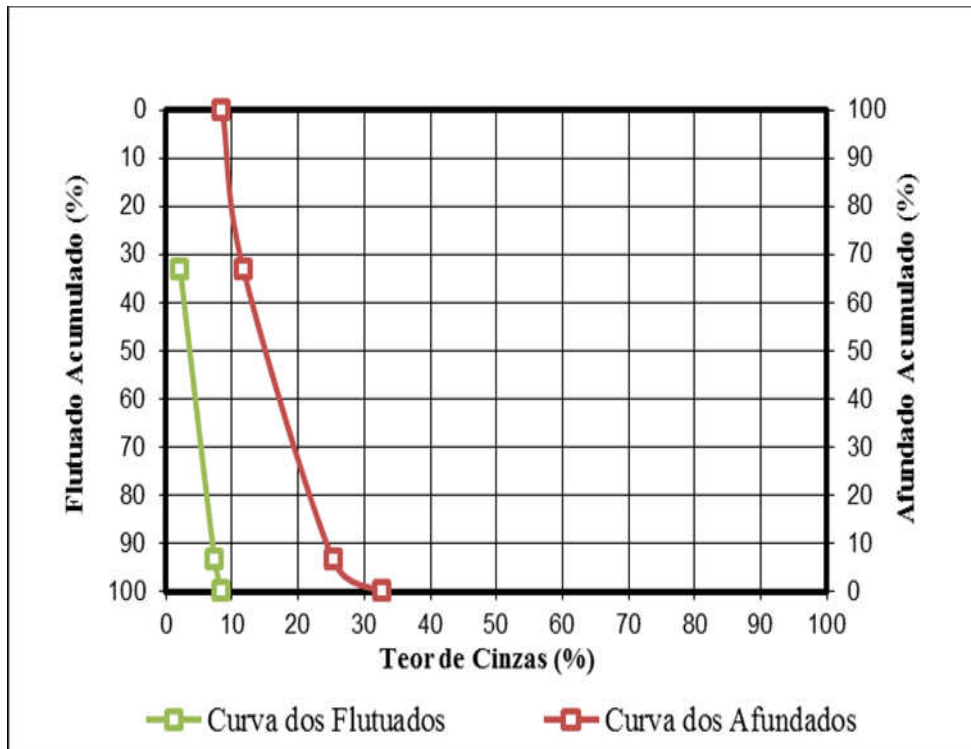


Figura 36: Curvas de separabilidade do concentrado Dmc₂

Portanto verifica-se na figura 36, uma recuperação alta com baixíssimos teores de cinzas o que significa na densidade 1,4, uma recuperação mássica de 93,52% com teor de Cz de 7,38%.

Verificando a curva de NGM, figura 35 também observar pode-se uma certa dificuldade de beneficiar o carvão nas densidade de 1,3 a 1,35, figura, 35. Como por exemplo na densidade de corte de 1,3 com 20% de teor de Cz, o NGM seria aproximadamente de 71%.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL NA ALIMENTAÇÃO

A tabela 8, apresenta resultados da análise densimétrica do material do rejeito e concentrado do *Dmc₁*. Como esperado, quanto menor a densidade menor é o teor de cinzas do material. Essa tendência crescente nos teores de cinzas inicia com a densidade relativa menor de 1,3 e finaliza com a densidade 2,2. Reconstituindo todas as frações, o material apresenta 72,06% de cinzas.

Tabela 8- Ensaios densimétricos da alimentação do Concentrado *Dmc₂*

D. Relativa		Alimentação	
<i>g/cm³</i>	<i>M.Calc</i>	<i>Massa %</i>	<i>Cz%</i>
-1,3	11,48	11,48	10,61
+1,3-1,4	26,31	26,31	30,67
+1,4-1,5	3,12	3,12	45,82
+1,5-1,6	5,66	5,66	52,72
+1,6-1,7	3,96	3,96	64,81
+1,7-1,8	4,61	4,61	77,94
+1,8-1,9	7,61	7,61	87,15
+1,9-2,0	5,78	5,78	99,11
+2,0-2,2	7,61	7,61	99,27
+2,2	23,87	23,87	99,52
Total	100	100,0	72,06

A tabela 9, apresenta resultados da análise densimétrica do material do rejeito e concentrado do *Dmc₂*. Como esperado, quanto menor a densidade menor é o teor de cinzas do material. Essa tendência crescente nos teores de cinzas inicia com a densidade relativa menor de 1,3 que apresenta um teor de Cz de 4,27% e finaliza com a densidade de 1,5 e 1,6 com teor de Cz de 30,02%. Reconstituindo todas as frações, o material apresenta 65,71% de cinzas.

Tabela 9- Ensaio densimétricos do carvão térmico Dmc₂

D.relaviva		Alimentação	
<i>g/cm³</i>	<i>M. Calc</i>	<i>M.recal</i>	<i>Cz%</i>
-1,3	28,49	28,49	4,27
+1,3-1,4	65,33	65,33	12,33
+1,4-1,5	6,09	6,09	19,09
+1,5	0,09	0,09	30,02
Total	100,00	100,00	65,71

4.3.EFICIÊNCIA DO PROCESSO

Para determinar-se a curva de tromp dos ciclones, foi necessário as recuperações e análises densimétricas dos produtos Dmc1 e Dmc2. Com os resultados densimétricos do concentrado e rejeito dos ciclones, foi possível recalculav a alimentação de todos os produtos. Em seguida determinou-se os coeficientes de partição para cada ciclone de modo a elaborar as curvas para cada equipamento.

As tabelas 10 e 11, ilustram os números de tromp que representam, a porcentagem de massa dentro de cada fração densimétrica, que vai para o afundado.

Tabela 10- Resultados de coeficientes de partição do Dmc₁

Densidade relativa	Nº de Tromp
1,25	99,7
1,35	99,7
1,45	78,3
1,55	0,6

Tabela 11- Resultados de coeficientes de partição do Dmc_2

Densidade relativa	Nº de Tromp
1,25	73,7
1,35	58,7
1,45	66,9
1,55	42,3

As figuras 37 e 38, Apresentam as curvas de tromp (curvas de partição) dos ciclones de meio denso em estudo, com dados dos produtos de rejeito e concentrado fornecido pela empresa Vale-Moatize. Pode-se observar o formato esperado "S" e que a densidade relativa para o coeficiente de partição do DMC_1 é de 1,49.

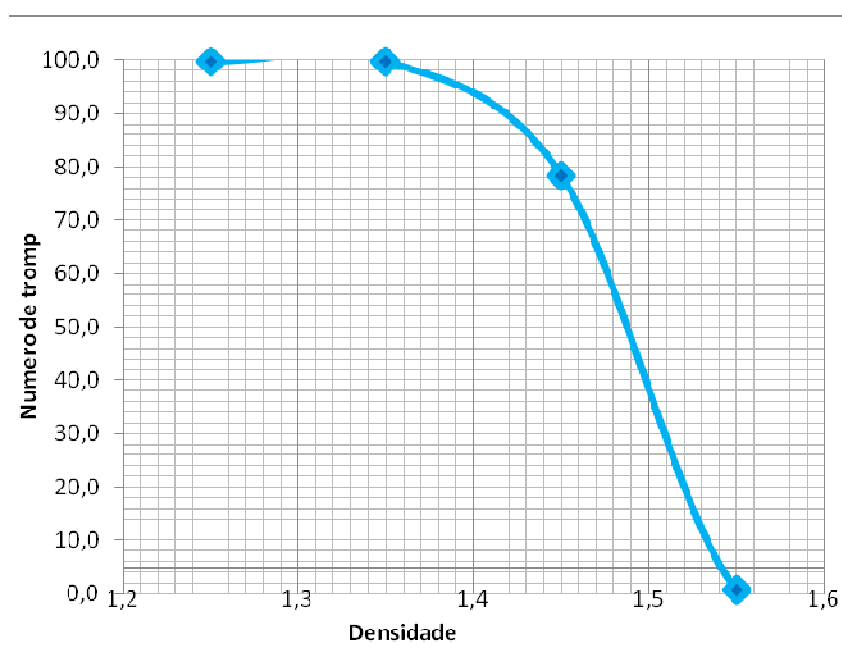


Figura 37: Curva de tromp do DMC_1 da vale estudada no beneficiamento de carvão da camada chipamga

A partir da curva, foram feitas as leituras do, d_{75} , d_{50} e d_{25} e de seguida foi determinado os valores dos restantes parâmetros.

A tabela abaixo mostra alguns parâmetros derivados da curva de partição - Densidade de corte (D_{50}), Erro provável médio (EPM) e Imperfeição (I)

Tabela 12- Parâmetros derivados da curva de partição do DMC₁ estudado -

Parâmetro	Resultado
D_{25}	1,51
D_{50}	1,49
D_{75}	1,45
EPM	0,03
I	0,02

Todos os indicadores de eficiência de equipamento EPM=0,03; I=0,02; apontam que o equipamento tem boa precisão. Sampaio e Tavares (2005), afirmam que quanto menor o erro provável maior é precisão ou seja para equipamentos mais precisos (como separadores de meio denso) o erro provável médio varia tipicamente entre 0,02 e 0,3 .

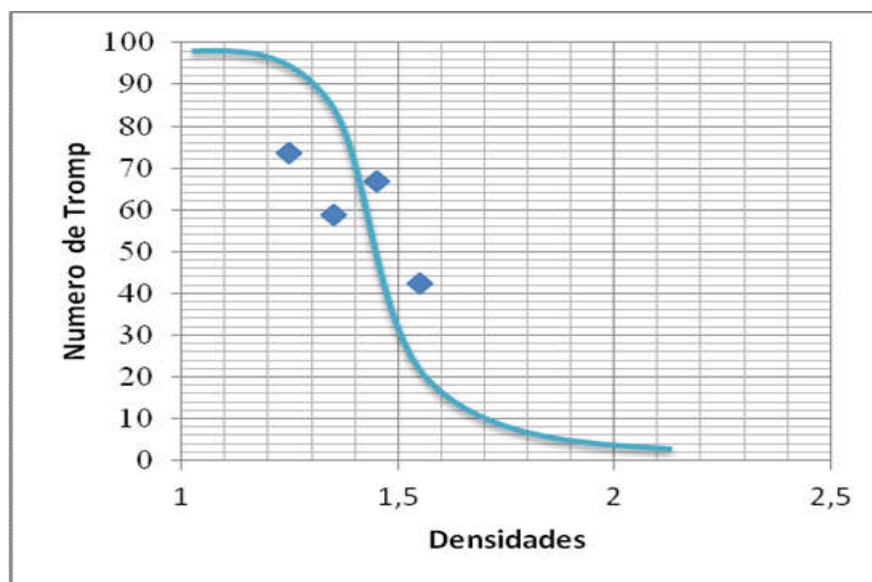


Figura 38: Curva interpolada de tromp do DMC₂ da Vale estudada no beneficiamento de carvão da camada chipanga.

A partir da curva, foram feitas as leituras do, d75, d50 e d25 e de seguida foi determinado os valores dos restantes parâmetros.

A tabela abaixo mostra alguns parâmetros derivados da curva de partição - Densidade de corte (D_{50}), Desvio provável médio (EPM) e Imperfeição (I).

Tabela 13- Parâmetros derivados da curva de partição do DMC₂ estudado

Parâmetro	Resultado
D25	1,48
D50	1,41
D75	1,35
EPM	0,07
I	0,05

Todos indicadores de eficiência de equipamento EPM=0,07; I=0,05; apontam que o equipamento apresenta uma boa precisão de separação.

Apresenta certos problemas que podem influenciar a diferença no numero de partição. A geração de finos dificultaria a separação nas densidades 1,3g/cm³ como também aumentaria as perdas de magnetita elevando o custo operacional.

Um outro possível problema, seria o aumento as características do equipamento, portanto em função das diferenças em tamanho e densidade entre o carvão e a matéria mineral os processos de separação apresentariam uma maior ou menor imperfeição ou desvio de lavagem ótima. As tabelas 11 e 12 mostram as diferenças que existem entre os valores que definem a precisão da separação dos dois equipamentos. Portanto o controle operacional poderia afetar a curva de partição.

Um possível ajuste da densidade operacional (corte) influenciaria na variação dos valores de tromp portanto embora variações da densidade de corte não sejam muito significativas estes problemas poderiam ser diminuídos com menor geração de finos ou através da diminuição do teor de matéria mineral da alimentação do ciclone.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo principal avaliar o desempenho de ciclones de meio denso da Vale-Moatize, equipamentos responsáveis pela operação de concentração de partículas por diferença de densidades.

Na busca deste objetivo, foi realizada uma revisão dos processos de concentração por meio denso, como também foi realizado ensaios densimétricos e análise químicas para a determinação dos parâmetros de eficiência.

Com referência aos ensaios experimentais realizados, foi possível constatar que: Os parâmetros avaliados (Erro provável médio e Imperfeição) indicaram boa eficiência de concentração nos dois ciclones. Os valores obtidos coincidem com os dados da bibliografia

A Curva de Tromp para produto do Dmc_1 , apresentou um corte bastante preciso indicando o bom funcionamento do ciclone com erro provável médio de 0,03 e imperfeição de 0,02.

No segundo corte (Dmc_2), apesar da inexistência de material com densidade acima de $1,5 \text{ g/cm}^3$, o corte densimétrico também foi bastante preciso com erro provavel médio de $0,07\text{g/cm}^3$ e imperfeição de 0,05;

Tanto no Dmc_1 quanto no Dmc_2 , verificou-se uma certa dificuldade de separação onde o NGM entre de 70 à 75.

A metodologia de avaliação da concentração em ciclones de meio denso desenvolvido neste trabalho se mostrou uma boa ferramenta para auxiliar em iniciativas que busquem a melhoria da eficiência da classificação principalmente no *Dense Medium Cyclone-2* onde foram identificadas oportunidades de melhoria no controle peracional.

A curva de partição pelo fato de ser substancialmente independente da composição dinsimétrica uma avaliação sistemática dos diversos parâmetros considerados neste trabalho como o controle operacional, densidade de separação, granulometria de alimentação e o tipo de equipamento.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, J. A. A. da; OLIVEIRA, M. L. M. de; BRAGA, P. F. A. ensaios de meio denso, in SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P.F.A. (Ed.) . Tratamento de minérios/ Práticas Laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007, p.295-318.

ASTM (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 8289 - Carvão Mineral: Determinação do Teor de Cinzas. 4 p.,1983.

ASTM (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 8738 - Carvão Mineral: Ensaios densimétricos. Rio de Janeiro,1984b.

Aplan, F.F., 1985. In: SME Mineral Processing Handbook (N.L. Weiss, ed.), SME, Littleton.

Aso, K., 1950. On the theory of partition curve and its application to coal preparation or mineral dressing, Memoirs, Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japão, vol. 17, no. 1.

Aurecon. Estudo de impacto ambiental, Vol.1, pp.1.2010.

Bradley, D., 1965. The hydrocyclone, Pergamon Press, 330 p.

Burt, R. O. Gravity concentration technology. Amsterdam: Elsevier, 1984, p.139-183.

BALANÇO MINERAL BRASILEIRO – 1988 – Brasília – DNPM.

Bevilacqua, P., Lorenzi, L., Ferrara, G., 2000. Rheology of low density suspensions in dense medium separation of post-consumer plastics, Coal Preparation, vol. 21, pp. 197-209

CAMPOS, A. R. de.; LUZ, A. B.da., BRAGA, P. F.A. Separação em meio denso, in LUZ, A. B. da.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, Silvia.C.A. (Ed.) . Tratamento de minérios. 5ªed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p.329-361.

CHAVES, A. P.; FILHO, R. C. C. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Separação Gravítica. Oficina de Textos. São Paulo, 2013.

CAMPOS, A. R. de.; LUZ, A. B.da., CARVALHO, E. A.de. Separação em meio denso, in LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios. 4ªed revisada. Rio de Janeiro, dez, 2004 CETEM/MCT, pp. 271-301.

Cocker, A., Dunlison, M., Napier-Munn, T., 1998. Dense Medium Workbook,

JKMRC/SAMANCOR, CD-ROM, versão 1.0.

Collins,D.N., Turnbull,T., Wright,R., Ngan,W., 1983. Separation efficiency in dense media cyclones, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, vol. 92, C38-C51.

COELHO. A.V.P. Complexo Gabro Anortozítico de Tete-Moçambique. Topografia globo, Lda, Lisboa 1969.

Descobertos novos jazigos de carvão em Moçambique,Disponível no endereço eletrônico e acessado em 08/03/2011: <htt:// www.vale.com>].

Derbrouck,A.W., Hudy,J., 1972. Performance characteristics of coal washing equipment: dense medium cyclones, USBM Report of Investigations, RI 7673.

DUTRA, Ricardo. **Beneficiamento de Minerais Industriais**. In: II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. [s.l.: s.n.], ago. 2008.

FRASER, T., YANCEY, H.F., 1923. Interpretation of results of coal washing tests, Trans. AIME, vol. 69, pp. 447-469.

JACOBI, H.P., 1978. Cominco Ltd – Sullivan Concentrator. In: Milling Practice in Canada (D.E. Picket, ed.), C.I.M., vol. 15, pp. 208-214.

JOSÉ, D.S.; SAMPAIO,C.H.ESTADO DA ARTE DA MINERAÇÃO EM MOÇAMBIQUE: CASO DE CARVÕES DE MOATIZE. TETE. In: III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral,2011, Gramado. III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2011.v. A9. P. 1-20.

KING, R. P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems. Publicado por Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.

KAHN, H.;SANT'N AGOSTINO, L. M. **Metodologia para caracterização tecnológica de matérias-primas minerais**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, ISSN 0104-0553, p.29, 1997. São Paulo, 1997.

LIMA, J. R. B., “Estudo da modelagem Matemática de Classificação de Minérios Ultrafinos”, Anais do XVTI Encontro Nacional de tratamento de minérios e Metalurgia Extrativa e I Seminário de Química de Colóides Aplicada à Tecnologia Mineral, 1o volume, ABM, São Paulo, SP, p. 81 a 98, 1998.

- Lins, F. A. F. Tratamento de Minérios. 5ed. Rio de Janeiro: Cetem/MCT,ago. 2010.p.305
- L.VASCONCELOS, A. MUCHANGOS & E. SIQUELA. Elementos-Traço em Cinzas de carvões aflorantes Moçambique, Junho/2009.
- MARTINS, L. Produção de Concentrado de Zinco a partir de Minério Silicatado com Redução no Teor de Carbonatos. Tese de Doutorado – UFMG. [s.l.], abr. 2011.
- MAE. (2005), *Perfil do Distrito de Moatize*, Província de Tete, Ministério da Administração Estatal. Série Perfis Distritais, Maputo, Moçambique.
- Mengellers,J., 1982. The influence of cyclone diameter on separating performances of economy, Anais, 9th International Coal Preparation Congress, New Delhi, Paper B4
- OSBORNE, D.G., 1988. Coal Preparation Technology, Graham and Trotman Ltd., vol. 1, London.
- PITA, F. A. G., 2004. *Apontamentos da disciplina Concentração e Diagramas*. Coimbra: Departamento de Ciências da Terra Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.p. 22-42
- PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. Centro de Documentação e Pesquisa para África Austral (SARDC). Relatório Nacional do Desenvolvimento Humano de Moçambique 2008.
- RUBIO, J.,- Carvão Mineral Caracterização e Beneficiamento. Volume 1, Nova Linha Artes Gráficas, Porto Alegre, p. 53 a 60, 1988.
- RUBIO, J. **Carvão Mineral. Caracterização e beneficiamento**. Porto Alegre: Nova Linha Artes Gráficas, 1988. v 1. 53 a 60 p.
- Real. S.A. Geologia de Moçambique. Notícia explicativa da carta geológica de Moçambique. Esc: 1: 2000000, 2^a edição,1978.
- SOUZA, M. L. **Separação por Meio Denso**. Universidade De La Republica – Uruguai e UFRGS – Brasil. Montevideo e Porto Alegre, [12-16], ago. 2013. Transparência.
- SYMONDS, D.F., 1986. Selection and sizing of heavy media equipment. In: Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits (A.L. Mular e M.A. Anderson, eds.), pp. 250-260.

SAMPAIO, C.H. e TAVARES, L. M.M. **Beneficiamento Gravimétrico: Uma Introdução aos Processos de Concentração Mineral e Reciclagem de Materiais por Densidade.**, Editora: UFRGS, Porto Alegre. 2005.

SCHULZ, N. F. 1970. *Bougainville Copper*, Engineering and Mining Journal, 247 (March) 56.

SAMPAIO J.A; FRANÇA;S.C.A; BRAGA; P.F.A.**Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**.Ed. João Alves Sampaio, Silvia Cristina Alves,Braga. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

VALE-MOÇAMBIQUE- Coal handling and preparation process management training presentation, 2016

WILLS, B. A. *Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 1997, Oxford.

Zanetti, E. Instituto Tecnológico da Vale. Comunicação Pessoal. Porto Alegre, 2014.