

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais-PPGE3M

**ANÁLISE DO SISTEMA DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DE  
FINOS DE CARVÃO MINERAL DE MOATIZE/MOÇAMBIQUE**

Amilton Feliciano de Castro

Dissertação para obtenção do título de mestre

em Engenharia

Porto Alegre

2016

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais-PPGE3M

**ANÁLISE DO SISTEMA DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DE  
FINOS DE CARVÃO MINERAL DE MOATIZE/MOÇAMBIQUE**

Amilton Feliciano de Castro

Engenheiro de Minas

Dissertação apresentada ao programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais-PPGE3M,  
como parte dos requisitos para a obtenção  
do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2016

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia extrativa, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Irineu António Schadach de Brum- PPGE3M/UFRGS

Coordenador do PPGE3M:

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio- PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Eduardo Rodrigo Ramos de Santana- FEPAM

Dr. Gerson Luis Miltzarek- LAPROM/UFRGS

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppemann

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 ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS-PPGE3M

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

FICHA CATALOGRÁFICA

**Castro, Amilton Feliciano**

**Análise do Sistema de Reagentes na Flotação de Finos de Carvão  
Mineral de Moatize/Moçambique**

**/ A. F. Castro. -- Porto Alegre, 2016.**

**104 p.**

**Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Departamento de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.**

**1. Análise do Sistema de Reagentes 2. Flotação de Finos de Carvão 3.  
Carvão Mineral de Moatize I. Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul. Departamento de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais.**

Aos meus filhos: Vagner de Castro, Elca de Castro e Helena de Castro, com muito amor.

A minha esposa: Énia Muchanga, por ter me deixado voar.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

Ao professor Doutor Irineu A. S. de Brum por me aceitar como aluno de mestrado, pelas condições de trabalho, disponibilizando recursos tecnológicos e uso do Laboratório de Processamento Mineral, pela amizade, apoio e acima de tudo a orientação que em muito auxiliaram na elaboração deste trabalho;

Ao professor Doutor Carlos Hoffman Sampaio pela amizade e apoio recebido nestes últimos dois anos;

Ao Professor Dr. Carlos Otavio Petter por sua inestimável amizade;

Ao Instituto Superior Politécnico de Tete pela bolsa de estudos concedida;

Aos doutorandos Glaydson Simões Dos Reis, David Selemane José e Moacir Veras, aos mestrandos Aaron Young, Ariane Kuerten e Leandro Peres Alberto pela ajuda incondicional na culminação deste trabalho e pela sua amizade demonstrada ao longo destes dois anos;

Aos colegas do LAPROM que de uma ou de outra forma colaboraram para o desenvolvimento e sucesso deste trabalho, em especial aos bolsistas de Iniciação Científica: Pedro Zancan, Diego Johann e ex-bolsista Eduardo Gonçalves pelo grande apoio na montagem dos experimentos e realização dos testes;

A todos meus familiares pelo apoio incansável e necessário em todos estes anos da minha ausência.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

**SUMÁRIO**

LISTA DE FIGURAS .....	XI
LISTA DE TABELAS .....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVIII
ABSTRACT .....	XXI
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Localização Geográfica de Moçambique.....	4
3.1.1 Localização Geográfica do distrito de Moatize, Superfície e População.....	5
3.1.2 Carvão de Moatize, Generalidades.....	6
3.1.3 Grau de Estudo da Bacia de Moatize .....	7
3.1.4 Enquadramento Geológico da Bacia Carbonífera de Moatize .....	8
3.2 CONTEXTO MUNDIAL DO CARVÃO MINERAL .....	12
3.2.1 Origem do Carvão .....	12
3.2.2 Composição e classificação.....	13
3.2.3 Uso dos Carvões.....	13
3.2.4 Reservas e Maiores Produtores .....	14
3.3 MINA DE MOATIZE .....	17
3.4 FLOTAÇÃO .....	18
3.4.1 Conceitos básicos .....	18
3.4.2 Aspectos gerais da flotação .....	19
3.4.3 Influência do Tamanho da Partícula.....	22
3.4.5 Beneficiamento do carvão da mina Vale – Moçambique .....	23



3.5 REAGENTES DE FLOTAÇÃO .....	24
3.5.1 Coletores.....	25
3.5.2 Espumantes.....	26
3.5.3 Finos na Flotação .....	27
3.5.4 Mecanismos atuantes na flotação de carvão .....	28
3.5.5 Flotação verdadeira, arraste e aprisionamento .....	29
3.5.6 Cinética da flotação do carvão .....	31
3.5.7 Particularidades da flotação do carvão.....	32
3.5.8 Processo de flotação dos finos na mina Vale - Moçambique.....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1 Equipamentos.....	34
4.2 Fluxograma do método de pesquisa.....	35
4.3 Material de ensaio .....	36
4.4 Análise Granulométrica do carvão da camada UCB .....	36
4.5 Análise granulométrica da fração fina .....	37
4.6 Preparação e quarteamento da amostra.....	39
4.7 Reagentes utilizados .....	40
4.8 Parâmetros operacionais do ensaio de flotação .....	41
4.9 Ensaios de flotação .....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
5.1 Ensaios específicos de flotação com betacol – fase I .....	45
5.1.1 Ensaio F (betacol 400 g/t – 200 g/t) .....	45
5.1.2 Ensaio E (betacol 400g/t – 300g/t).....	48
5.1.3 Ensaio D (betacol 400g/t – 400g/t) .....	49
5.1.4 Ensaio C (betacol 400g/t – 500 g/t).....	49
5.2 Ensaios específicos de flotação com óleo diesel mais MIBC- fase II .....	51
5.2.1 Ensaio G: 200 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC) .....	51

5.2.2 Ensaio H: 300 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC) .....	54
5.2.3 Ensaio I: 400 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC).....	55
5.2.4 Ensaio J: 500 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC) .....	55
6. CONCLUSÕES .....	58
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
ANEXO I: ENSAIOS ESPECÍFICOS DE FLOTAÇÃO COM BETACOL .....	64
ANEXO II: ENSAIOS ESPECÍFICOS DE FLOTAÇÃO COM ÓLEO DIESEL MAIS MIBC .....	74

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localização geográfica de Moçambique a (esq.), e divisão administrativa a (dir.).....	4
<b>Figura 2.</b> Mapa de localização geográfica da província de Tete e divisão administrativa do distrito de Moatize. ....	5
<b>Figura 3.</b> Esboço Geológico da Região de Tete-Moatize. ....	8
<b>Figura 4.</b> Esboço da Série Produtiva em Moatize .....	10
<b>Figura 5.</b> Bacias do Karroo em Moçambique e principais aspectos geográficos da zona de Tete-Moatize .....	11
<b>Figura 6.</b> Combustíveis usados na geração de energia primária no mundo. ...	15
<b>Figura 7.</b> Distribuição das reservas provadas de carvão no mundo. ....	15
<b>Figura 8.</b> Produção e consumo mundial de carvão mineral .....	16
<b>Figura 9.</b> Produção e previsão da produção de carvão no mundo.....	17
<b>Figura 10.</b> Representa o layout da camada Chipanga .....	18
<b>Figura 11.</b> Ilustração do ângulo de contato formado por uma bolha de ar em uma superfície mineral.....	20
<b>Figura 12.</b> Representação das regiões granulométricas.....	22
<b>Figura 13.</b> Triângulo dos reagentes de flotação interagindo com a mineralogia. ....	25
<b>Figura 14.</b> Determinação da flotação verdadeira pelo método de Warren. ....	30
<b>Figura 15.</b> Cinética de Flotação.....	32
<b>Figura 16.</b> Fluxograma do circuito dos finos de carvão de Moatize .....	33
<b>Figura 17.</b> Fluxograma de pesquisa .....	35
<b>Figura 18.</b> Curva granulométrica de cada fração granulométrica da amostra (camada UCB).....	37
<b>Figura 19.</b> Curva granulométrica para cada fração da amostra.....	39
<b>Figura 20.</b> Quarteador Jones .....	40
<b>Figura 21.</b> Máquina de flotação de bancada tipo CDC.....	41
<b>Figura 22.</b> Filtro de pressão .....	42
<b>Figura 23.</b> Ensaios específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com betacol 400 g/t – 200 g/t. ....	46

- Figura 24.** Ensaio específico de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 200 g/t..... 47
- Figura 25.** Ensaio específico de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 200 g/t..... 48
- Figura 26.** Ensaio específico de flotação: Valores acumulados das recuperações mássicas, matéria carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis para 5 minutos de flotação, variando o reagente betacol. .... 51
- Figura 27.** Ensaio específico de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com 200 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)..... 52
- Figura 28.** Ensaio específico de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 200 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC) ..... 53
- Figura 29.** Ensaio específico de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 200 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC). .... 54
- Figura 30.** Ensaio específico de flotação: Valores acumulados das recuperações mássicas, matéria carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis para 5 minutos de flotação, variando o reagente óleo diesel mais MIBC. .... 56
- Figura 31.** Ensaio específico de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com betacol 400 g/t – 300 g/t. .... 65
- Figura 32.** Ensaio específico de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 300 g/t..... 66
- Figura 33.** Ensaio específico de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 300 g/t..... 67
- Figura 34.** Ensaio específico de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com betacol 400 g/t – 400 g/t. .... 68

- Figura 35.** Ensaio específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 400 g/t..... 69
- Figura 36.** Ensaio específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 400 g/t..... 70
- Figura 37.** Ensaio específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com betacol 400 g/t – 500 g/t. .... 71
- Figura 38.** Ensaio específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 500 g/t..... 72
- Figura 39.** Ensaio específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 500 g/t..... 73
- Figura 40.** Ensaio específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com 300 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)..... 75
- Figura 41.** Ensaio específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 300 g/t (O.D) -300 g/t (MIBC)..... 76
- Figura 42.** Ensaio específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 300 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)..... 77
- Figura 43.** Ensaio específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo com 400 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)..... 78
- Figura 44.** Ensaio específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 400 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)..... 79
- Figura 45.** Ensaio específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 400 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)..... 80

- Figura 46.** Ensaios específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com 500 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)..... 81
- Figura 47.** Ensaios específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 500 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC) ..... 82
- Figura 48.** Ensaios específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 500 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC). ..... 83

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Distribuição granulométrica da camada UCB.....	36
<b>Tabela 2.</b> Análise granulométrica dos finos do carvão de Moatize (camada UCB).....	38
<b>Tabela 3.</b> Parâmetros dos ensaios de flotação.....	41
<b>Tabela 4.</b> Valores das concentrações de reagentes dos ensaios específicos da primeira e segunda fase de flotação. ....	43
<b>Tabela 5.</b> Parâmetros de qualidade do carvão da camada UCB.....	44
<b>Tabela 6.</b> Resultados do ensaio com betacol 400 g/t – 200 g/t.....	46
<b>Tabela 7.</b> Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H <sub>2</sub> O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo. ....	47
<b>Tabela 8.</b> Ensaio de flotação: Recuperação mássica, recuperação carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis em função da variação dos reagentes para 5 minutos de flotação.....	50
<b>Tabela 9.</b> Resultado do ensaio 200 g/t (O.D) –300 g/t (MIBC).....	52
<b>Tabela 10.</b> Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H <sub>2</sub> O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo. ....	53
<b>Tabela 11.</b> Ensaio de flotação: Recuperação mássica, recuperação carbonosa, teores de cinzas e material voláteis em função da variação dos reagentes para 5 minutos de flotação.....	56
<b>Tabela 12.</b> Resultado do ensaio com Betacol 400 g/t – 300 g/t.....	65
<b>Tabela 13.</b> Resultado do ensaio com Betacol 400 g/t - 300 g/t : Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H <sub>2</sub> O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo. ....	66
<b>Tabela 14.</b> Resultado do ensaio com Betacol 400g/t – 400g/t.....	68
<b>Tabela 15.</b> Resultado do ensaio com Betacol 400 g/t – 400 g/t: Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H <sub>2</sub> O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.....	69
<b>Tabela 16.</b> Resultado do ensaio com Betacol 400g/t – 500 g/t.....	71

<b>Tabela 17.</b> Resultado do ensaio com Betacol 400 g/t – 500 g/t : Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H <sub>2</sub> O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.....	72
<b>Tabela 18.</b> Resultado do ensaio com 300 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC).....	75
<b>Tabela 19.</b> Resultado do ensaio com 300 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC): Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H <sub>2</sub> O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.....	76
<b>Tabela 20.</b> Resultado do ensaio com 400 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC).....	78
<b>Tabela 21.</b> Resultado do ensaio com 400 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC): Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H <sub>2</sub> O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.....	79
<b>Tabela 22.</b> Resultado do ensaio com 500 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC).....	81
<b>Tabela 23.</b> Resultado do ensaio com 500 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC) : Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H <sub>2</sub> O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.....	82



**LISTA DE SÍMBOLOS**

°C	grau centígrado
Cp/p	concentração de sólidos em peso
L/min	litro por minuto
km <sup>2</sup>	quilometro quadrado
mm	milímetro
m	metro
ml	mililitro
kg	quilograma
g	grama
g/t	grama por tonelada
g/ml	grama por mililitro
m <sup>3</sup> /h	metro cúbico por hora
km	quilometro
KPa	quilo pascal
kcal	quilocaloria
t/ano	tonelada por ano
t	tempo
'	símbolo de minuto
''	símbolo de segundo
µm	micrometro

**LISTA DE ABREVIATURAS**

A	Alimentação
Ac.	acumulado
ROM	Run of Mine
R	Rougher
Sv.	Scavenger
NBR	Norma Brasileira
NE	Nordeste
hab	habitante
NW	Noroeste
SW	Sudoeste
OD	óleo diesel
ESE	Este-Sul-Este
WNW	Oeste-Norte-Oeste
NS	Norte- Sul
M.A	milhão de anos
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LAPROM	Laboratório de Processamento Mineral
MTPA	milhão de tonelada por ano
EIA	Energy Information Administration, US- Government
BP	British Petroleum Company
WCI	World Coal Institute

UC	Upper Chipanga
UCT	Upper Chipanga Teto
UCB	Upper Chipanga Base
MC	Middle Chipanga
LC	Lower Chipanga
MLCU	Middle Lower Chipanga Upper
MIBC	metil-isobutil-carbinol
FAD	flotação por ar dissolvido
RPM	rotação por minuto
tph	tonelada por hora

## RESUMO

Este estudo foi feito a partir de uma amostra de carvão extraído na mina da Vale-Moçambique, localizada no distrito de Moatize, Província de Tete. O trabalho visa analisar o sistema de reagentes na flotação de finos de carvão mineral pertencente à camada UCB. Dentre os métodos de beneficiamento de carvão, a flotação se destaca como um dos mais importantes para a concentração deste material, em particular no tratamento de partículas finas. A alimentação total da planta de processamento da Vale-Moçambique é de 8000 tph de carvão, onde 10% dessa alimentação corresponde a fração fina que alimenta o circuito de flotação. O material utilizado nesse estudo apresentou uma granulometria 96% menor do que 0,25 mm. Os reagentes utilizados nos ensaios de flotação foram betacol e óleo diesel como agentes hidrofobizantes e MIBC como espumante. O intervalo de concentrações de betacol na primeira fase de ensaios foi de 200 g/t a 500 g/t, e na segunda fase foi de 200 g/t a 500g/t de óleo diesel e manteve-se constante o MIBC em 300 g/t. Os resultados mostraram que é possível, a partir de uma alimentação com o teor de cinzas em torno de 22,84%, obter produtos com teores abaixo de 10% de cinzas, com uma recuperação mássica em torno de 50%. A recuperação de matéria carbonosa também foi avaliada e apresentou resultados positivos. Complementando esse estudo, foi avaliado o efeito da recuperação de H<sub>2</sub>O e foi observado que para as concentrações de betacol as recuperações variaram de 6 a 9%, e para óleo diesel mais MIBC foram de 4 a 7%.

*Palavras-Chave:* Flotação de minérios. Carvão mineral. Beneficiamento de carvão.

## ABSTRACT

This study was done from a sample of coal mined at the Vale-Mozambique mine, located in Moatize district, Tete Province. The aim of this work is to analyze the reagent system in the flotation of coal fines belonging to the UCB layer. Among coal processing methods, flotation stands out as one of the most important for the concentration of this material, in particular in the treatment of fine particles. The total feed of the Vale-Mozambique processing plant is 8000 tph of coal, where 10% of this feed corresponds to the fine fraction that feeds the flotation circuit. The material used in this study had a particle size of 96% smaller than 0.25 mm. The reagents used in the flotation tests were betacol and diesel oil as hydrophobizing agents and MIBC as frother. The range of betacol concentrations in the first test phase was 200 g / t at 500 g / t, and in the second phase 200 g / t at 500 g / t of diesel oil and MIBC were kept constant at 300 g / t. The results showed that it is possible, from a feed with the ash content around 22.84%, to obtain products with levels below of 10% ash, with a mass recovery around 50%. The recovery of carbonaceous matter was also evaluated and presented positive results. Complementing this study, the effect of H<sub>2</sub>O recovery was evaluated and it was observed that for the concentrations of betacol the recoveries ranged from 6 to 9%, and for diesel oil plus MIBC were 4 to 7%.

*Keywords: Mineral Coal.Froth Flotation. Coal Preparation.*

## 1. INTRODUÇÃO

Considerando o aumento populacional e o consumo de energia como qual a humanidade vem convivendo ao longo das últimas décadas e a consequente demanda de recursos naturais não renováveis, fica patente o desafio da indústria mineral na busca de novas tecnologias e aprimoramento das já existentes. Este desafio se justifica pelas necessidades de melhores resultados industriais e para atender às especificações de mercado, levando-se em consideração a escassez de jazidas com teores mais altos e a necessidade de beneficiamento de minérios mais complexos, teores mais baixos e granulometria de liberação menor.

Diante dessa conjuntura, a flotação em espuma, ou simplesmente flotação destaca-se como um dos mais importantes e versáteis meios de processamento mineral uma vez que sua aplicação se estende a uma grande variedade de minérios com diferentes granulometrias, composições químicas, mineralógicas e, principalmente, diferentes propriedades físico-químicas.

A separação de minerais por flotação envolve concentração seletiva de minerais hidrofóbicos na espuma. A seletividade baseia-se em diferenças de capacidade de molhabilidade dos minerais tratados, com partículas hidrofóbicas sendo capazes de aderir às bolhas de ar.

O processo é realizado em um reator, e as condições necessárias para uma boa aderência é a dispersão eficaz de partículas e as bolhas de ar ao longo do volume da célula, e o acompanhamento das condições hidrodinâmicas necessárias para a colisão, adesão e transporte. No entanto, partículas muito finas também podem se reportar a espuma por arraste hidráulico. Deste modo, a seletividade global é determinada pelas diferenças nas taxas de flotação com que as partículas minerais diferentes são carregadas para o produto final.

A cinética de flotação envolve vários processos de transferência de massa como: transferência seletiva de material a partir da polpa para a espuma por adesão partícula – bolha; transferência não seletiva de material a partir da polpa para a espuma por arraste mecânico e hidráulico; retorno (seletiva e não seletiva) do material para a polpa através de drenagem de espuma.

Este processo tem sido muito estudado por vários pesquisadores ao longo do tempo, e diferentes unidades têm sido desenvolvidas para a otimização e controle do processo.

Um dos objetivos deste estudo é analisar o sistema de reagentes na flotação da fração fina do carvão da camada UCB pertencente à mineradora Vale-Moçambique, para recuperar o máximo da matéria carbonosa e reduzir o nível de cinzas. As variáveis analisadas foram às dosagens dos coletores e espumantes empregados.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é analisar o sistema de reagentes na flotação do carvão de Moatize, sua adequação para a recuperação da fração fina de parte do carvão (ROM) da camada UCB proveniente da lavra a céu aberto, para obter um produto de acordo com as especificações do mercado, tendo em conta um teor baixo de cinzas e máxima recuperação mássica.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Obter por flotação uma recuperação de massa no flotado em torno de 50%, e um concentrado de carvão com teor de cinzas abaixo de 10%;
- b) Definir a melhor concentração dos reagentes, comparando betacol com óleo diesel mais MIBC;
- c) Analisar o efeito de recuperação de água.

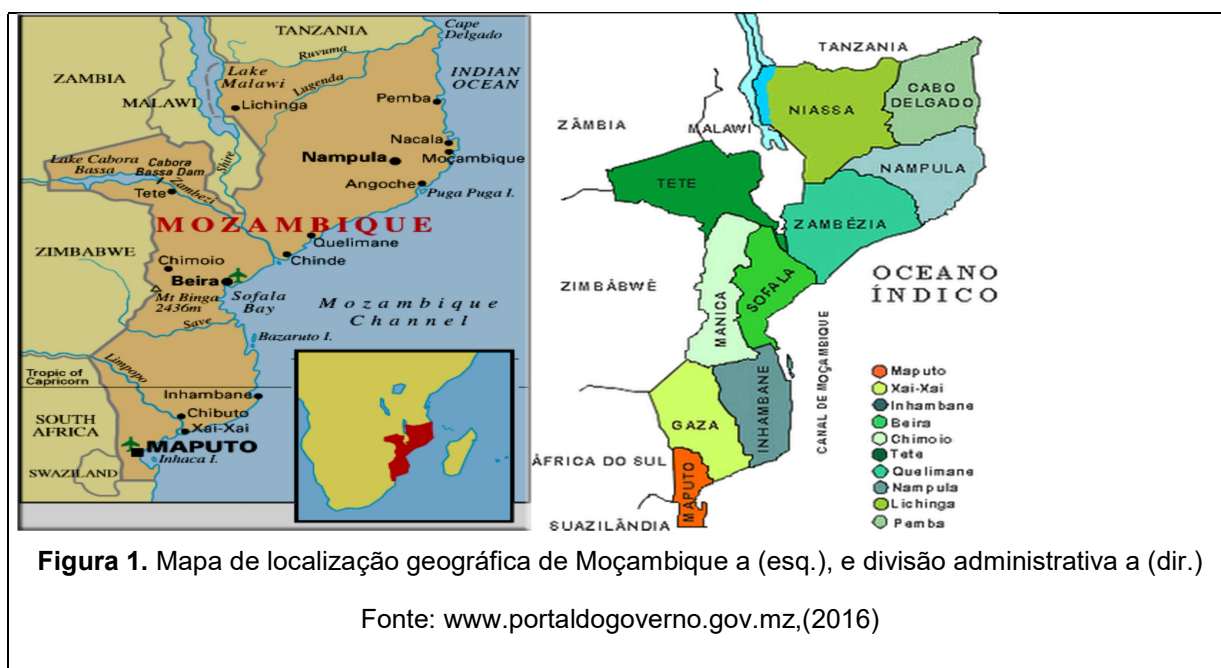


### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Localização Geográfica de Moçambique

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 km<sup>2</sup>, 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 buscando sair da pobreza absoluta.

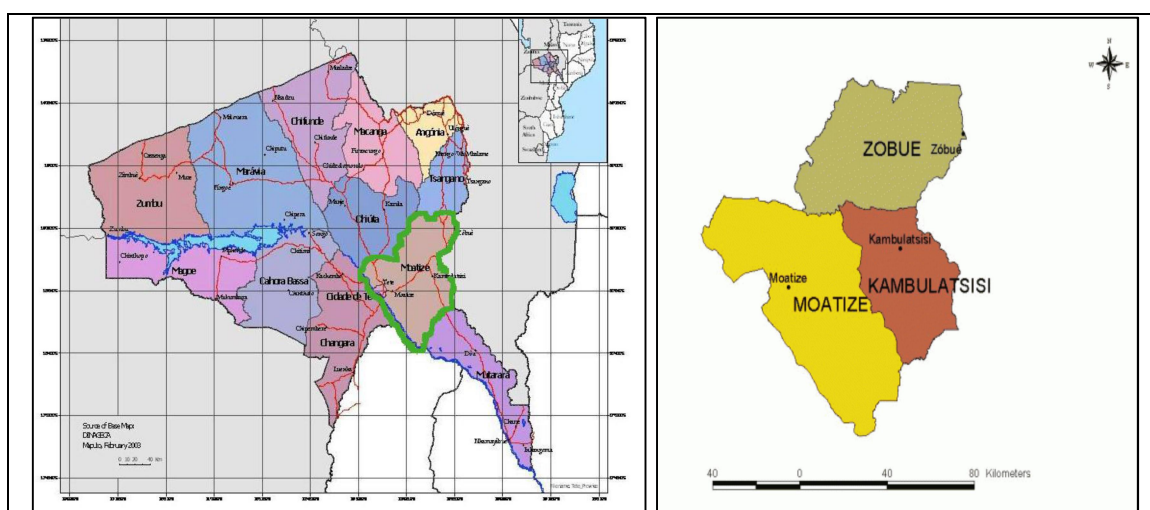
O território moçambicano está dividido em onze províncias, de Norte a Sul nomeadamente: Cabo Delgado, Niassa, Nampula, Zambézia, Tete, Manica, Sofala, Inhambane, Gaza, Maputo e cidade de Maputo, esta última sendo a capital do país. Cada uma das províncias tem uma capital provincial de Norte a Sul são: Pemba, Lichinga, Nampula, Quelimane, Tete, Chimoio, Beira, Inhambane, Xai-Xai, Matola. A figura 1 mostra as províncias de Moçambique, bem como alguns aspectos da geografia da zona.



### 3.1.1 Localização Geográfica do distrito de Moatize, Superfície e População

O distrito de Moatize, localizado a 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 km<sup>2</sup> e uma população cerca de 113.409 habitantes correspondente a uma densidade populacional de 17 hab./km<sup>2</sup> de acordo com o censo populacional de 2007. A relação de dependência econômica 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 N'codedzi (MAE, 2005).



**Figura 2.** Mapa de localização geográfica da província de Tete e divisão administrativa do distrito de Moatize.

Fonte: Adaptado de Dinageca, (2003).

### 3.1.2 Carvão de Moatize, Generalidades

Em Moçambique, no momento em que o mundo está com olhos postos ao território nacional, olhando para os acontecimentos que se registam nos últimos tempos no que diz respeito à descoberta e exploração dos recursos minerais, particularmente relacionados com carvão mineral de Moatize, o país ainda detém de muitos recursos por serem descobertos e explorados.

No que diz respeito ao carvão mineral, Moçambique é considerado 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 vários interessados (pessoas singulares e coletivas) (MEDIAX, 2010).

Segundo José e Sampaio (2011), 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 anos promovidos sobre tudo por empresas transnacionais e empresas indianas, brasileiras e australianas, permitindo ao país exportador de eletricidade a partir da barragem Hidroelétrica de Cahora Bassa, 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 em 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.

### 3.1.3 Grau de Estudo da Bacia de Moatize

Na 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 e presentemente existem vários bilhões de toneladas de carvão prontas para ser extraídas. 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).

Real (1966), no seu trabalho intitulado “Geologia da bacia do Zambeze”, faz referência às 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 e, por exemplo, afirma que na bacia carbonífera de Moatize-Minjova as séries carboníferas apresentam uma espessura de 340m.

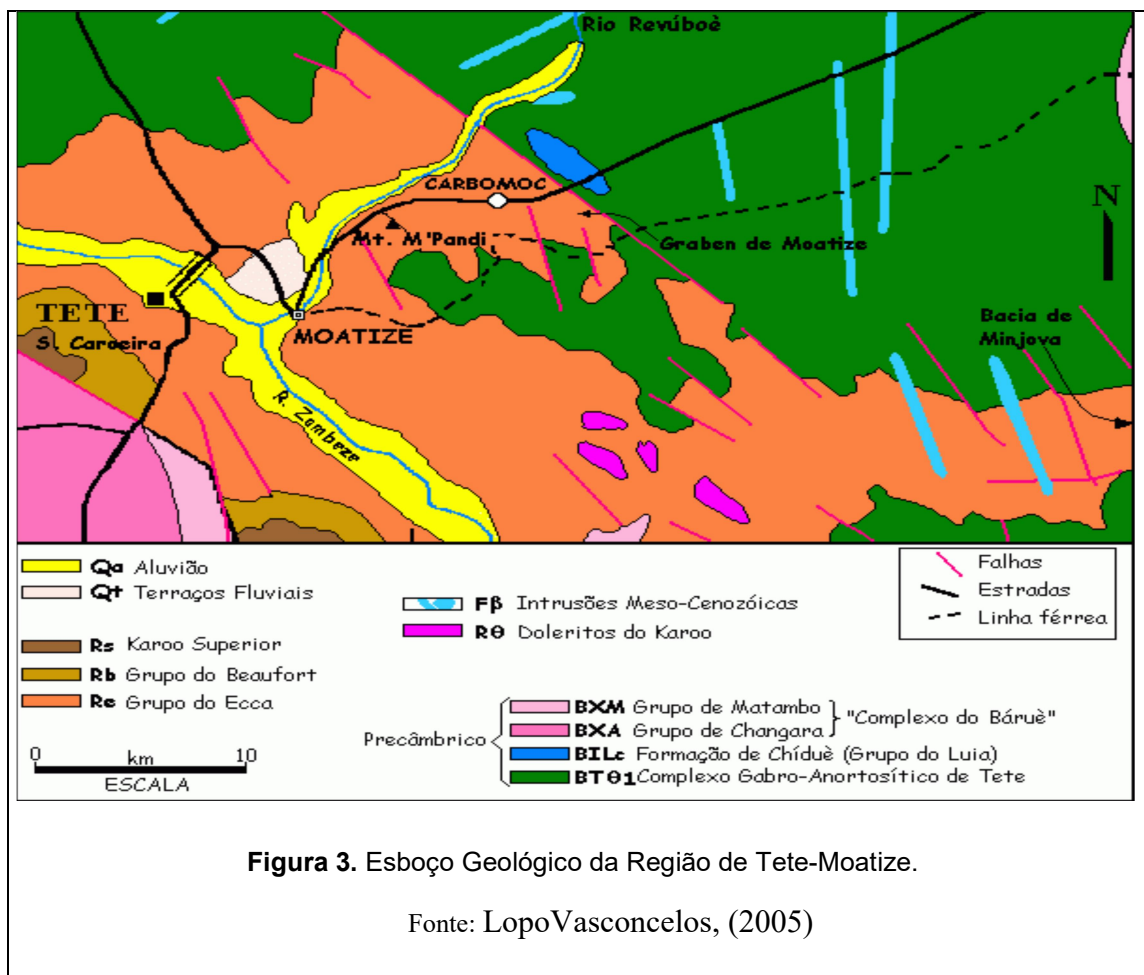
Afonso (1978), no seu trabalho denominado “Geologia de Moçambique”, faz referência a distribuição do Karroo em Moçambique, sua origem e sequência Geológica incluindo da existência de carvão na bacia carbonífera de Moatize.

Lopo (1995), na sua tese de doutorado pela Universidade do Porto, 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 primeiros 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 foram assinados dois contratos mineiros, com a Vale (Brasil) e Riversdale (Austrália) para Moatize e Benga respectivamente, que em conjunto contemplariam a produção e exportação anual de cerca de vinte milhões de toneladas de carvão, a partir do primeiro semestre de 2011. O Governo moçambicano atribuiu, até finais de 2012, três novas concessões de pesquisa e prospecção de carvão, o Ministério dos Recursos Minerais atribuiu 105 concessões de pesquisa e prospecção de Carvão Mineral; enquanto isso as Minas de Moatize e Benga em Tete, desenvolvidas pela companhia brasileira Vale e pela mineradora australiana Riversdale respectivamente,

estão numa fase avançada. 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.



### 3.1.4 Enquadramento Geológico da Bacía Carbonífera de Moatize

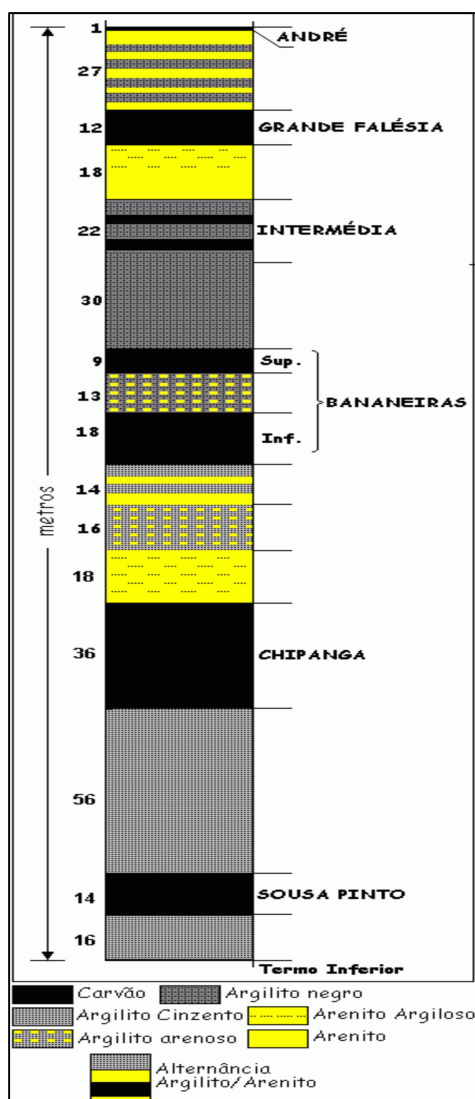
A bacía carbonífera de Moatize localiza-se na província de Tete, a cerca de 20 km a nordeste da capital provincial, e a cerca de 6 km do aeroporto de Chingódzi. A capital distrital de Moatize localiza-se dentro da bacía carbonífera, na estrada que liga Tete ao Malawi, através da vila fronteiriça do Zóbuè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

A bacía carbonífera de Moatize, pertence ao Supergrupo do Karroo. A sequência 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.

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 seixos rolados e estratificação cruzada (F. REAL, 1966).

A série produtiva 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 Pérmico Inferior, que, provavelmente se corresponde com o andar Ecça (A. REAL, 1978).



**Figura 4.** Esboço da Série Produtiva em Moatize

Fonte: Lopo Vasconcelos, (2005)

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

A camada André do topo da série produtiva, constituída por bancadas de carvão interceptadas apenas por dois leitos finos de xistos carbonosos, piritosos com 1 a 2 m de carvão.

A camada Grande Falésia, constituída por xistos argilosos e carvões com 12 m de espessura.

A camada Intermédia, formada por argilito negro e níveis de carvão muito pequeno.

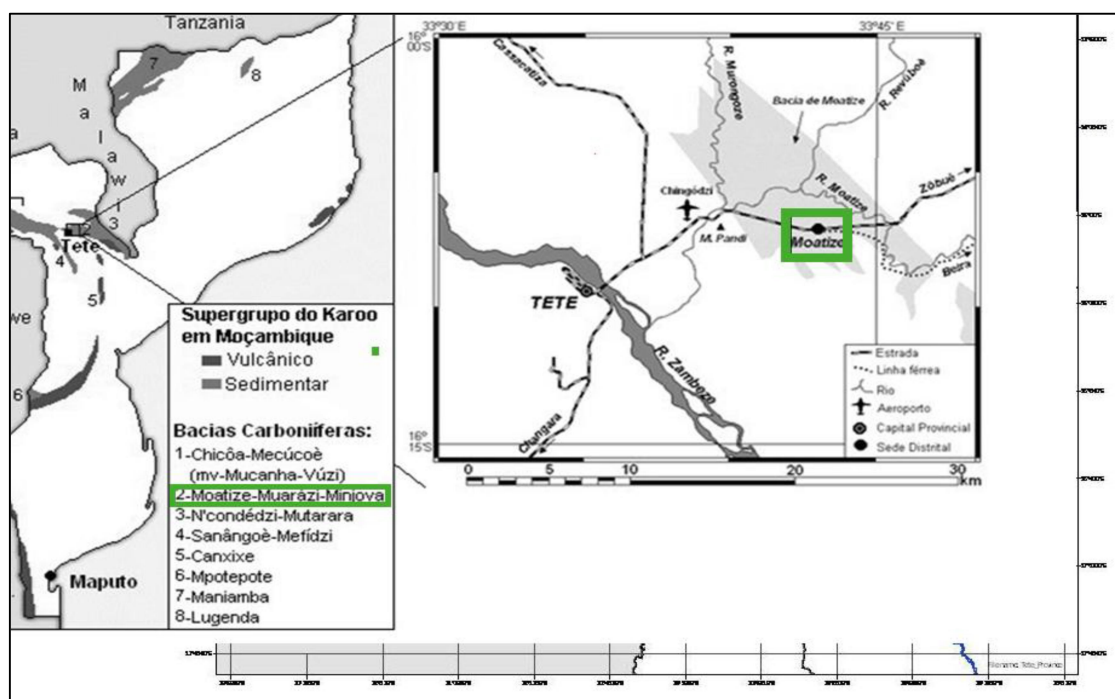
A camada Bananeira corresponde a um complexo de xistos e carvão, esta com fraca espessura de 9 m superior e 18 m inferior, ambas intercaladas por argilito arenoso.

A camada Chipanga, a mais importante da série produtiva com uma camada basal de carvão, ou seja, uma espessura de 36 m.

A camada Sousa Pinto, constituída por um complexo carbonoso com 14 m de espessura.

A Bacia de Moatize é 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, MucanhaVuzi, Moatize-Muarazi-Minjova, N'condedzi-Mutarara, Sanângoè Metídzi, Canxixe, Mpotepote, Maniamba e Lugenda (VASCONCELOS & PEDRO, 2004).



**Figura 5.** Bacias do Karoo em Moçambique e principais aspectos geográficos da zona de Tete-Moatize

Fonte: Adaptado de Vasconcelos & Pedro, (2004).



As bacias de Moatize, pelos resultados reportados em estudos recentemente apresentados por várias pesquisas realizadas, mostram que a rede de bacias carboníferas não exploradas encontra-se na província de Tete e a geologia corrente mostra que, para além destes campos de Moatize, estima-se que a oeste se estendem os depósitos de Mucanha-Vuzi (reservas > 3 bilhões de toneladas) e de Senângoe (reservas > 1 bilhão 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 ROM (*run-of-mine*), das quais 10 a 12 milhões de toneladas ano de carvão metalúrgico para exportação.

## 3.2 CONTEXTO MUNDIAL DO CARVÃO MINERAL

### 3.2.1 Origem do Carvão

De acordo com Tessari (1980), carvão é o nome dado a diversas rochas sedimentares passíveis de uso como combustíveis constituídos de um material heterogêneo originado de restos vegetais depositados em águas rasas, protegidos da ação do oxigênio do ar. Com o passar do tempo, esse material (tecido lenhoso, celulose, esporos, géis, algas etc.) sofre parcial decomposição e ação de bactérias, seguindo-se a influência da pressão exercida pelo peso do material que vai sendo depositado (pressão litostática) e do calor. Para haver uma acumulação de matéria vegetal suficiente para gerar camadas de carvão é preciso que haja uma subsidência (afundamento) da área onde o material está sendo depositado. Esse afundamento não pode ser muito rápido para permitir que haja deposição dos vegetais mortos e, ao mesmo tempo, proliferação de novas árvores. Mas também não pode ser lento demais, do contrário favorecerá a acumulação de material silicoso, que não é combustível, gerando um carvão com alto teor de cinzas. Os carvões originados de vegetais superiores de ambiente continental são chamados de *carvões húmicos*. Aqueles relacionados a algas marinhas são os *carvões sapropélicos*.

### 3.2.2 Composição e classificação

Segundo Ferreira (1980), do ponto de vista químico, os carvões caracterizam-se pelo alto teor de carbono, normalmente 55% a 95%. De acordo com esse teor, têm-se, dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: *turfa*, *linhito*, *hulha* (ou *carvão betuminoso*) e *antracito*. Um grau de pureza ainda maior que o do antracito seria o da grafita, mas ela não é combustível. Esses tipos de carvão constituem a série dos carvões e traduzem o grau de evolução (*rank*) do processo de transformação da matéria vegetal, ou seja, o grau de carbonificação. Além do *rank*, é também importante, na classificação dos carvões, o *grade*, que é a relação entre a matéria orgânica e a matéria inorgânica na camada. A turfa pode ter de 55% a 60% de carbono; o linhito, de 67% a 78%; a hulha, de 80% a 90%; e o antracito, 96%. O teor de água é alto nas turfás (75%), e muito menor nos demais carvões (8% a 10%).

O poder calorífico, propriedade fundamental, é inferior a 4.000 kcal (quilocalorias) nos linhitos e turfás, e entre 7.000 e 8.650 kcal nos demais carvões. A turfa tem a característica de permitir claramente a identificação dos restos vegetais. Assim como uma rocha ígnea é composta de minerais, o carvão é uma rocha sedimentar composta de litótipos e macerais. Os principais litótipos identificáveis macroscopicamente são vitrênio, clarênio, durênio e fusênio, que se alternam na forma de lâminas na camada de carvão. O vitrênio forma finos leitos que terminam em forma de cunha, é o litótipo mais liso e mais brilhante e forma lâminas normalmente de 3 mm a 5 mm de espessura. O clarênio é menos brilhante que o vitrênio e mostra-se finamente estriado. O durênio ocorre em leitos mais esparsos e tem aparência fosca, com superfície rugosa. É, às vezes, muito rico em esporos. O fusênio é fosco, fibroso, friável, semelhante ao carvão vegetal e é o único litótipo que suja as mãos.

### 3.2.3 Uso dos Carvões

De acordo com Gomes (2002), o uso de um carvão depende de sua qualidade e esta, por sua vez, depende da natureza da matéria vegetal que o formou, do clima e da localização geográfica à época da formação, bem como da evolução geológica da área. A extração da turfa é precedida de drenagem da área, para reduzir sua umidade. Feito isso, ela é extraída e depositada a céu aberto para uma maior redução da umidade. Depois é cortada em blocos e usada como combustível em fornalhas, termoelétricas, obtenção de gás combustível, alcatrão, ceras, parafina, amônia e outras substâncias. É

importante também seu uso na reconstituição de solos (turfa agrícola). Os linhitos podem ser de dois tipos, *marrom* ou *preto*, cada um deles com várias outras denominações. Eles são usados após secagem ou não, em gasogênios industriais, na obtenção de alcatrão e outros produtos. Por pirólise, pode fornecer ceras, fenóis, parafinas, olefinas etc. A cinza resultante de sua combustão pode ser aproveitada para a produção de cimento pozolânico e de cerâmicas.

A hulha tem dois usos principais e com base neles é dividida em carvão-vapor ou carvão energético, o mais pobre e com maior teor de cinzas, usado diretamente em fornos, principalmente em usinas termoeletricas, e em carvão metalúrgico, o mais nobre, passível de ser transformado em coque (por isso chamado também de carvão coqueificável).

O coque é um material obtido por aquecimento da hulha em ambiente fechado, sem combustão, resultando numa substância altamente porosa, leve, física e quimicamente heterogênea, de brilho metálico característico, usada como combustível na metalurgia (altos-fornos). Sua qualidade depende muito da qualidade do carvão que o originou.

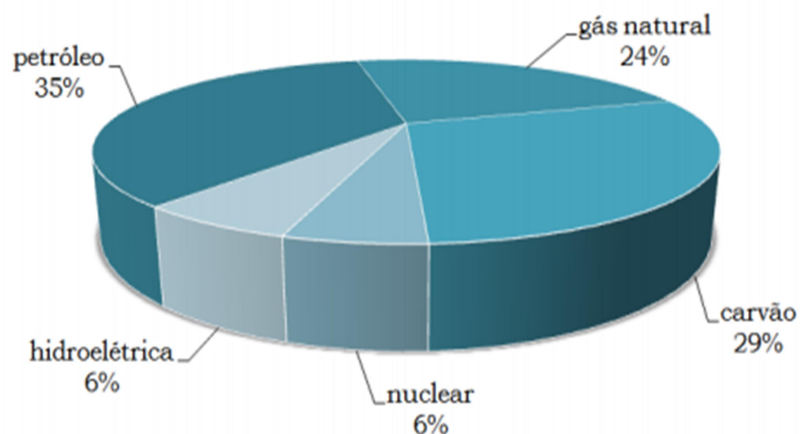
### 3.2.4 Reservas e Maiores Produtores

A matriz energética mundial, reservas mundiais de carvão, dados históricos e uma previsão da produção de carvão no mundo são apresentados neste capítulo, ressaltando a participação do carvão como um bem energético fundamental na economia mundial e com amplas expectativas de crescimento nos próximos 20 anos.

De acordo com dados da BP (2008 *apud* Ruiz 2009), atualmente a energia primária<sup>1</sup> gerada no mundo a partir de carvão é 29%, uma participação importante, maior que a do gás natural e da hidroelétrica. A figura 6 ilustra a distribuição das diferentes fontes de geração de energia primária no mundo.

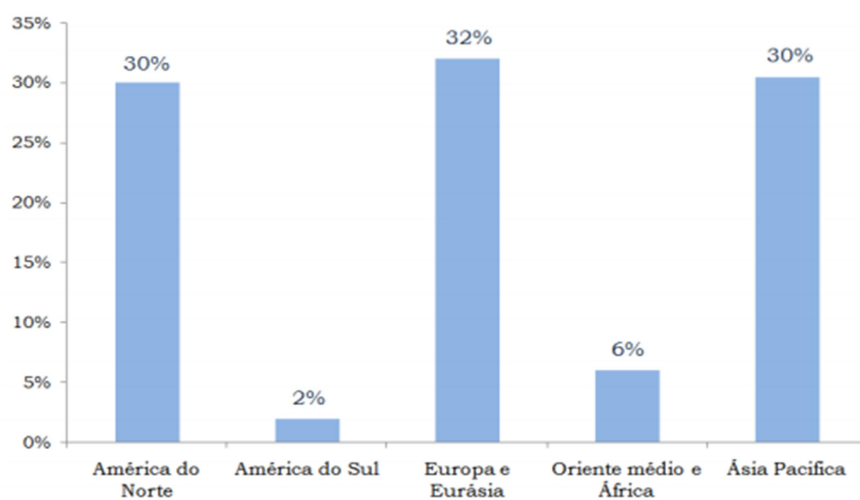
---

<sup>1</sup>Energia primaria compreende só combustíveis comerciais, este conceito não inclui energia gerada com madeira ou biocombustíveis, nem a energia eólica, geotérmica e solar.



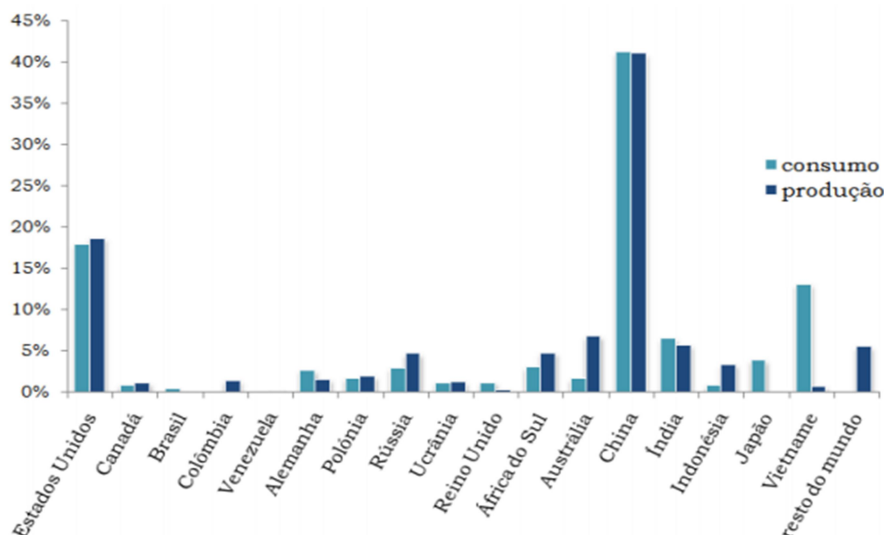
**Figura 6.** Combustíveis usados na geração de energia primária no mundo.

As reservas provadas de carvão no mundo são de 909.000 milhões de toneladas, das quais 53% referem-se ao carvão antracito e betuminoso e 47% representam o carvão sub-betuminoso e linhito. As reservas economicamente exploráveis e que atendem às exigências de qualidade do mercado internacional se encontram na sua maioria em países como Estados Unidos, Rússia, China, Índia e África do Sul. Na América Latina são importantes como recurso econômico as reservas do Brasil, Colômbia e da Venezuela, embora representem apenas 2% das reservas mundiais. A figura 7, adaptada de EIA (2007), mostra a distribuição porcentual das reservas mundiais de carvão.



**Figura 7.** Distribuição das reservas provadas de carvão no mundo.

Por outro lado, os maiores produtores de carvão são ao mesmo tempo os países que mais consomem a energia proveniente do mesmo. Tal é o caso da China, da Índia e dos Estados Unidos, que são grandes produtores, mas pelo porte das suas economias, o consumo energético é também elevado. Na figura 8, pode-se observar a produção e o consumo<sup>2</sup> de carvão mineral de alguns países durante o ano de 2007, com dados publicados por BP (2008).

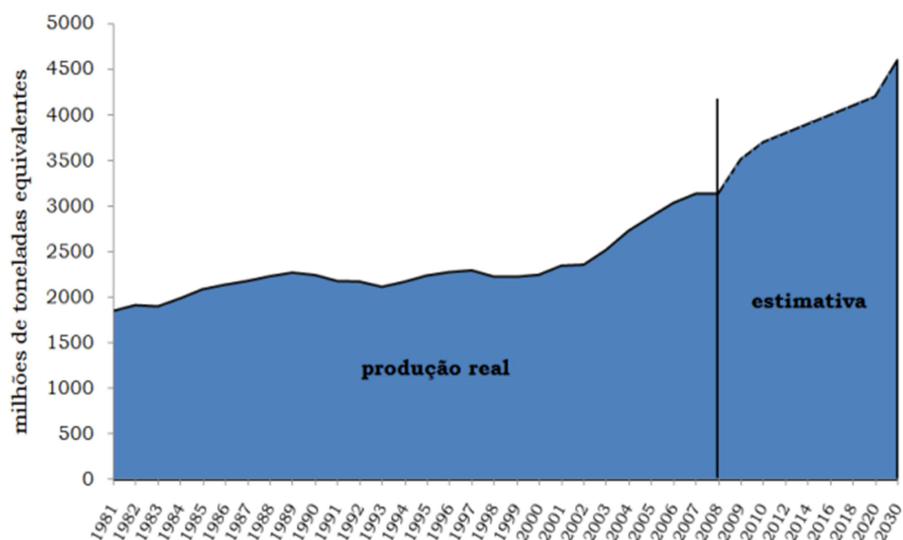


**Figura 8.** Produção e consumo mundial de carvão mineral

Segundo WCI (2007 *apud* Ruiz 2009), estima que para o ano 2030, a produção mundial seja de 8 bilhões e que a demanda de energia primária a partir de combustíveis fósseis também crescerá. Uma previsão conservadora é a de que a produção de carvão no ano de 2030 aumentará em 50% (com base na produção do ano 2006). A figura 9 apresenta um histórico da produção do carvão no mundo com dados de BP (2008) e uma previsão, realizada por EIA (2007), até o ano 2030.

---

<sup>2</sup>Porcentagem calculada sobre o total de toneladas equivalentes (TE). TE é a unidade comum de energia, é igual a massa necessária para gerar a mesma energia que 1 tonelada de petróleo cru. Uma tonelada equivalente de petróleo é aproximadamente igual a 1,5 toneladas de carvão.



**Figura 9.** Produção e previsão da produção de carvão no mundo.

### 3.3 MINA DE MOATIZE

A mina da vale-Moçambique está em operação desde 2011, projetada para produzir 11 milhões t/ano de carvão a partir de seu depósito, podendo chegar a 22 milhões t/ano, sendo 8,5 milhões de toneladas de coque para a indústria metalúrgica e 2,5 milhões de toneladas de carvão térmico para a produção de energia elétrica e projeta-se que a produção do carvão em África em geral cresça em média 3% ao ano, especificamente graças ao aumento da procura principalmente no continente asiático.

De acordo com o *rank*<sup>3</sup>, o carvão é classificado como sendo betuminoso, variando de betuminoso de baixo-altos voláteis, e faz parte da camada de Chipanga a mais importante da série produtiva com uma espessura de 30-36 m.

A lavra é a céu aberto e utiliza o método *strip mining*, por ser o método clássico de lavra mais adequado à configuração do terreno de Moatize e as condições geológicas. A figura 10 mostra o layout da camada Chipanga composta por subcamadas UCS (UCT e UCB); MCS/LCS (MLCU e LC45/6).

---

<sup>3</sup>Refere-se ao grau de carbonificação

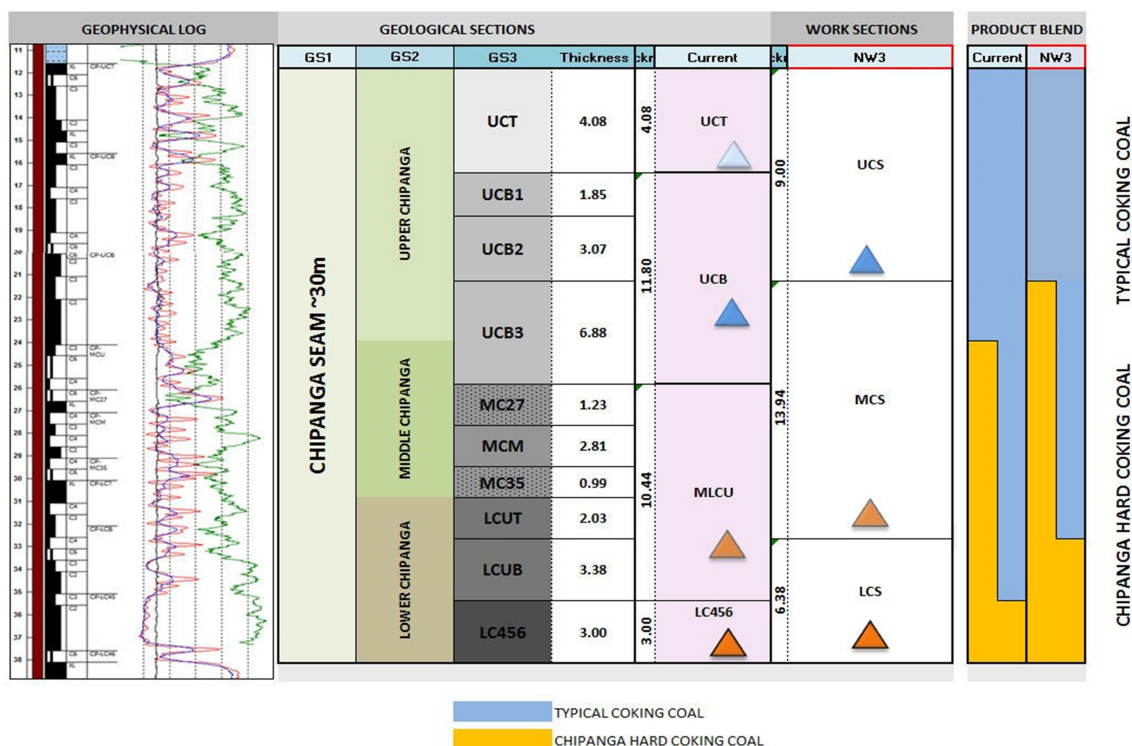


Figura 10. Representa o layout da camada Chipanga

Fonte: Vale-Moçambique, (2016)

### 3.4 FLOTAÇÃO

#### 3.4.1 Conceitos básicos

A flotação é o processo de separação seletiva de uma ou mais espécies minerais, em polpa, através de sua adesão às bolhas de ar introduzidas dentro de uma célula de flotação, com posterior levitação e remoção de agregados bolha/partícula em uma camada de espuma.

É um processo de concentração aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície entre as várias espécies minerais presentes, tratando misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa, nas quais se introduz uma fase gasosa (PERES, 1980).

Como cada mineral possui uma superfície característica, teoricamente, a flotação poderia ser aplicada em qualquer situação. O processo envolve fases: sólida, líquida e gasosa. A seletividade na fase sólida se baseia no fato de que alguns minerais apresentam superfície polar (afinidade pela água) ou apolar (afinidade pelo ar), a fase líquida geralmente é representada pela água (polar), e a fase gasosa é representada pelas bolhas de ar (apolar).

De acordo com Ruiz (2009), a flotação é um processo de separação mineral amplamente usado na concentração de minerais e de muita importância para a indústria mineira. A propriedade diferenciadora na qual se baseia a flotação é a hidrofobicidade das partículas. A hidrofobicidade está definida como o grau de afinidade de uma espécie mineral pelo ar. Espécies hidrofóbicas apresentam mais afinidade com o estado gasoso que com o estado líquido.

Leja (1982 *apud* Ruiz 2009), explica que as propriedades de hidrofobicidade e hidrofiliabilidade estão diretamente relacionadas com a polaridade das substâncias. Uma espécie hidrofóbica é aquela cuja superfície é essencialmente "apolar", portanto suas moléculas não trocam elétrons, não se dissociam em íons e não se ligam aos dipolos de água, assim esta substância apresenta mais afinidade pelo ar que pela água. Já, uma espécie hidrofílica apresenta uma superfície "polar" e pode se dissociar em íons, gerando cargas superficiais que atraem os dipolos da água, desta maneira apresenta mais afinidade pela água que pelo ar.

### **3.4.2 Aspectos gerais da flotação**

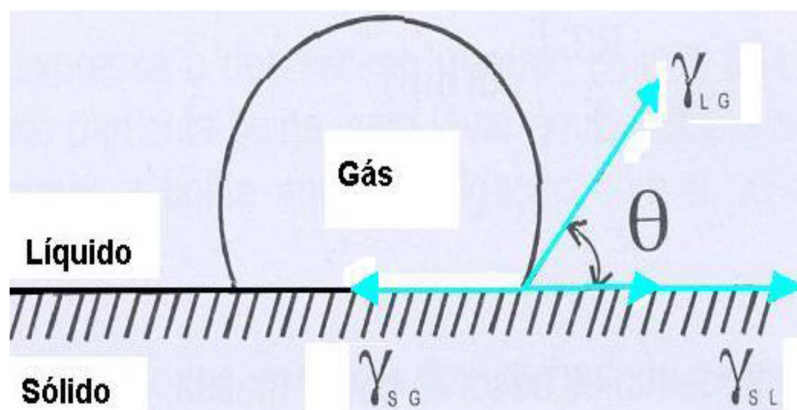
A flotação é um processo de concentração largamente utilizado. Ela tem sido praticada com sucesso em escala industrial, sendo muito eficiente para separar partículas minerais na faixa de tamanhos entre 10 e 150 $\mu$ m. O método de concentração por flotação tem viabilizado projetos cujos depósitos são formados por minérios de baixo teor.

O princípio da flotação envolve a utilização de reagentes para alterar a característica de superfície das partículas minerais e posterior separação das partículas, em uma suspensão de água (polpa). Durante o processo de flotação, as partículas com características de superfície iguais às das bolhas injetadas ao sistema são transportadas da região de polpa (ou coleta) para uma região de espuma (concentração) e posteriormente são retiradas da célula. As partículas que ficaram com a característica de superfície igual à da água acompanham o fluxo de polpa.

Na flotação temos um sistema trifásico. A fase líquida é representada pela água, que é uma espécie polar. A fase gasosa é representada pelo ar, constituído basicamente por moléculas apolares. O terceiro elemento que compõe este sistema trifásico são as



partículas minerais presentes. A separação vai ocorrer quando se atribui diferentes características de superfícies (polares e apolares) para os minerais que se deseja separar.



**Figura 11.** Ilustração do ângulo de contato formado por uma bolha de ar em uma superfície mineral

Fonte: adaptada de Baltar, (2008).

De acordo com Finch e Smith (1979 *apud* Monte *et al* 2004) a figura 11 mostra a representação esquemática do ângulo de contato entre as fases líquida, sólida e gasosa em equilíbrio, onde a equação de Young estabelece a condição termodinâmica de equilíbrio entre as interfaces envolvidas, onde o ângulo de contato  $\theta$  depende da tensão superficial ou energia livre superficial,  $\gamma$ , das três interfaces:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \times \cos\theta \quad \text{Eq. [1]}$$

onde:

$\gamma_{SG}$  - tensão superficial na interface sólido-gás;

$\gamma_{SL}$  - tensão superficial na interface sólido-líquido;

$\gamma_{LG}$  - tensão superficial na interface líquido-gás.

A equação de Young é válida para um sistema ideal, onde todos os efeitos gravitacionais estão ausentes e as três fases em equilíbrio.

Fuerstenau e Chander (1986 *apud* Monte *et al* 2004) destacam que a variação da energia livre de adesão entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar é obtida pela equação de Dupré:

$$\Delta G = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad \text{Eq. [2]}$$

A equação de Dupré expressa o decréscimo máximo possível da energia livre do sistema, que resulta no contato partícula-bolha, sem levar em consideração, no entanto, o trabalho requerido para deformar a bolha antes da ligação com o sólido bem como a geometria do sistema.

Combinando a equação de Young com a forma apropriada da equação de Dupré [2], obtém-se a equação de Young-Dupré, a qual fornece o critério termodinâmico para a flotação:

$$\Delta G = \gamma_{LG} (\cos\theta - 1) \quad \text{Eq. [3]}$$

em que:

$\Delta G$  – variação da energia livre;

$\gamma_{LG}$  – tensão superficial da interface líquido/gás;

$\cos\theta$  – cosseno do ângulo formado entre o sólido e a bolha de ar.

### 3.4.3 Influência do Tamanho da Partícula

Atualmente um dos maiores desafios das indústrias mineiras está relacionado com a recuperação de partículas minerais finas, sendo este um problema reportado em diversos trabalhos publicados nos últimos 30 anos (Trahar e Warren, 1976; Trahar, 1981; Sivamohan, 1990; Wellenkamp, 1999; Tao *et al*, 2000; Yuehua *et al*, 2003), citados por Brum (2004) esta preocupação é motivada pela necessidade de processamento de minérios que requerem um elevado grau de moagem e, conseqüentemente, resultam em significantes quantidades de finos.

Segundo Sampaio e Tavares (2005) “a dispersão dos grãos de minerais valiosos e de ganga em materiais não completamente liberados determina a distribuição de importantes propriedades que influenciam o comportamento dos materiais no processo de concentração”.

Trahar (1981 *apud* Brum 2004) apresenta a figura 12, onde a curva de recuperação versus tamanho de partícula é dividida arbitrariamente em três regiões. Nesta apresentação, as frações correspondentes aos finos (abaixo de 5 micrometros) e aos grossos (acima de 70 micrometros) seriam as faixas "problema" para o processo de flotação, enquanto que na região intermediária estariam concentradas as partículas com maior flotabilidade.

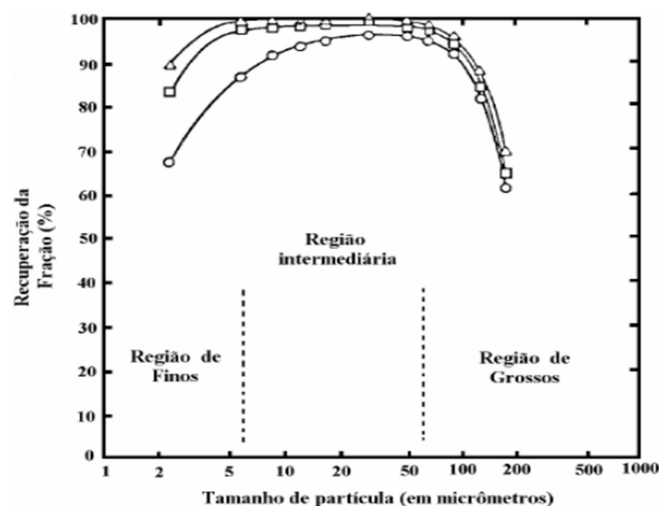


Figura 12. Representação das regiões granulométricas.

Fonte: Trahar, (1981).

### 3.4.5 Beneficiamento do carvão da mina Vale – Moçambique

De acordo com a Vale- Moçambique (2016), o beneficiamento do carvão na mina da Vale-Moçambique engloba, basicamente, as etapas de fragmentação composta de 3 etapas de britagem, separação e desaguamento, gravimetria e flotação.

A etapa de fragmentação de Moatize (composta de 3 etapas de britagem) ocorre de forma semelhante a outros sistemas, embora utilize diferentes tipos de britadores (britadores de rolos dentados). A especificidade do carvão se concentra na etapa de separação, na qual é utilizada uma série de equipamentos projetados especialmente para esse minério. Após a britagem as partículas são separadas por tamanho grosso (-50 mm +1 mm); intermediário (-1 mm + 0,25 mm) e finos (<0,25 mm), cada fração em função de suas características e de seu tamanho alimenta um circuito de beneficiamento especificamente projetado para o seu processamento. Isto permite que se obtenham os melhores rendimentos e que os seus produtos atendam as especificações.

O processamento do carvão utiliza métodos de concentração gravítica, nos quais o princípio de separação é a diferença de densidades entre as partículas de carvão e matéria mineral em um meio fluido (água, ar) ou meio denso e a flotação.

Na etapa de beneficiamento do carvão, através de processos de separação gravimétrica (ciclones de meio denso, espirais etc.) e de flotação, é feita a redução dos teores de cinzas do carvão. Um dos processos mais amplamente utilizados para a separação do carvão das cinzas é o de separação em meio denso. Nele, o carvão fragmentado é adicionado a uma polpa composta por água e magnetita finamente pulverizada, formando o chamado “meio denso”. Este meio deverá ter uma densidade intermediária entre a densidade do “carvão limpo” (mais leve) e das cinzas (mais pesado). As faixas de tamanhos das partículas aplicados no processo de separação em meio denso variam de -50 + 1 mm e para concentração em espirais variam de -1+ 0,25 mm.

Partículas menores que 0,25 mm, em polpa, é alimentado nas colunas de flotação juntamente com uma mistura de reagentes que visam formar e dar estabilidade a espuma e aumentar a hidrofobicidade das partículas de carvão para que elas se fixem às bolhas de ar. As partículas de carvão aderem às bolhas de ar da espuma indo para o

topo das colunas onde são coletadas. O carvão limpo é desaguado com a utilização de filtros ou centrífugas.

A matéria mineral se dirige com a água para o fundo da coluna onde são descarregadas em um espessador de rejeitos para recuperação da água, visando sua recirculação no circuito de beneficiamento. O rejeito final é enviado para as barragens de rejeito.

### **3.5 REAGENTES DE FLOTAÇÃO**

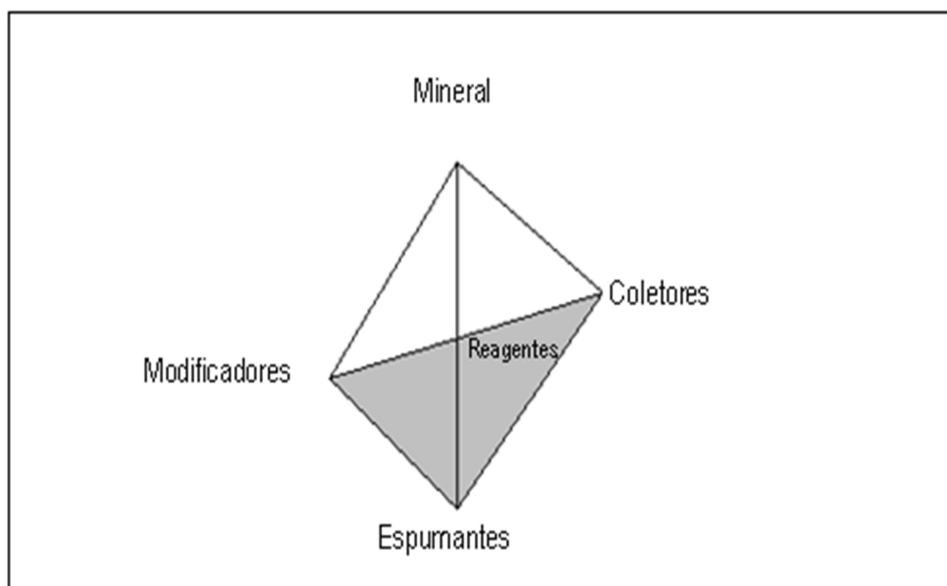
Os reagentes de flotação são os agentes mais importantes em um processo de flotação. No estágio inicial da aplicação industrial do processo de flotação, os maiores avanços científicos e/ou tecnológicos foram no desenvolvimento de novos reagentes.

Baltar (2008 *apud* Dávila 2013), o sucesso na flotação vai depender da escolha adequada do reagente que, ao mesmo tempo, contribui para quatro eventos essenciais no processo:

- Dispersão das partículas;
- Adsorção seletiva do coletor;
- Estabilidade das bolhas e
- Adesão partícula-bolha.

Uma classificação moderna dos reagentes de flotação é baseada em sua função específica no processo de flotação, sendo assim, são divididos em grupos de: coletores, espumantes e modificadores (depressores, ativadores, reguladores de pH e agentes dispersantes).

O triângulo formado pelos reagentes de flotação é à base de uma pirâmide Figura 13, que associado ao conhecimento básico, aos testes laboratoriais e nas necessidades da indústria mineral, visam a recuperação mineral (NAGARAJ, 2005).



**Figura 13.** Triângulo dos reagentes de flotação interagindo com a mineralogia.

Fonte: Nagaraj, (2005)

### 3.5.1 Coletores

Os coletores são surfactantes que têm uma estrutura típica composta de uma parte de natureza molecular (não iônica) e outra de natureza polar (iônica). A parte polar pode apresentar diversas funções e a parte molecular é sempre uma cadeia orgânica, de comprimento variável, podendo ser linear, ramificada e até mesmo cíclica.

Os coletores são distinguidos em função da sua carga iônica, podendo ser aniônicos ou catiônicos, conforme a carga elétrica do grupo polar, resultante da ionização da molécula. Existem ainda, alguns reagentes reforçadores de coleta, classificados erroneamente como coletores não ionizáveis, sendo constituídos em sua maioria por hidrocarbonetos líquidos (diesel, óleo combustível, querosene) (BERALDO, 1983). Certos minerais como grafite, enxofre nativo, molibdenita, talco e carvões betuminosos são naturalmente hidrofóbicos. Os reagentes utilizados nestes casos são óleos minerais e derivados da destilação do carvão ou então, simplesmente meros espumantes. Uma mistura de coletores pode revelar uma ação sinérgica, de modo que o efeito da mistura é superior à soma dos efeitos de cada coletor. Óleos adicionados em mistura com o coletor costumam reforçar a sua ação coletora ou então aumentar a seletividade.

### 3.5.2 Espumantes

Bulatovic (2007) define espumantes como compostos tenso-ativos heteropolares, não ionizáveis, que contem um grupo polar (OH, COOH, C=O, OSO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>OH) e uma cadeia hidrocarbônica radical, capazes de se observarem na interface água/ar. Sua função principal na flotação é reduzir a tensão superficial na interface água/ar aumentando a resistência das bolhas, tornando-as mais dispersas e estáveis, melhorando as condições para coleta das partículas de mineral hidrofobitizado.

Os espumantes utilizados na flotação são compostos orgânicos heteropolares, cuja estrutura é, portanto parecida com a dos coletores. A diferença reside no caráter funcional do grupo polar: o radical dos coletores é quimicamente ativo e capaz em princípio de interagir elétrica ou quimicamente com a superfície do mineral a ser coletado. Já os espumantes têm um radical liofílico de grande afinidade pela água. Esta diferença funcional determina o comportamento dos dois grupos de reagentes: enquanto os coletores tendem a migrar para a interface sólido-gás, os espumantes se dirigem para a interface líquido-gás.

Ao longo dos anos várias alternativas foram testadas e utilizadas por períodos em que os preços de mercado eram competitivos. Um dos espumantes utilizados com melhor desempenho na flotação de carvão foi o metil-isobutil-carbinol (MIBC), entretanto, devido a uma relação de custos-benefício desfavorável acabou sendo substituído pelo óleo de pinho, que até hoje é usado na flotação do carvão.

Leal Filho *et al.* (1993 *apud* Chaves 2009), reportam que outros espumantes sintéticos também já foram testados na flotação de finos de carvão, mas, da mesma forma que os espumantes convencionais, em função dos valores unitários relativamente baixos dos finos flotados de carvão, terminaram por não terem o seu uso viabilizado em escala industrial.

Como requisitos de qualidade para um bom espumante, os mesmos devem apresentar as seguintes características (BALTAR, 2008):

- (i) não ter propriedades coletoras, isto é, não adsorver na superfície do mineral;
- (ii) formar bolhas estáveis, permitindo o transporte de partículas minerais e a drenagem da água;

(iii) formar bolhas estáveis durante o transporte do mineral até a superfície, mas que colapsem na descarga;

(iv) insensível à variação de pH e a presença de sais dissolvidos;

(v) ter baixo custo e disponibilidade no mercado.

### 3.5.3 Finos na Flotação

Santos e Dutra (2011), destacam que os principais problemas observados na flotação dessas frações são: baixa probabilidade de colisão e adesão entre partículas e bolhas, dificuldade de superar a barreira energética entre elas, arraste mecânico, recobrimento por ultrafinos de ganga (*slime coating*), elevado consumo de reagentes, rigidez excessiva da espuma, e baixa seletividade na adsorção de reagentes, além de aspectos como composição e oxidação superficial das partículas, alterações mineralógicas e íons dissolvidos na água de processo (SONG *et al.* 2001). Todos esses fatores contribuem para uma diminuição da velocidade (cinética) de flotação e da recuperação do mineral de interesse, além de um aumento no consumo de reagentes. Por outro lado, as partículas grossas apresentam o problema contrário devido à sua massa elevada e baixo grau de liberação, o que leva a uma baixa recuperação.

Normalmente as partículas ultrafinas, com tamanho menor que 10  $\mu\text{m}$ , têm baixa eficiência de colisão com bolhas de ar e são susceptíveis ao mecanismo de arraste hidrodinâmico. Este mecanismo não distingue as partículas hidrofílicas das hidrofóbicas e está estritamente relacionado com a recuperação de água. Em alguns trabalhos (TRAHAR, 1981; WARREN, 1985; SUBRAHMANYAM e FORSSBERG, 1990) observou-se uma relação linear entre a recuperação de água e do mineral, introduzindo os conceitos de grau de arraste hidrodinâmico e recuperação real, que é a obtida somente através do mecanismo bolha partícula.

Rubio *et al.* (2004 *apud* Santos e Dutra 2011), em qualquer sistema de flotação existe uma determinada faixa de tamanho de partículas para a qual deve-se dispor de uma distribuição de tamanho de bolhas adequada para que a “captura” de partículas pelas bolhas seja maximizada. Para uma ampla distribuição granulométrica de partículas, teoricamente necessita-se de uma distribuição de tamanho de bolhas correspondente. Isto não ocorre nas condições reais de flotação em usinas de tratamento



de minérios e por isso, a recuperação das partículas minerais finas e ultrafinas é normalmente baixa.

As células de flotação convencionais geram bolhas com tamanho da ordem de 600 a 2000  $\mu\text{m}$ . Alguns difusores podem gerar bolhas de tamanho médio (100 a 600  $\mu\text{m}$ ), porém ainda insuficiente para a flotação de partículas ultrafinas (YOON, 1993). As técnicas emergentes existentes para o aumento da recuperação de finos e ultrafinos são baseadas em novos conceitos de otimização da “captura” de partículas por bolhas, através do aumento da probabilidade de colisão bolha-partícula pelo aumento da distribuição de tamanho de bolhas na célula, com injeção de bolhas médias (100 – 600  $\mu\text{m}$ ) ou pequenas ( $< 100 \mu\text{m}$ ) (SONG *et al.*, 2001; RUBIO *et al.* 2003).

Muitos estudos têm reportado que a recuperação de partículas de diâmetro entre 1 e 10  $\mu\text{m}$  tem aumentado com a diminuição do tamanho de bolhas, já que ocorre um aumento significativo da eficiência de colisão entre as bolhas e as partículas (NGUYEN *et al.* 2006; SARROT *et al.* 2007). Técnicas alternativas têm sido desenvolvidas para a geração de bolhas finas e ultrafinas, como as técnicas de flotação por ar dissolvido (FAD) e eletroflotação (KETKAR *et al.* 1991; BURNS *et al.* 1997).

#### **3.5.4 Mecanismos atuantes na flotação de carvão**

Os carvões betuminosos constituem um dos exemplos clássicos de substâncias naturais flotáveis apenas com o auxílio de espumante, sem a necessidade do uso de coletor. Esta flotabilidade natural decorre da sua estrutura química, constituída de hidrocarbonetos de cadeia muito longa e estruturas cíclicas.

Os reagentes utilizados, hidrocarbonetos líquidos, derivados de petróleo, não são coletores no sentido estrito do termo. Quando muito, poderiam ser chamados de "reforçadores da hidrofobicidade". Como a superfície do carvão betuminoso já é naturalmente hidrofóbica estes produtos apenas reforçam este caráter.

Estes hidrocarbonetos, geralmente querosene ou diesel, são emulsionados e adicionados à polpa. Eles adsorvem sobre a superfície do carvão por adesão. Tanto carvão como óleos têm maior atração entre si e pela fase gasosa que pela fase aquosa. Resulta que os óleos são segregados da fase aquosa, indo se depositar na superfície carbonosa e assim reforçam a coleta.

É convicção generalizada que alguns espumantes, especialmente o óleo de pinho, tenham ação coletora sobre o carvão. Como os espumantes são moléculas polares-não polares pode haver uma atração elétrica entre a porção polar da molécula e os sítios portadores de minerais na superfície do carvão, caracterizando assim um efeito coletor. Outros autores, entretanto, atribuem este resultado apenas à consistência da espuma, que com óleo de pinho seria capaz de arrastar mecanicamente partículas carbonosa (CHAVES, 1983). O metil-isobutil-carbinol, que gera espumas mais ralas tem, via de regra, menor recuperação mássica, mas fornece flotados de menor teor de cinzas.

Em função disso, a oxidação do carvão e a presença de partículas minerais iônicas intercrescidas com o carvão prejudicam a seletividade da flotação.

### **3.5.5 Flotação verdadeira, arraste e aprisionamento**

De acordo com George *et al.* (2004), a recuperação de partículas finas é uma função de flotação verdadeira, arraste e aprisionamento. O aprisionamento de partículas ocorre em um sistema polidisperso com as partículas finas ficando presas entre os aglomerados de partículas mais grossas e as bolhas. A recuperação de partículas finas é assim uma função de flotação verdadeira e de arraste apenas, quando não há partículas grossas adicionadas ao sistema.

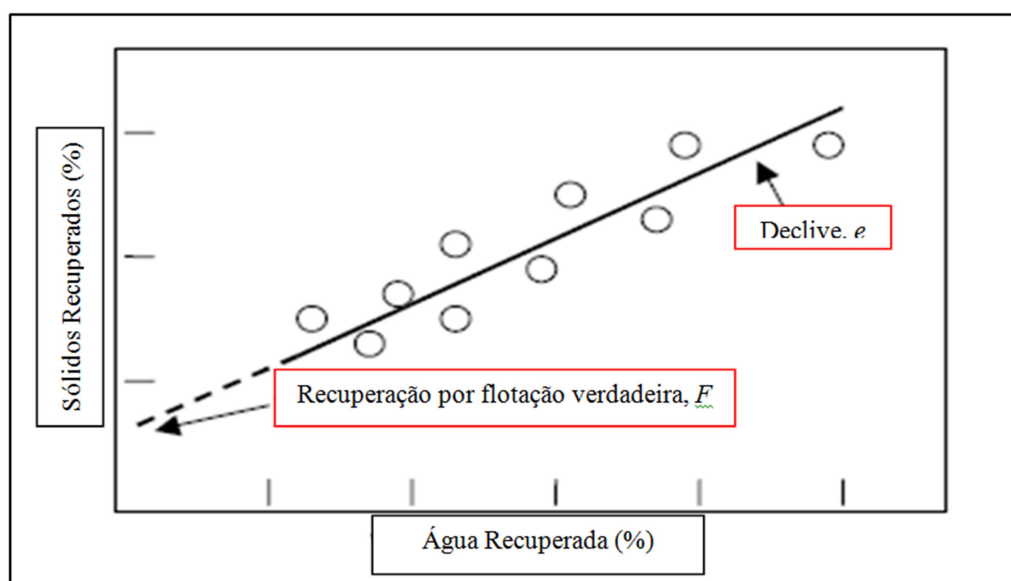
O processo de flotação verdadeira ocorre quando uma partícula colide com as bolhas de ar e sua adesão à sua superfície. A partícula selecionada é então removida da célula como parte da espuma. Por outro lado, o arraste de partículas ocorre quando as partículas são arrastadas a partir da polpa para a espuma no líquido intersticial. Enquanto a flotação verdadeira é um processo seletivo, a captura de partículas no líquido intersticial é não seletiva. Para um sistema, de espécies mistas, um elevado nível de arraste de partículas resultará em produtos de baixa qualidade.

Warren (1985 *apud* George *et al.* 2004), assumem que o arraste de partículas não ocorre em uma espuma seca. Uma série de experiências é conduzida e a taxa de recuperação de água varia alterando a taxa de remoção de espuma e a altura da espuma. A linha de regressão para a relação entre a recuperação de sólidos totais e recuperação de água é extrapolado para a recuperação de água zero. A massa de sólidos recuperados

neste ponto é a recuperação apenas por flotação verdadeira. Esta técnica pode ser resumida como:

$$R(t) = F + eW(t) \quad \text{Eq.[4]}$$

Onde,  $R(t)$  e  $W(t)$  são as recuperações do mineral (por flotação verdadeira e arraste) e água, respectivamente, como uma função de tempo,  $t$ .  $F$  é a recuperação devido à flotação verdadeira. O grau de arraste,  $e$ , é igual à inclinação de  $R(t)$  em função  $W(t)$ . Uma representação esquemática desta técnica é dada na figura 14.



**Figura 14.** Determinação da flotação verdadeira pelo método de Warren.

Fonte: Adaptado de Georg *et al.* (2004)

### 3.5.6 Cinética da flotação do carvão

As velocidades com que as espécies minerais são removidas da célula obedecem a leis semelhantes às da cinética química. Assim, pode-se falar em cinéticas de flotação de ordem zero, de primeira ordem e de segunda ordem.

Na realidade, ao se flotar um minério composto de dois minerais, *A* e *B*, haverá remoção de ambos pela espuma, uma vez que a seletividade não é perfeita.

Mesmo considerando que a velocidade de flotação do mineral *A* (que se quer flotar) é muito maior que a do mineral *B*, este será também removido, mais em menor proporção. Se a operação se estender por tempo demasiadamente longo, a quantidade de *B* flotado pode vir a prejudicar o teor do concentrado final.

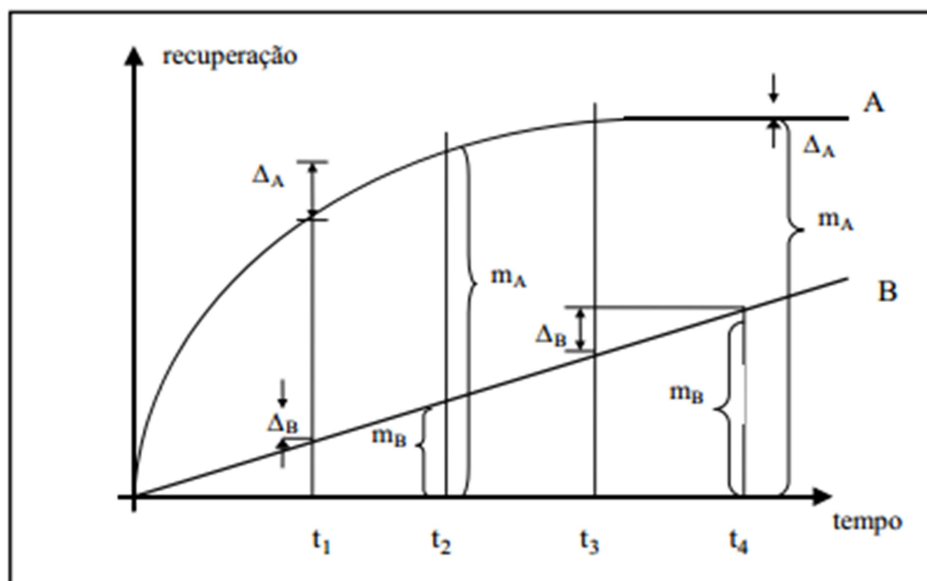
O ensaio para se medir a cinética de flotação segue a seguinte metodologia: em uma célula de laboratório, inicia-se a flotação e aciona-se o cronômetro. Recolhe-se o flotado numa bandeja durante os primeiros 30 segundos. Decorrido este período, a bandeja é substituída e passa-se a recolher a o concentrado noutra bandeja, por mais 30 segundos. Isto é repetido até que a flotação cesse.

As amostras dos diferentes flotados (e também a do deprimido) são secadas, pesadas e enviadas para análise química, para a análise de *A* e *B*. Com os resultados obtidos, é possível calcular as recuperações de *A* e *B* e representá-las num gráfico recuperação versus tempo, como mostra a Figura 15. Nesta *A* está flotando com uma cinética de primeira ordem e velocidade maior, enquanto que *B* flota com uma cinética de segunda ordem e velocidade menor. A massa removida de *A* cresce no início da flotação, diminuindo com o tempo, ao passo que a remoção de *B* é constante.

Em consequência, aumentando-se o tempo de residência do minério na célula, de  $t_1$  para  $t_2$ , as massas  $m_A$  e  $m_B$  flotadas aumentam dos diferenciais  $dA$  e  $dB$ . Quando se passa de  $t_3$  para  $t_4$ ,  $dA$  torna-se muito pequeno, enquanto que  $dB$  continua sendo significativo. Existe então um tempo de residência ótimo em que a recuperação de *A* é boa e a contaminação de *A* com *B* (relação de  $m_A$  e  $m_B$ ) é aceitável. Na figura 15, este tempo parece estar em torno de  $t_2$ : se a flotação for interrompida em  $t_2$ , a contaminação do flotado com *B* será muito menor que se o tempo de flotação for  $t_3$  ou  $t_4$ . Se a flotação for interrompida em  $t_1$ , o teor é muito bom, mas a recuperação é baixa.

O tempo de residência é, portanto, uma variável crítica para o dimensionamento e operação dos circuitos de flotação. Muitos processos de flotação podem ser

controlados quanto à sua seletividade pela avaliação correta do tempo de residência nos estágios *rougher* e *cleaner*, como é o caso dos carvões minerais. (DA LUZ *et al.*, 2010)



**Figura 15.** Cinética de Flotação

Fonte: Da Luz *et al.* (2010)

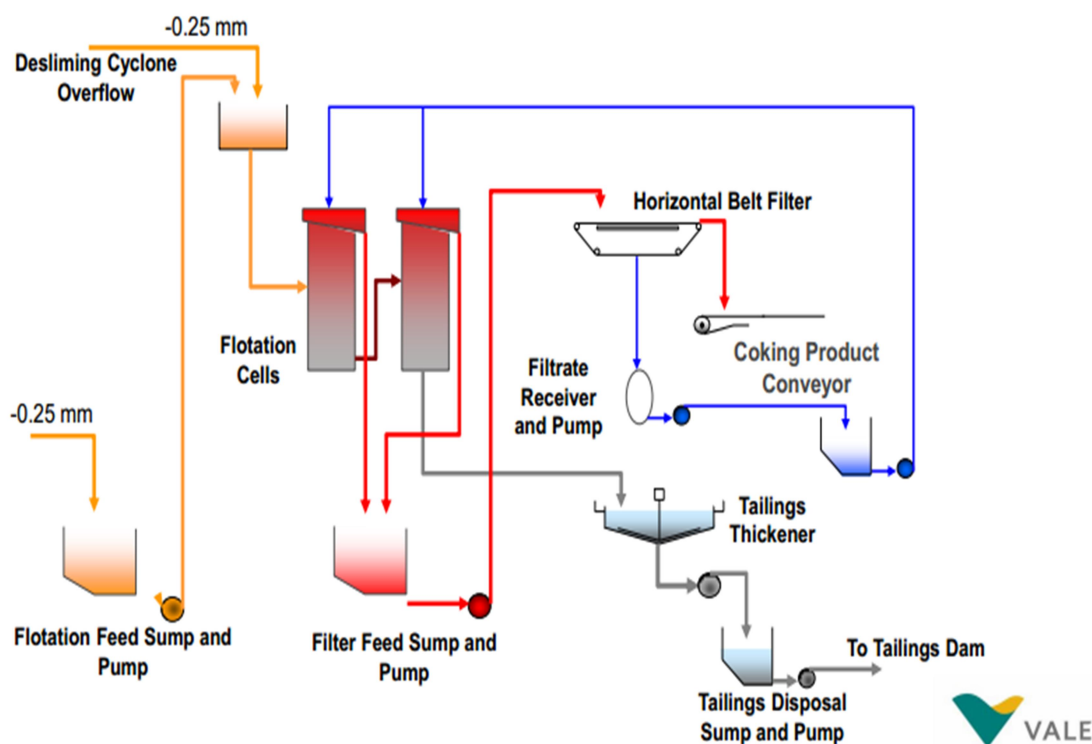
### 3.5.7 Particularidades da flotação do carvão

Segundo Chaves (1983), a prática da flotação de carvões também tem particularidades muito próprias, diferentes das práticas das substâncias minerais:

- usualmente a flotação é feita em apenas um estágio. Raramente se faz "*cleaner*" e mais raramente ainda "*scavenger*".
- a flotação dos carvões opera com granulometrias muito mais grossas que as dos minérios. Isto se deve ao baixo peso específico do carvão.
- o processo dá melhores resultados com grandes quantidades de bolhas de ar de pequeno diâmetro, justificável pelo tamanho maior das partículas.
- a flotação do carvão opera com diluições extremamente altas se comparadas com outros sistemas da ordem de 3 a 8% em peso.
- a velocidade de flotação (cinética) varia com o "*rank*" do carvão, cresce com a aeração da polpa e é aproximadamente constante nas polpas diluídas.

### 3.5.8 Processo de flotação dos finos na mina Vale - Moçambique

O processo de flotação dos finos na mina da Vale- Moçambique é realizada em duas plantas designadas **Moatize I** e **Moatize II**, e utilizam colunas para a flotação *rougher* e *Scavenger* com um teor de cinzas da alimentação em torno de 21%. A nova planta de **Moatize II** utiliza os reagentes coletor (óleo diesel) e espumante (MIBC). O novo reagente atualmente utilizado na planta de **Moatize I** é o betacol que é caracterizado como sendo 70% querosene e 30% espumante. O produto da flotação das duas plantas contém em torno de 7.5% de cinzas. O circuito de finos compreende a fração de menos 0,25 mm que representa o Overflow do ciclone deslamador e Undersize da fração passante da peneira desaguadora que alimentam o processo de flotação. A Figura 16 mostra o fluxograma do circuito de flotação dos finos de carvão da mina da Vale- Moçambique.



**Figura 16.** Fluxograma do circuito dos finos de carvão de Moatize

Fonte: Vale-Moçambique, (2016).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

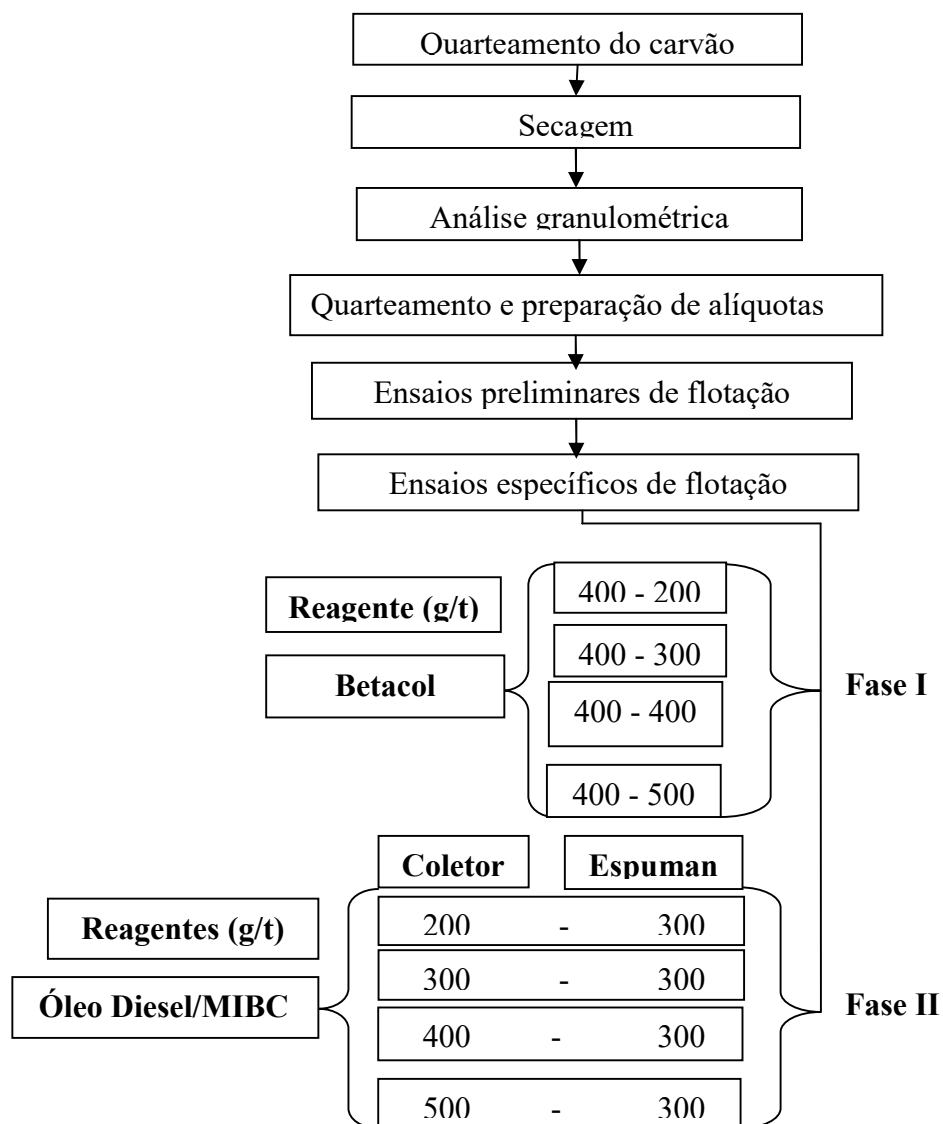
Os ensaios realizados com o carvão (*ROM*) proveniente da mina da Vale-Moçambique, são parte das atividades de pesquisa do presente trabalho e estão inseridos em um projeto maior. Este estudo foi realizado com o método de flotação convencional em bancada, utilizando uma máquina de flotação do tipo *CDC*. Buscou-se avaliar o desempenho dos reagentes para obter uma melhor recuperação de matéria carbonosa e um baixo conteúdo de teor de cinzas.

### 4.1 Equipamentos

Durante as pesquisas foram utilizados para os ensaios de flotação os seguintes equipamentos:

- Máquina de flotação tipo *CDC*, série *CFB*; modelo *CEB-1000-EEPNBA*
- Célula acrílica de flotação de 4L.
- Quarteador tipo *Jones*.
- Mufla *Jung*, modelo 2312.
- Estufa *DE LEO*.
- Balança *FILIZOLA ID-1500*, C. Máxima 75Kg, C. Mínima 1250g.
- Balança semi analítica tipo *BEL MARK K12*, C. Máx 12000g, C. Mín 5g.
- Balança analítica tipo *SHIMADZU AY220*, C. Máx 220g, C. Mín 0,01g.
- Medidor de pH tipo *ANALION PM 608 PLUS*.
- Filtro de pressão tipo *ENGENDRAR*, modelo 08 inox 304.
- Homogeneizador tipo *FISATOM*, 6000 RPM.
- Jogo de peneiras escala *TYLER*
- Peneira vibradora.
- Compressor de ar tipo *SECHUZ*, modelo *MSL 10 ml/175*.

#### 4.2 Fluxograma do método de pesquisa



**Figura 17.** Fluxograma de pesquisa

Fonte: Autoria própria, (2016)

A determinação das concentrações de reagentes mostrados no fluxograma da figura 17 foi baseada em ensaios preliminares de flotação com a finalidade de escolher o melhor comportamento dos parâmetros de concentração com uma dosagem adequada, visando uma alta recuperação mássica com menor teor de cinzas.



### 4.3 Material de ensaio

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

As amostras de ensaio pertencem a camada UCB, e fazem parte da alimentação (ROM) do processo de beneficiamento do carvão da mina Vale- Moçambique. O material veio embalado em sete tambores com uma granulometria passante em 50 mm, a seguir foi posta a secar a temperatura ambiente e depois misturou se e quarteou-se e de seguida colocou-se em tambores menores com 100 kg de carvão cada, constituindo uma amostra representativa. Para o processo de flotação, foram usados dois tambores com aproximadamente 200 kg de carvão que de seguida foi recolhido em bandejas de alumínio e secado em estufas por 2 dias no máximo, a uma temperatura de 45°C para o posterior peneiramento por forma a obter a fração passante em 0,25 mm.

### 4.4 Análise Granulométrica do carvão da camada UCB

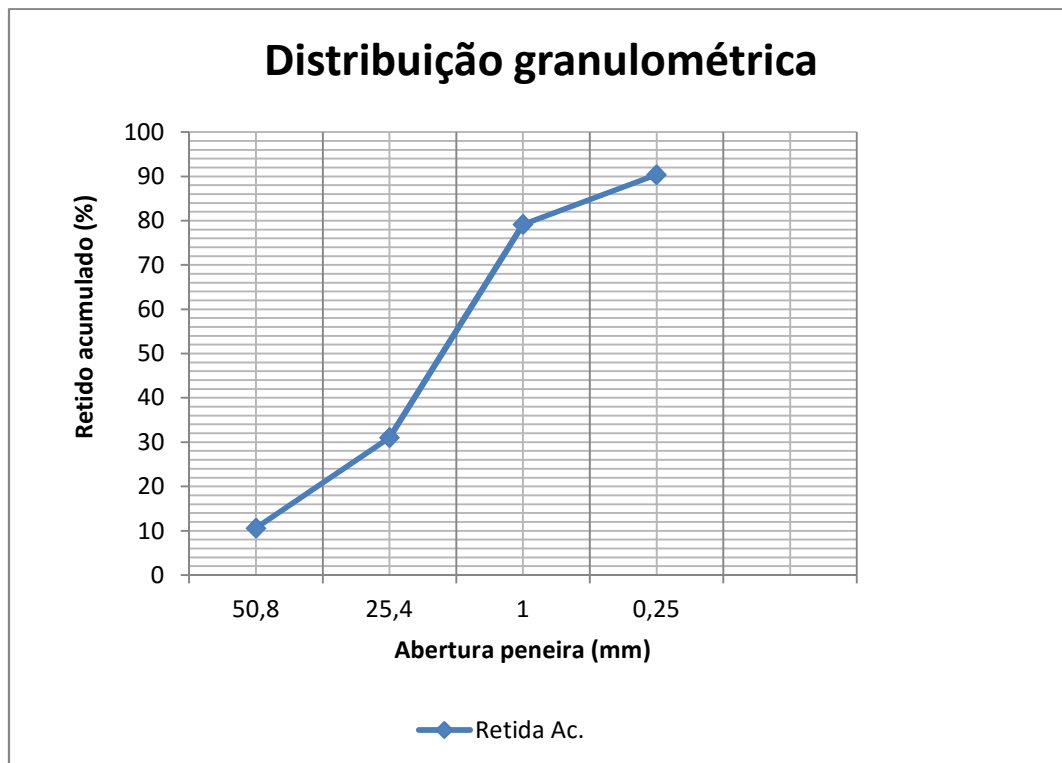
Para a obtenção da fração desejada para o estudo, o carvão foi devidamente separado por tamanho por meio da peneira vibradora onde foram usadas uma série de peneiras com aberturas de 50,8 mm, 25,4 mm, 1,00 mm e 0,25 mm.

A Tabela 1 mostra distribuição granulométrica do carvão (ROM) da camada UCB e a massa quantificada, e pode-se observar que a fração 50x1 mm compõe 79,15%, a fração 1x0,25 mm 11,25% e a fração <0,25 mm 9,60% da amostra. Isso está de acordo com o fluxo de alimentação das plantas de Moatize.

**Tabela 1.** Distribuição granulométrica da camada UCB

<b>Fração (mm)</b>	<b>Retida Simples (%)</b>	<b>Retida Acumulado (%)</b>
+50,8	10,61	10,61
-50,8+25,4	20,38	31,00
-25,4+1	48,15	79,15
-1+0,25	11,25	90,40
-0,25	9,60	
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	

A figura 18 mostra a curva granulométrica da fração retida acumuladas em função do diâmetro das partículas baseado, nos ensaios de análise granulométrica da camada UCB da Vale-Moçambique.



**Figura 18.** Curva granulométrica de cada fração granulométrica da amostra (camada UCB)

#### 4.5 Análise granulométrica da fração fina

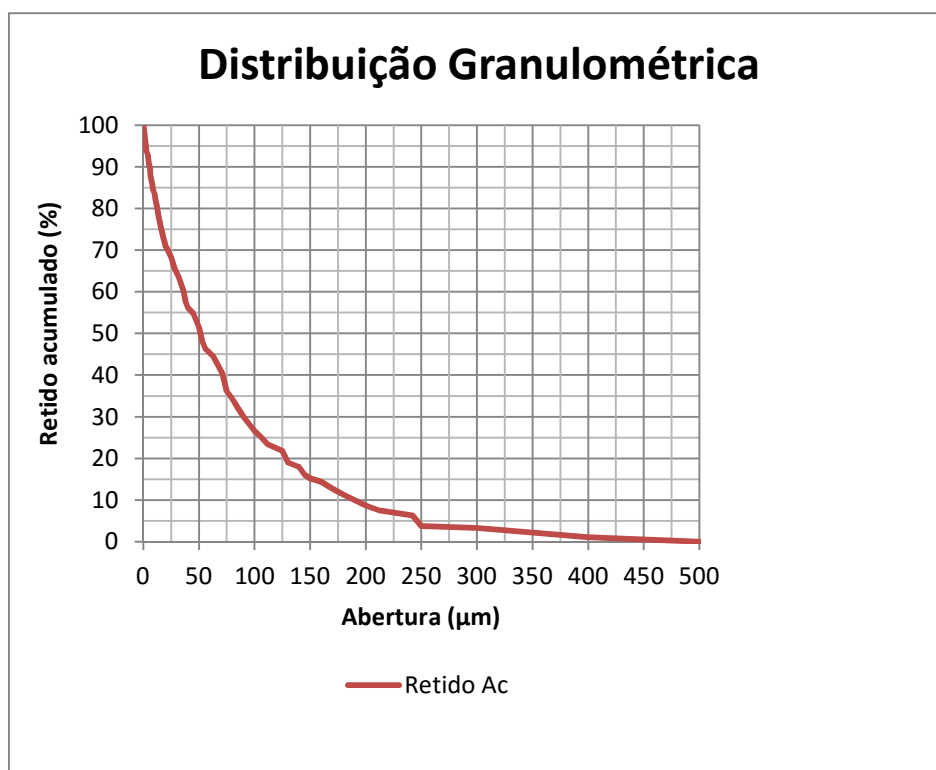
Foi realizada a análise granulométrica do material passante em 0,25 mm por difração de raios laser no aparelho CILAS PARTICLE SIZE ANALYZER modelo 1190. Foi observado que no material têm cerca de 96% passante em 0,25 mm, material este considerado como finos. De acordo com Brum (2004 *apud* Dávila 2013), os termos "finos" e "grossos" são utilizados para designar uma determinada fração granulométrica em um determinado sistema, sendo que o tamanho ótimo variará em função das características do minério. No caso do beneficiamento do carvão, tamanhos de partículas acima de 2,0 mm são considerados grossos, segundo Sampaio e Tavares (2005). A tabela 2 mostra os resultados desta análise.

**Tabela 2.** Análise granulométrica dos finos do carvão de Moatize (camada UCB).

<b>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>(%) Simples</b>	<b>Retido Ac. (%)</b>
250	3,275	3,28
200	4,28	7,56
150	6,82	14,38
100	10,67	25,05
50	23,09	48,14
25	17,59	65,73
15	9,59	75,32
10	6,765	82,08
5	7,26	89,34
2	5,815	95,16
1	2,495	97,65
0,5	1,095	98,75
<0,5	1,255	100,00

Esta distribuição granulométrica era esperada, dado que a amostra foi tratada como se fossem apenas partículas finas, não sendo possível beneficiar este material por métodos densitários por causa do seu tamanho. E de acordo com o resultado da análise granulométrica, é conveniente a aplicação dos métodos de beneficiamento físico-químicos de superfícies, entre eles a flotação. Como mencionado anteriormente este é um dos métodos mais efetivos para o processo de separação de finos de carvão onde as tensões superficiais e a hidrofobicidade jogam um papel mais importante que a densidade.

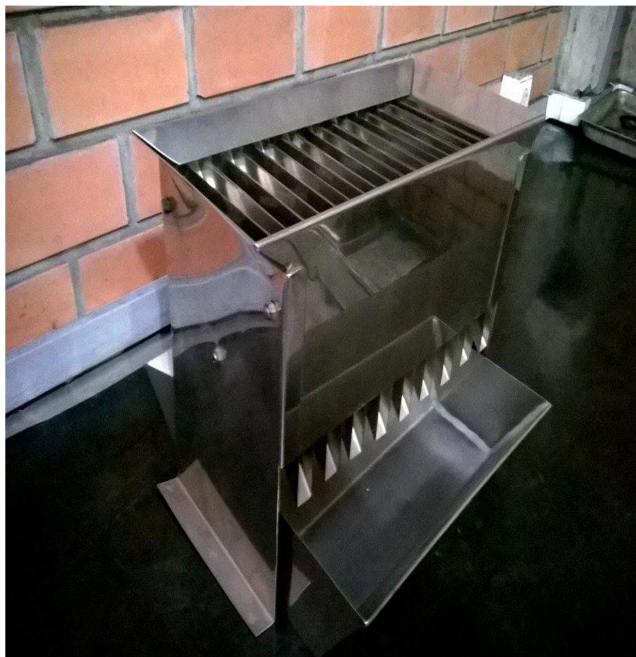
A figura 19 mostra a curva granulométrica da fração retida acumulada em função do diâmetro das partículas.



**Figura 19.** Curva granulométrica para cada fração da amostra

#### 4.6 Preparação e quarteamento da amostra

O carvão foi devidamente acondicionado em saco plástico e a massa total do material objeto de estudo foi de mais ou menos 16.140,6 g. Na qual foi quarteada em duas partes utilizando o quarteador Jones como mostra a figura 20, sendo que, uma parte foi armazenada no laboratório visando o futuro aproveitamento. A outra parte foi quarteada visando obter 16 amostras representativas e colocadas em alíquotas de plásticos com a massa de aproximadamente 400g cada, para a realização dos ensaios específicos de flotação.



**Figura 20.** Quarteador Jones

Fonte; Aatoria própria, (2016) - LAPROM-UFRGS.

#### 4.7 Reagentes utilizados

Os reagentes utilizados para os ensaios de flotação do carvão são: betacol como coletor e espumante ao mesmo tempo, óleo diesel como coletor e MIBC como espumante. Mais abaixo são descritos as características de cada reagente.

**Betacol** - é um composto químico orgânico com 70% de querosene, é um líquido miscível de cor castanho claro, de odor forte, densidade igual a  $0,8\text{g/cm}^3$  a temperatura de  $30^\circ\text{C}$  (BETACHEM, 2012).

**Óleo Diesel (OD)** - é um combustível derivado do petróleo, constituído basicamente por hidrocarbonetos, o óleo diesel é um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio (PETROBRAS, 2016).

**Metil isobutil carbinol (MIBC)** - é um composto químico orgânico, é um líquido derivado de acetona com um odor pungente de álcool. Ele tem uma solubilidade limitada em água, mas é miscível com a maior parte dos solventes orgânicos. As

principais utilizações de MIBC como um espumante são em flotação de minerais e na produção de aditivos de óleo lubrificante (CELANESE, 2016).

#### 4.8 Parâmetros operacionais do ensaio de flotação

Os parâmetros básicos definidos para os ensaios de flotação em escala de bancada são mostrados na tabela 3.

**Tabela 3.** Parâmetros dos ensaios de flotação

<b>Maquina de flotação</b>	CDC
<b>Capacidade da célula de acrílico</b>	4,0 Litros
<b>Velocidade do rotor</b>	1000 RPM
<b>Vazão de Ar</b>	1,0; 1,0; 2,0; 3,0; e 4,0 Litros por minuto
<b>Concentração dos sólidos</b>	4%
<b>Massa de sólido</b>	165,0 g
<b>Tempo de flotação</b>	1; 2; 3; 4; e 5 minutos
<b>pH da polpa</b>	(Natural) Variando de 5 a 6



**Figura 21.** Máquina de flotação de bancada tipo CDC

Fonte: Autoria própria, (2016) - LAPROM- UFRGS.

Devido ao grande volume de água contido na polpa após os ensaios, a secagem dos rejeitos da flotação em estufa mostrou-se inapropriados. Assim sendo se fez o uso do filtro de pressão para a filtração da água como mostra a figura 22.



**Figura 22.** Filtro de pressão

Fonte: Autoria própria, (2016) – LAPROM-UFRGS.

#### **4.9 Ensaio de flotação**

Os primeiros ensaios preliminares de flotação utilizaram betacol (reagente fornecido pela Vale) e óleo diesel mais MIBC (reagente fornecido pelo LAPROM/UFRGS). Buscou-se, em escala de bancada e célula convencional de flotação, simular o sistema de Moatize, com dois pontos de adição de reagentes (*rougher/scavenger*). Esses ensaios preliminares permitiram definir os parâmetros e valores de operação do sistema de flotação tais como: a concentração da polpa; a concentração dos reagentes; a vazão do ar, a velocidade do rotor, tempo de flotação e a recuperação da H<sub>2</sub>O nas duas fases dos ensaios.

*Rougher*: é o primeiro estágio de concentração e a sua prioridade é maximizar a produção. O rejeito deste estágio alimenta o estágio *Scavenger* e o concentrado alimenta o estágio *Cleaner*.

*Scavenger*: este estágio é alimentado com o material rejeitado nos demais estágios. O rejeito deste estágio é o rejeito final e o concentrado deste estágio pode alimentar um estágio *Cleaner* ou *Rougher*.

*Cleaner*: estágio que recebe o material previamente concentrado em outros estágios. A prioridade deste estágio é adequar o teor de ganga no concentrado às especificações do produto gerado.

Os valores das concentrações de reagentes definidos para os ensaios específicos após os ensaios preliminares são mostrados na tabela 4.

**Tabela 4.** Valores das concentrações de reagentes dos ensaios específicos da primeira e segunda fase de flotação.

ENSAIOS FASE I	REAGENTE BETACOL (g/t)	ENSAIOS FASE II	REAGENTE (O.D) MAIS (MIBC) (g/t)
F	R: 400- SV: 200	G	R/SV: 200 (OD) – R/SV: 300 (MIBC)
E	R: 400- SV: 300	H	R/SV: 300 (OD) – R/SV: 300 (MIBC)
D	R: 400 – SV: 400	I	R/SV: 400 (OD) – R/SV: 300 (MIBC)
C	R: 400 – SV: 500	J	R/SV: 500 (OD) - R/SV: 300 (MIBC)

Todos os ensaios foram avaliados com base em parâmetros de separações, sendo que foram considerados: recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa, recuperação da água, recuperação de cinzas bem como teores de cinzas e voláteis.

O método utilizado para os ensaios específicos de flotação foi baseado nas combinações de reagentes apresentados na tabela 4, variando deste modo as concentrações dos coletores e espumantes. O processo de flotação consistiu em duas etapas, realizadas no mesmo ensaio, sendo os primeiros dois minutos considerados a etapa *rougher* e os três restantes a etapa *scavenger*,

A primeira fase dos ensaios de flotação utilizou apenas betacol como reagente. Inicialmente foi preparada uma polpa com uma concentração de sólidos de 4% em massa na célula de flotação, a seguir esta foi condicionada por 3 minutos, e foi adicionado betacol diretamente na polpa e condicionado por 3 minutos, a seguir foi injetado o ar para geração de bolhas e acionaram-se as pás rotatórias da célula, iniciando assim iniciando-se a coleta dos concentrados por períodos de tempos de um minuto. A vazão do ar para os primeiros dois concentrados foi de 1L/min e os restantes 2; 3 e 4L/min respectivamente. Após cada minuto de coleta do concentrado, foi-se adicionando uma certa quantidade de água, para manter o nível da polpa na célula durante cada ensaio.



A espuma, recolhida em bandejas a cada minuto, constituiu o concentrado do ensaio, e foi pesada e levada à estufa para a secagem a uma temperatura de 45°C.

O mesmo procedimento foi utilizado nos ensaios com óleo diesel e MIBC, os quais, por não serem solúveis a água, foram emulsificados durante 6 minutos em água antes de serem adicionados à polpa. Primeiro, colocou-se o óleo diesel emulsificado na polpa e após o condicionamento adicionou-se o MIBC. O tempo de condicionamento para cada reagente na polpa foi de 6 minutos. A etapa *rougher* recebeu 80% dos dois reagentes e a etapa *scavenger* 20%. Este procedimento visava replicar o sistema de Moatize para óleo diesel e MIBC.

Após a secagem, o material foi pesado e realizado as análises imediatas na base seca, obtendo dados com os quais foram elaborados os gráficos de cada ensaio do processo de flotação.

Foi realizada a análise imediata da alimentação, em três vias, para determinar os parâmetros de qualidade do material cujos resultados estão apresentados na tabela 5.

**Tabela 5.** Parâmetros de qualidade do carvão da camada UCB

Parâmetro	Valor (%)
<b>Umidade higroscópica</b>	1,60
<b>Cinzas</b>	22,84
<b>Matéria volátil</b>	23,30
<b>Carbono Fixo</b>	53,86

De acordo com a tabela 5, a alimentação da flotação pode ser caracterizada como um material com elevado teor de cinzas, acima de 22%, o que pressupõem a existência de parte de matéria mineral principalmente quartzo e argilominerais.

A densidade real do carvão, fração menor do que 0,25 mm da camada UCB é de 1,52g/cm<sup>3</sup>, e foi calculada pela técnica de picnometria no LAPROM com o multipicnometro modelo MUP – 5DC.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos foram feitos em duas fases, cada uma delas com quatro ensaios de flotação divididos em duas etapas: *rougher* e *scavenger*. Na primeira fase de ensaio utilizou-se o reagente betacol e na segunda fase óleo diesel mais MIBC. As duas etapas correspondem ao mesmo ensaio de flotação com 2 minutos no *rougher* e 3 minutos para o *scavenger*, ao todo cada ensaio corresponde a 5 minutos. Essa divisão foi feita porque após o segundo minuto de flotação no *rougher* não era obtido massa suficiente para ser analisada. O mesmo acontecia após o terceiro minuto de flotação *scavenger*.

Assim sendo, os gráficos que mostram resultado “*rougher*” possuem apenas dois pontos e os resultados “*scavenger*” três pontos.

Na análise desses resultados é importante considerar que gráficos de 2 e 3 pontos não são os mais adequados. Entretanto, a particularidade desses ensaios e resultados nos levou a considerar esses gráficos para avaliar os resultados.

### 5.1 Ensaios específicos de flotação com betacol – fase I

Os ensaios a seguir foram realizados com o reagente betacol fixando a sua concentração na etapa *rougher* e variando na etapa *scavenger*.

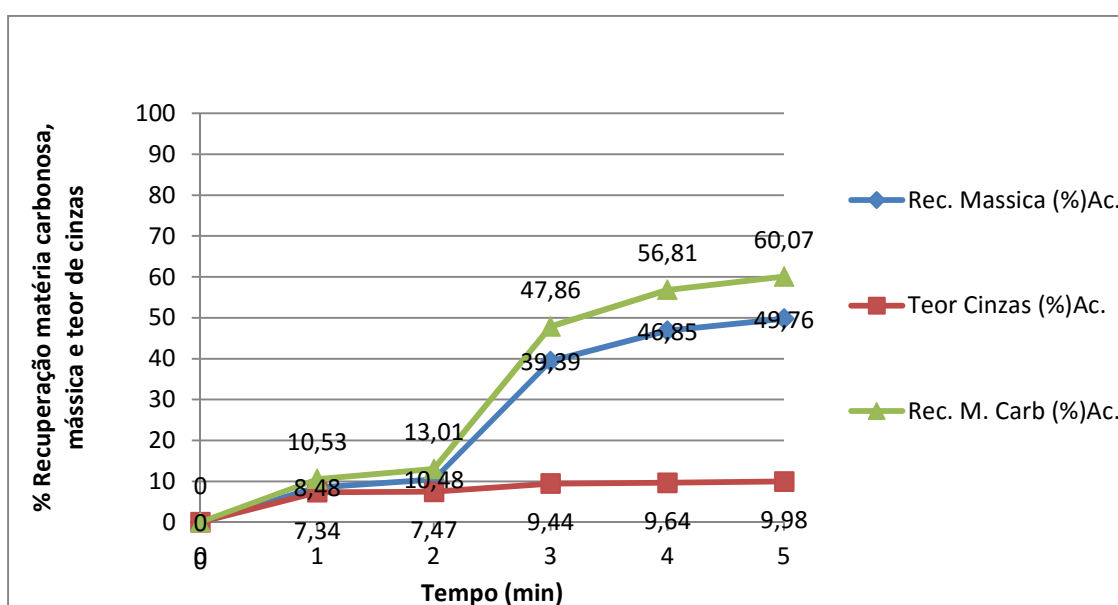
#### 5.1.1 Ensaio F (betacol 400 g/t – 200 g/t)

Este ensaio foi selecionado como o melhor ensaio devido ao seu melhor desempenho, sendo que a maior recuperação de massa e teor de cinzas para essa dosagem foram de 49,76% e 9,98% respectivamente, o que permitiu alcançar os objetivos específicos do trabalho, implicando menor consumo de reagente betacol quando comparado com os outros ensaios.

A tabela 6 mostra os resultados das recuperações mássicas, matéria carbonosa, teores da matéria carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis em função do tempo, usando uma dosagem de betacol em torno de 400 g/t na etapa *rougher* e 200 g/t para etapa *scavenger*, foi possível traçar o gráfico correspondente ao quinto minuto de flotação.

**Tabela 6.** Resultados do ensaio com betacol 400 g/t – 200 g/t

Ensaio com betacol (g/t)	flotado	massa (g)	massa (%)		teor de cinzas (%)		teor de voláteis (%)		Matéria Carbonosa (%)		
			%	acum	%	acum	%	acum	"teor"	recup.	Acum
400 - 200	1	14	8,48	8,48	7,34	7,34	25,8	25,80	66,86	10,53	10,53
	2	3,3	2,00	10,48	8,00	7,47	25,23	25,69	66,77	2,48	13,01
	3	47,7	28,91	39,39	10,16	9,44	24,91	25,12	64,93	34,85	47,86
	4	12,3	7,45	46,85	10,71	9,64	24,62	25,04	64,67	8,95	56,81
	5	4,8	2,91	<b>49,76</b>	15,32	9,98	24,42	25,00	60,26	3,25	<b>60,07</b>
	Rej.	75,2	45,58	95,33	33,51		20,4	22,80	46,09	39,00	
	A		<b>165</b>	<b>100,00</b>		<b>22,84</b>		<b>23,3</b>		<b>53,86</b>	

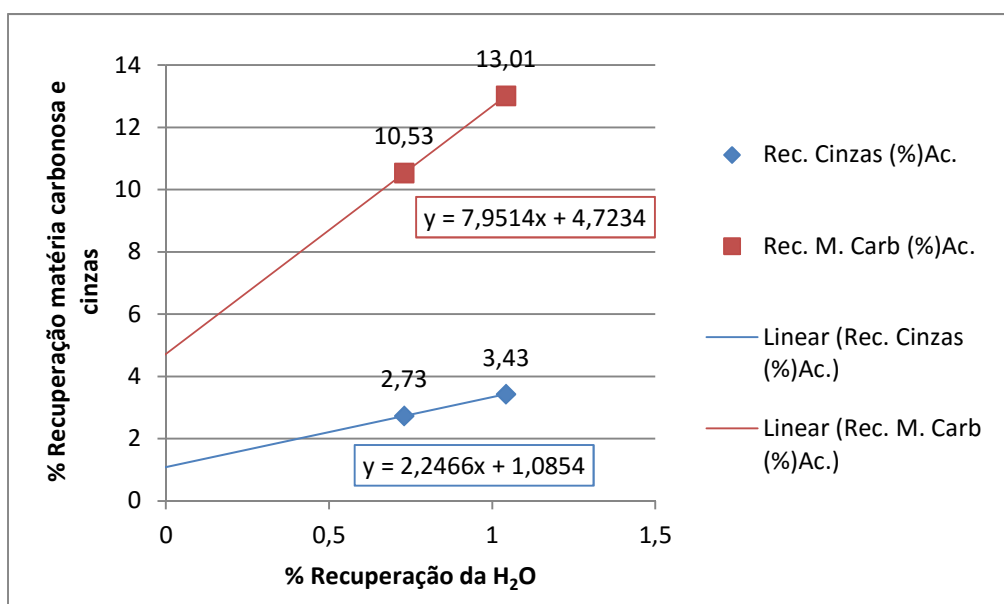
**Figura 23.** Ensaio específico de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com betacol 400 g/t – 200 g/t.

Na figura 23, pode-se verificar que os valores de teores de cinzas nos primeiros dois minutos da etapa *rougher* foram praticamente iguais, havendo de seguida um aumento para 9,98% até o último minuto da etapa *scavenger* com uma recuperação mássica de 49,76% contra os 60,07% de recuperação da matéria carbonosa.

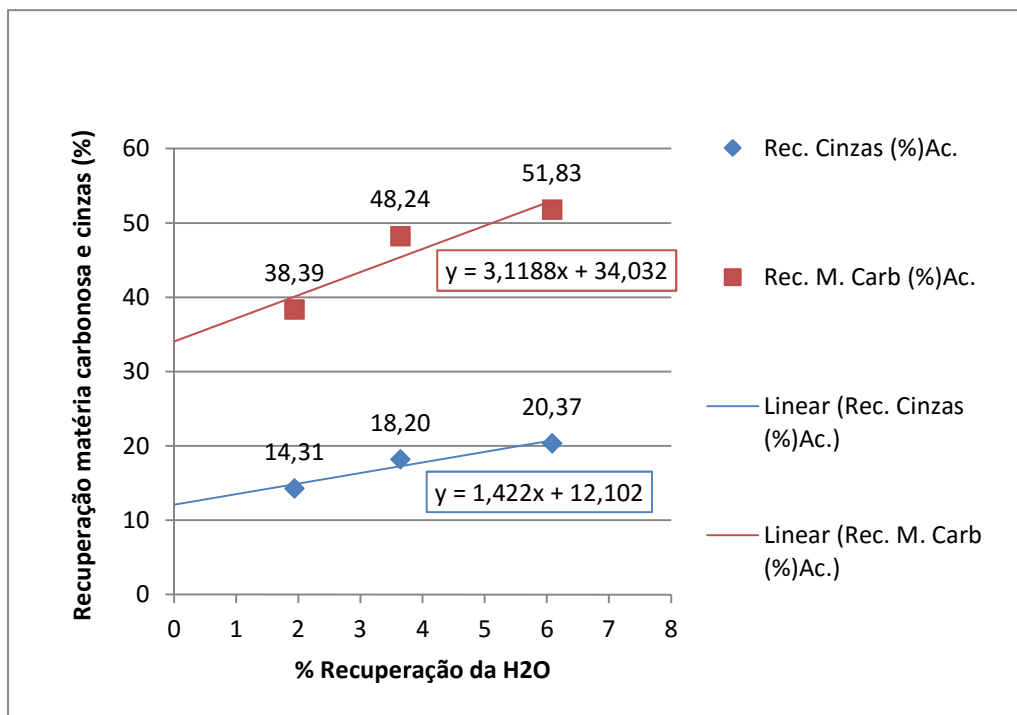
A tabela 7 mostra os resultados das recuperações mássicas, matéria carbonosa, recuperação de cinzas, H<sub>2</sub>O, teores da matéria carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis em função do tempo, usando uma dosagem de betacol em torno de 400 g/t na etapa *rougher* e 200 g/t para etapa *scavenger*, foi possível traçar o gráfico correspondente ao quinto minuto de flotação.

**Tabela 7.** Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H<sub>2</sub>O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.

Ensaio	PH	Reagente betacol (g/t)	Tempo (min)	Rec. Mássica (%Ac.)	Rec. H <sub>2</sub> O (%Ac.)	Teor Cinzas (%Ac.)	Rec. Cinzas (%Ac.)	Teor M. carb (%Ac.)	Rec. M. Carb (%Ac.)
F	5,5	400 - 200	1	8,48	0,73	7,34	2,73	66,86	10,53
			2	10,48	1,04	7,47	3,43	66,84	13,01
			3	39,39	2,98	9,44	14,31	65,44	38,39
			4	46,85	4,68	9,64	18,20	65,32	48,24
			5	49,76	7,13	9,98	20,37	65,02	51,83
			Rej.	95,33		21,23	94,79	55,97	94,79



**Figura 24.** Ensaio específico de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 200 g/t.



**Figura 25.** Ensaio específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 200 g/t

As análises dos gráficos de recuperação de H<sub>2</sub>O, das figuras 24 e 25, mostram que para recuperação de H<sub>2</sub>O igual a zero a recuperação por flotação verdadeira da matéria carbonosa e das cinzas por contato bolha/partícula na etapa *rougher* ficaram em torno de 4,7% contra os 1,09%. No *scavenger* esses valores aumentaram bastante, ficando em torno de 34,03% de matéria carbonosa contra os 12,10% de cinzas. Os valores de flotação verdadeira para as cinzas (matéria mineral) podem ser explicados pela flotação de partículas mistas. O percentual de recuperação da flotação apenas por arraste hidrodinâmico ou mecânico no *rougher* e no *scavenger* estiveram em torno de 8,29% a 2,34% e 17,8% a 8,27% respectivamente.

### 5.1.2 Ensaio E (betacol 400g/t – 300g/t)

No gráfico da figura 31 do Anexo I, é possível observar que os valores de teores de cinzas nos primeiros dois minutos da etapa *rougher* foram os mesmos, mas com baixas recuperações de massa e matéria carbonosa de 14,85% e 18,35%, havendo um aumento significativo de recuperação mássica no *scavenger* para 60,06% com 72,09% na recuperação da matéria carbonosa com teor de cinzas em torno de 10,81%.

Os gráficos de recuperação de H<sub>2</sub>O das figuras 32 e 33 do Anexo I, mostram o percentual das recuperações da matéria carbonosa e cinzas por flotação verdadeira em função da recuperação da água, onde no *rougher* para recuperação de H<sub>2</sub>O igual a zero a recuperação da matéria carbonosa por flotação verdadeira por contato bolha/partícula foi de 5,29% contra os 1,46% de cinzas. Na etapa *scavenger* houve um aumento significativo de 42,66% da matéria carbonosa contra os 15,62% de cinzas. O aumento desses valores de recuperação da matéria mineral pode-se traduzir pela existência de flotação de espécies mistas no sistema. O percentual de recuperação da flotação apenas por arraste hidrodinâmico ou mecânico no *rougher* e no *scavenger* estiveram em torno de 13,06% a 3,68% e 20,89% a 9,78% respectivamente.

### 5.1.3 Ensaio D (betacol 400g/t – 400g/t)

O gráfico da figura 34 do Anexo I, mostra que os valores de teores de cinzas nos primeiros dois minutos da etapa *rougher* foram iguais, com uma estimativa de massa recuperada em torno de 12,73% e matéria carbonosa 15,92%, havendo um incremento significativo no *scavenger* para 61,82% de recuperação mássica, e 72,45% de recuperação da matéria carbonosa, com um teor de cinzas chegando a atingir os 10,47%.

Nos gráficos de recuperação de H<sub>2</sub>O das figuras 35 e 36 do Anexo I, mostra que para recuperação de H<sub>2</sub>O igual a zero a flotação verdadeira por contato bolha/partícula na etapa *rougher* foram em torno de 5,77% da matéria carbonosa contra os 1,37% de cinzas. No *scavenger* houve um acréscimo dos valores, ficando em torno de 39,75% de matéria carbonosa contra os 15,72% de cinzas, assumindo-se também que o aumento desses valores de recuperação das cinzas deve-se pela presença de partículas mistas ao longo da espuma. O percentual de recuperação da flotação apenas por arraste hidrodinâmico ou mecânico no *rougher* e no *scavenger* estiveram em torno de 10,15% a 2,56% e 27,20% a 10,96% respectivamente.

### 5.1.4 Ensaio C (betacol 400g/t – 500 g/t)

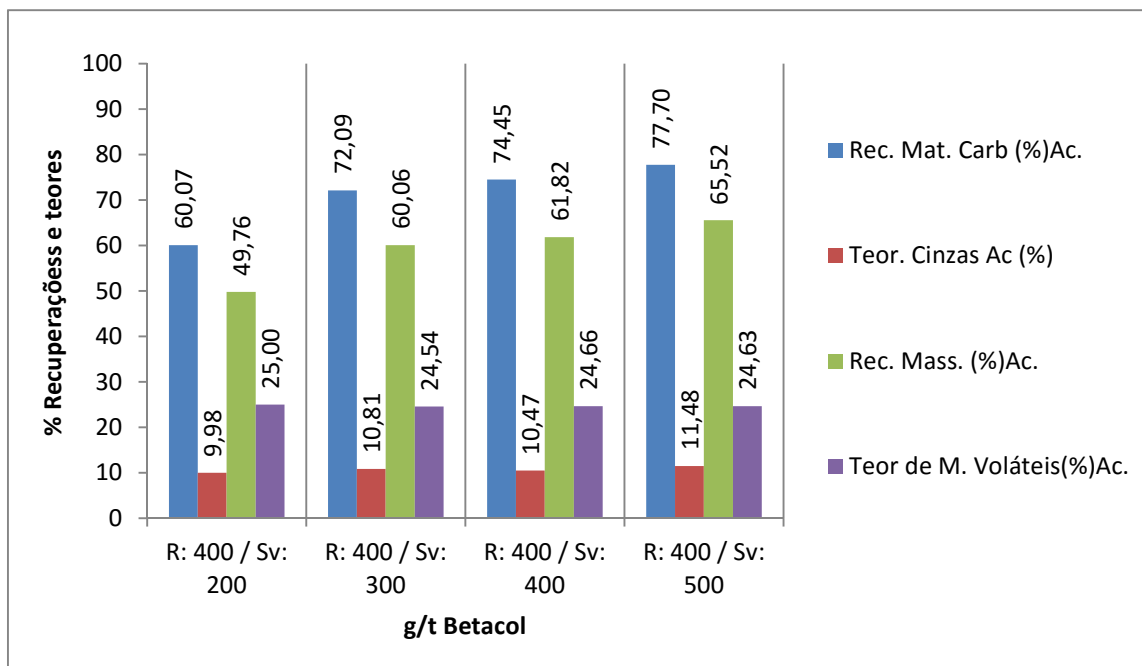
No gráfico da figura 37 do Anexo I, indica que os valores de teores de cinzas nos primeiros dois minutos da etapa *rougher* foram constante, com valores percentuais de recuperações mássicas e matéria carbonosa em torno de 13,82% e 17,21% respectivamente, havendo de seguida um aumento considerável na etapa *scavenger* de

65,52% de massa contra os 77,7% da matéria carbonosa com um teor de cinzas final de 11,48%.

As análises dos gráficos de recuperação de H<sub>2</sub>O das figuras 38 e 39 do Anexo I, mostram que para recuperação de H<sub>2</sub>O igual a zero, a recuperação por flotação verdadeira por contato bolha/partícula da matéria carbonosa na etapa *rougher* ficou em torno de 6,10% contra os 1,46% de recuperação de cinzas. No *scavenger* os valores aumentaram consideravelmente, ficando em torno de 38,22% de recuperação da matéria carbonosa contra os 16,20% de cinzas. O que indica que eventualmente partículas mistas tenham sido recuperadas por flotação verdadeira em todo sistema. O percentual de recuperação da flotação apenas por arraste hidrodinâmico ou mecânico no *rougher* e no *scavenger* estiveram em torno de 11,11% a 3,06% e 32,34% a 15% respectivamente.

**Tabela 8.** Ensaio de flotação: Recuperação mássica, recuperação carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis em função da variação dos reagentes para 5 minutos de flotação.

Ensaio	Betacol (g/t)	Rec. M. Carb. (%) Ac.	Teor. Cinzas (%) Ac.	Rec. Máss. (%) Ac.	Teor de M.V (%)Ac.
F	R: 400 / Sv: 200	60,07	9,98	49,76	25,00
E	R: 400 / Sv: 300	72,09	10,81	60,06	24,54
D	R: 400 / Sv: 400	74,45	10,47	61,82	24,66
C	R: 400 / Sv: 500	77,70	11,48	65,52	24,63



**Figura 26.** Ensaios específicos de flotação: Valores acumulados das recuperações mássicas, matéria carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis para 5 minutos de flotação, variando o reagente betacol.

Segundo o gráfico da figura 26, pode-se verificar que os valores percentuais dos teores de cinzas e teores de materiais voláteis são praticamente constantes, verificando-se um acréscimo dos valores percentuais de recuperações mássicas e matéria carbonosa na medida em que aumenta as concentrações dos reagentes.

## 5.2 Ensaios específicos de flotação com óleo diesel mais MIBC- fase II

Para a combinação óleo diesel- MIBC, o espumante foi fixado em 300 g/t, variando o coletor. Os ensaios para esta fase seguem os mesmos parâmetros operativos e de execução que os anteriormente realizados.

### 5.2.1 Ensaio G: 200 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)

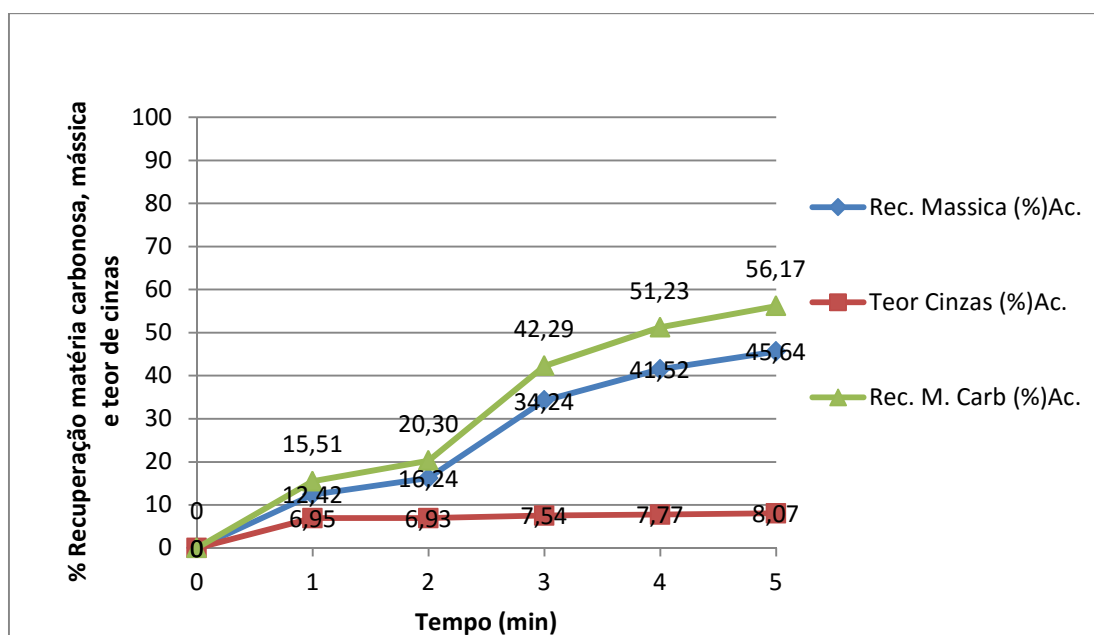
Quanto aos ensaios com óleo diesel mais MIBC, esse foi selecionado o melhor ensaio, dado o seu melhor desempenho dos resultados de recuperações mássicas e teor de cinzas em torno de 45,64% e 8,07% respectivamente. Apesar dos valores não terem alcançado os objetivos específicos do trabalho, é interessante destacar que para este ensaio a concentração de coletor foi menor que nos outros.



A tabela 9 mostra os resultados das recuperações mássicas, matéria carbonosa, teores da matéria carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis em função do tempo, usando uma dosagem de 200 g/t (O.D) –300 g/t (MIBC) nas duas etapas de flotação *rougher* e *scavenger*, foi possível traçar o gráfico correspondente ao quinto minuto de flotação.

**Tabela 9.** Resultado do ensaio 200 g/t (O.D) –300 g/t (MIBC)

Ensaio (g/t)	flotado	massa (g)	massa (%)		teor de cinzas (%)		teor de voláteis (%)		Matéria Carbonosa (%)		
			%	acum	%	acum	%	acum	"teor"	recup.	recup. Acum
200 (O.D) - 300 (MIBC)	1	20,5	12,42	12,42	6,95	6,95	25,80	25,80	67,25	15,51	15,51
	2	6,3	3,82	16,24	6,88	6,93	25,58	25,75	67,54	4,79	20,30
	3	29,7	18,00	34,24	8,09	7,54	26,11	25,94	65,80	21,99	42,29
	4	12	7,27	41,52	8,84	7,77	24,95	25,77	66,21	8,94	51,23
	5	6,8	4,12	<b>45,64</b>	11,09	8,07	24,31	25,63	64,60	4,94	<b>56,17</b>
	Rej.	82,3	49,88	95,52	32,90		20,22	22,81	46,88	43,41	
	A		<b>165</b>	<b>100,00</b>		<b>22,84</b>		<b>23,3</b>		<b>53,86</b>	



**Figura 27.** Ensaio específico de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com 200 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC).

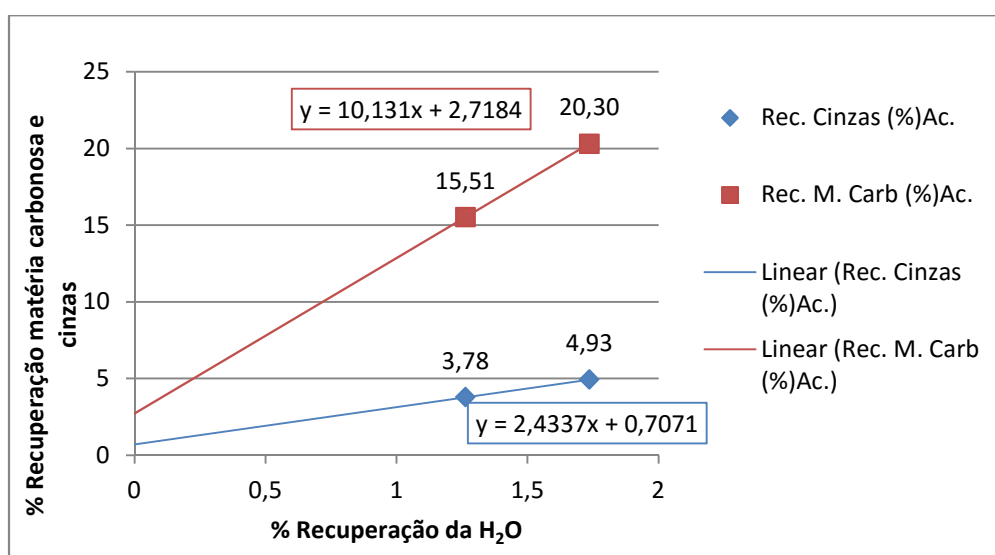
Com relação ao gráfico da figura 27, nota-se que com as dosagens de óleo diesel mais MIBC, os valores dos teores de cinzas apresentam uma ligeira variação nas duas etapas *rougher* e *scavenger*, ficando em torno de 8,07% até o último minuto de flotação.

com uma recuperação mássica de 45,64% com 56,17% de recuperação da matéria carbonosa.

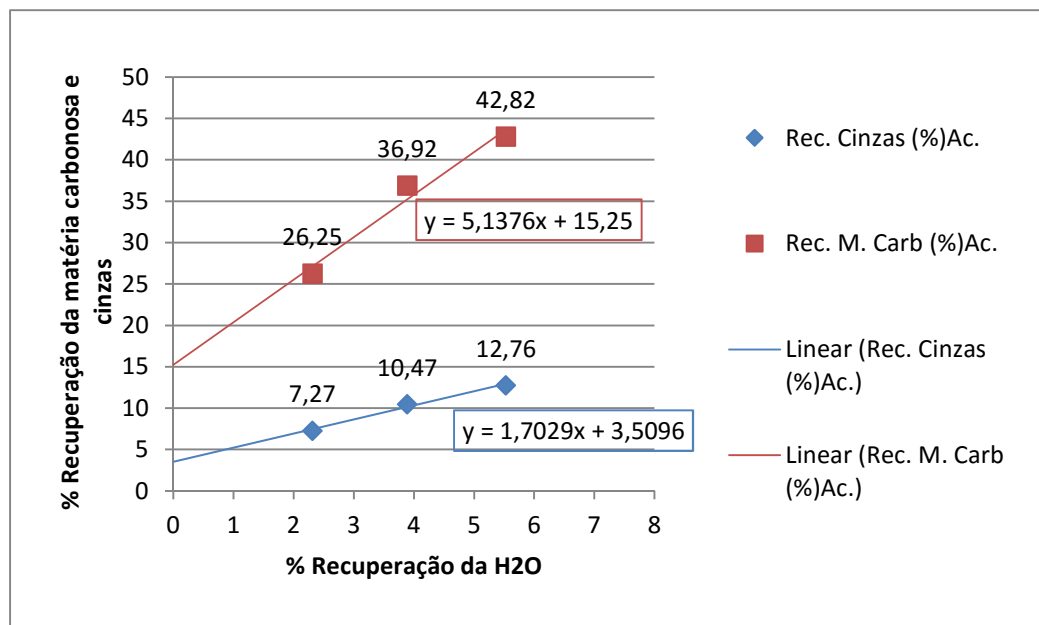
A tabela 10 mostra os resultados das recuperações mássicas, matéria carbonosa, recuperação de cinzas, H<sub>2</sub>O, teores da matéria carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis em função do tempo, usando uma dosagem de 200 g/t (O.D) –300 g/t (MIBC) nas duas etapas de flotação *rougher* e *scavenger*, foi possível traçar o gráfico correspondente ao quinto minuto de flotação.

**Tabela 10.** Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H<sub>2</sub>O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.

Ensaio	PH	Reagente OD e MIBC (g/t)	Tempo (min)	Rec. Mássica (%Ac.)	Rec. H <sub>2</sub> O (%Ac.)	Teor Cinzas (%Ac.)	Rec. Cinzas (%Ac.)	Teor M. carb (%) Ac.	Rec. M. Carb (%Ac.)
G	6,2	200 - 300	1	12,42	1,26	6,95	3,78	67,25	15,51
			2	16,24	1,74	6,93	4,93	67,32	20,30
			3	34,24	4,04	7,54	7,27	66,52	26,25
			4	41,52	5,62	7,77	10,47	66,47	36,92
			5	45,64	7,26	8,07	12,76	66,30	42,82
			Rej.	95,52		21,04	94,65	53,83	94,65



**Figura 28.** Ensaios específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 200 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)



**Figura 29.** Ensaio específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 200 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC).

As análises dos gráficos de recuperação de H<sub>2</sub>O das figuras 28 e 29 mostram que para recuperação de H<sub>2</sub>O igual a zero a recuperação por flotação verdadeira por contato bolha/partícula da matéria carbonosa na etapa *rougher* ficou em torno de 2,72% contra os 0,71% de recuperação de cinzas. Havendo na etapa *scavenger* um aumento em torno de 15,25% de recuperação da matéria carbonosa contra os 3,51% de cinzas. O que se pode observar que o aumento da recuperação por flotação verdadeira da matéria mineral pode estar relacionado com a existência de partículas mistas ao longo do sistema. O percentual de recuperação da flotação apenas por arraste hidrodinâmico ou mecânico no *rougher* e no *scavenger* estiveram em torno de 17,58% a 4,22% e 27,57% a 9,25% respectivamente.

### 5.2.2 Ensaio H: 300 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)

Com relação ao gráfico da figura 40 do Anexo II, nota-se que com as dosagens de óleo diesel mais MIBC os valores dos teores de cinzas apresentam uma ligeira variação nas duas etapas *rougher* e *scavenger*, ficando em torno de 8,09% até o último minuto de flotação com uma recuperação mássica de 37,09% com 45,75% de recuperação da matéria carbonosa.

Quanto aos gráficos de recuperação de H<sub>2</sub>O das figuras 41 e 42 do Anexo II, mostram que para a recuperação de H<sub>2</sub>O igual a zero a flotação verdadeira por contato bolha/partícula da matéria carbonosa na etapa *rougher* ficou em torno de 1,27% contra os 0,35% de recuperação de cinzas. Havendo na etapa *scavenger* um aumento para 14,24% de recuperação da matéria carbonosa contra os 3,26% de cinzas, o que pode se ainda assumir que tenha havido partículas mistas que tenham sido recuperadas na espuma. O percentual de recuperação da flotação apenas por arraste hidrodinâmico ou mecânico no *rougher* e no *scavenger* estiveram em torno de 4,06% a 1,41% e 26,29% a 8,86% respectivamente.

### **5.2.3 Ensaio I: 400 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)**

O gráfico da figura 43 do Anexo II, mostra que os valores percentuais dos teores de cinzas no *rougher* são praticamente constantes, apresentando uma ligeira variação das recuperações mássicas e matéria carbonosa de 5,70% para 7,02% respectivamente, havendo no *scavenger* um aumento significativo em torno de 36,06% de massa com 44,38% da matéria carbonosa com um teor de cinzas total correspondente a 8%.

De acordo com as análises dos gráficos de recuperação de H<sub>2</sub>O das figuras 44 e 45 do Anexo II, mostram que para recuperação de H<sub>2</sub>O igual a zero a recuperação verdadeira da matéria carbonosa por contato bolha/partícula na etapa *rougher* ficou em torno de 1,97% contra os 0,46% de recuperação de cinzas. No *scavenger* a recuperação por flotação verdadeira aumentou para 13,11% contra os 2,68% de cinzas, havendo assim um aumento da recuperação das cinzas por causa da existência de espécies mistas. O percentual de recuperação da flotação apenas por arraste hidrodinâmico ou mecânico no *rougher* e no *scavenger* estiveram em torno de 5,05% a 1,39% e 24,25% a 8,09% respectivamente.

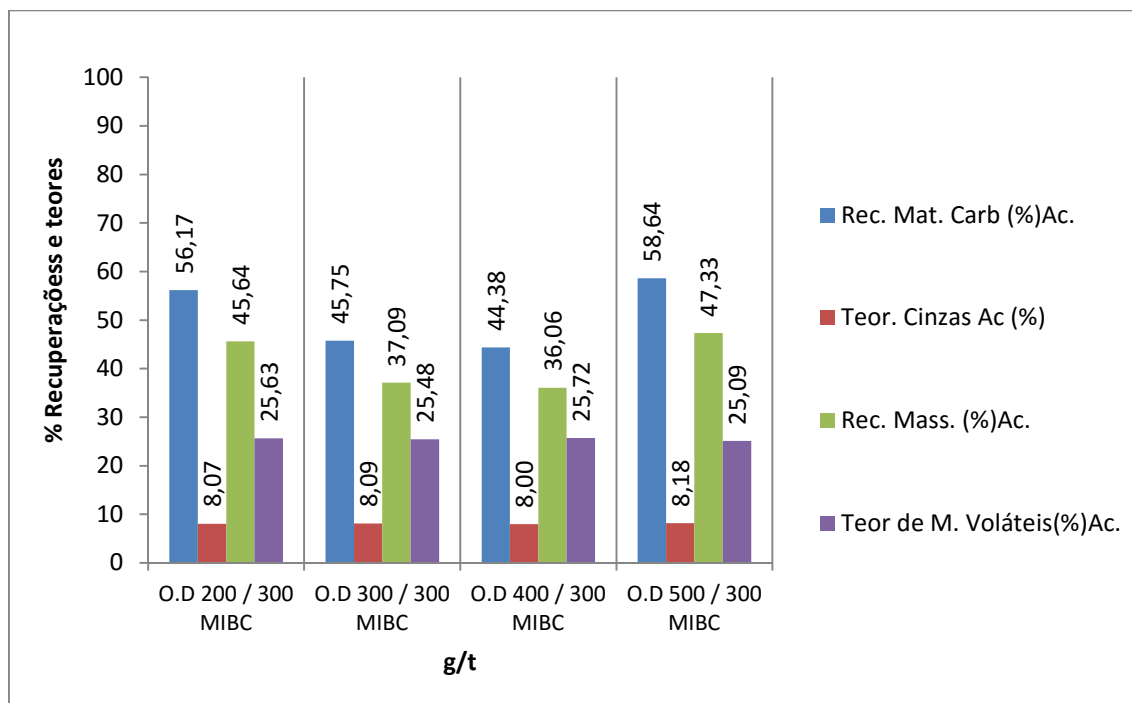
### **5.2.4 Ensaio J: 500 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)**

No gráfico da figura 46 do anexo II, nota-se que os valores dos teores de cinzas mantiveram-se constante na etapa *rougher*, com recuperações mássicas e matéria carbonosa em torno de 10,97% e 13,79% respectivamente, no *scavenger*, a recuperação mássica aumentou para 47,83% com 58,64% da matéria carbonosa com um teor de cinzas total de 8,18%.

Os gráficos de recuperação de H<sub>2</sub>O das figuras 47 e 48 do Anexo II, mostram que para recuperação de H<sub>2</sub>O igual a zero a flotação verdadeira da matéria carbonosa e de cinzas por contato bolha/partícula na etapa *rougher* também é igual a zero. No *scavenger* os valores percentuais da flotação verdadeira da matéria carbonosa por contato bolha/partícula ficaram em torno de 15,42% e contra os 3,77% de cinzas, o que demonstra ter havido nesse ensaio maior recuperação de partículas mistas. Assim sendo, o percentual de recuperação da flotação apenas por arraste hidrodinâmico ou mecânico no *scavenger* estiveram em torno de 29,43% a 9,92%.

**Tabela 11.** Ensaio de flotação: Recuperação mássica, recuperação carbonosa, teores de cinzas e material voláteis em função da variação dos reagentes para 5 minutos de flotação.

Reagentes (g/t)	Rec. Mat. Carb (%Ac.)	Teor. Cinzas(% Ac.)	Rec. Mass. (%Ac.)	Teor de M. Voláteis(%Ac.)
O.D 200 / 300 MIBC	56,17	8,07	45,64	25,63
O.D 300 / 300 MIBC	45,75	8,09	37,09	25,48
O.D 400 / 300 MIBC	44,38	8,00	36,06	25,72
O.D 500 / 300 MIBC	58,64	8,18	47,33	25,09



**Figura 30.** Ensaio específicos de flotação: Valores acumulados das recuperações mássicas, matéria carbonosa, teores de cinzas e matéria voláteis para 5 minutos de flotação, variando o reagente óleo diesel mais MIBC.

De acordo com o gráfico da figura 30, observa-se que os valores percentuais dos teores de cinzas e teores de materiais voláteis são praticamente constantes em todos ensaios, verificando-se que para os ensaios 200 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC) e 500 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC) os valores percentuais de recuperações mássicas e matéria carbonosa giram em torno de 40% e 50 % respectivamente.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo, utilizando o carvão da camada UCB da mina de Moatize permitiram avaliar o desempenho dos diferentes reagentes bem como das dosagens utilizadas no que diz respeito à recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas.

A partir dos ensaios de flotação, foram obtidos concentrados acumulados no quinto minuto, tempo esse que se finalizou para cada flotação em bancada e para cada combinação dos reagentes anteriormente citados neste trabalho. De acordo com o fluxograma do método de pesquisa deste trabalho foi escolhido o melhor resultado, com base nos parâmetros de recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas, atendendo e considerando que as dosagens de reagentes desempenharam um papel muito importante do ponto de vista econômico.

Demostrou-se neste estudo que a fração fina do carvão de Moatize é facilmente beneficiável por flotação devido a inúmeras vantagens que apresenta sendo uma delas, o seu *rank* betuminoso e a presença fundamental do grupo maceral vitrinita, garantindo assim o seu caráter hidrofóbico possibilitando a recuperação da matéria carbonosa.

Os resultados com betacol, mostraram que a partir de um fluxo de alimentação com elevado teor de cinzas cerca de 22,84%, é possível obter concentrados com teores de cinzas a baixo de 10% e recuperação mássicas em torno de 50%.

Com base nos resultados do trabalho, foi possível definir a melhor combinação de reagentes:

- Betacol: Concentração de 400 g/t – 200 g/t, com uma recuperação mássica de 49,76% e teor de cinzas de 9,98%.
- Óleo Diesel 200 g/t – 300 g/t MIBC, com uma recuperação mássica de 45,64% e teor de cinzas de 8,07%.
- De uma forma geral, o betacol apresentou melhores resultados porque as suas recuperações mássicas e matéria carbonosa foram mais altas quando comparados com óleo diesel mais MIBC.
- Já, o óleo diesel mais MIBC foram os reagentes que mostraram melhor seletividade no que concerne ao baixo teor de cinzas, mais que expressaram menor recuperação mássica em todo estudo.

- Nos gráficos de flotação verdadeira foi observada uma variação na recuperação total de H<sub>2</sub>O em torno de 6 a 9% para betacol e de 4 a 7% para o sistema óleo diesel /MIBC.
- Os resultados mostram que em sistemas com óleo diesel /MIBC há uma menor recuperação de H<sub>2</sub>O e uma maior seletividade. Sistemas com betacol apresentaram maior recuperação de H<sub>2</sub>O e menor seletividade.
- Os valores de flotação verdadeira das cinzas podem estar relacionados com a flotação de partículas mistas, nas etapas *rougher* e *scavenger*, por contato bolha-partícula.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - Carvão Mineral - Determinação do teor de cinza.** NBR 8289. Rio de Janeiro, 1983.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - Carvão Mineral - Determinação de umidade.** NBR 8293. Rio de Janeiro, 1983.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - Carvão Mineral - Determinação do teor de materiais voláteis.** NBR 8290. Rio de Janeiro, 1983.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - Carvão Mineral - Determinação do Carbono fixo.** NBR 8299. Rio de Janeiro, 1983.

BALTAR, C. A. M. **Flotação no Tratamento de Minérios.** Recife: Departamento de Engenharia de Minas/UFPE, 2008.

BERALDO, J. L. **Concentração por flotação,** Apostila, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1983.

BETACHEM - **Design development and production of mining chemicals and mineral processes. Ficha de informação de segurança de material,** África do Sul, Outubro de 2012, 1-9p.

BRUM, I. A. S. **Concentração de partículas minerais grossas de fluorita em coluna de flotação,** Porto Alegre, 2004, 103p. Tese de Doutorado em Engenharia- Escola de Engenharia, PPGEM/UFRGS.

BULATOVIC, S.M. **Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice –flotation of sulfide ores.** Elsevier, Amsterdam, first edition, 2007.

CELANESECORPORATION-**The Chemistry inside innovation- Methyl Isobutyl Carbinol. Disponível em: [www.celanese.com](http://www.celanese.com)**-Acessado em 26 de Junho de 2016.

CHAVES, A. P. (ORGANIZADOR) **Teoria Prática do Tratamento de Minérios V4,** A flotação no Brasil, 2ed. São Paulo, 2009: Signus, 410, 411, 414p.

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

Da LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA S. C. A. **Tratamento de minérios**: 5ª ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2010, 484p.

DAVILA, G. B. G. **Estudo de flotação convencional em bancada do lodo da carbonífera criciúma**, Porto Alegre, 2013, 17p. Dissertação de Mestrado em Engenharia- Escola de Engenharia, PPGEM/UFRGS.

**DESCOBERTOS NOVOS JAZIGOS DE CARVÃO EM MOÇAMBIQUE**: disponível no endereço eletrônico e acessado em 11/04/2016: <http://www.africatoday.co.ao/pt/empresas/4918>.

DISTRIBUIDORA PETROBRAS. **Óleo diesel**. Disponível em: [www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br) - Acessado em 13 de Maio de 2016.

FERREIRA J. A. F. **Classificação de carvões**. IN: SEMANA DE GEOLOGIA, 6, Rio de Janeiro, CPRM, 1980. 16 p. Il. [Inédito]

GOMES A. J. P. **Carvão do Brasil/turfa agrícola**. Porto Alegre, EST, 2002. 164p. Il.

JOSÉ, D. S., SAMPAIO, C, H. **Estado da Arte da Mineração em Moçambique**: caso carvão de Moatize, Tete. In: III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2011, Gramado. v. A9. P. 1-20.

MAE. **Perfil do Distrito de Moatize. Província de Tete. República de Moçambique, Ministério da Administração Estatal**. Série Perfis Distritais. Maputo, Moçambique, 2005, 79 pp.

MEDIAFAX. **Recursos minerais em Moçambique. “Temos ainda por explorar”**. Quinta feira, 22 de Julho de 2010, Maputo, Moçambique.

MONTE, M. B. M., PERES, A. E. C. **Química de superfície na flotação**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2004, 351, 352 e 353p.

NAGARAJ, D.R. **Reagent selection and optimization – the case for a holistic approach**. Minerals Engineering, 18, 151-158, Elsevier, 2005.

P. GEORGE, A. V. NGUYEN, G. J. JAMESON. **Assessment of true flotation and entrainment in the flotation of submicron particles by fine bubbles.** Special Research Centre for Multiphase Processes, University of Newcastle, University Drive. 2004.

REAL F. **Geologia da bacia do Zambeze - Junta de Investigação Ultramar**, 1966.

REAL S. A. **Geologia de Moçambique. Notícia Explicativa da Carta geológica de Moçambique.** Esc: 1:2000 000, 2ª. Edição, 1978.

RUIZ A. S. **Flotação do carvão contido no rejeito da barragem EL CANTOR**, São Paulo, 2009, 33, 34, 35 e 49p. Dissertação de Mestrado em Engenharia- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP.

SAMPAIO, C. H., TAVARES, M. L. M **Beneficiamento Gravimétrico: Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade.** 1ªed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005, 53p.

SANTOS & DUTRA. **Concentração de Partículas Mineraias Finas e Ultrafinas por Eletroflotação.** UFRJ, 2011, 21-22p, HOLOS, Ano 27, Vol5.

TESSARI R. I. **Origem e gênese dos carvões.** IN: SEMANA DE GEOLOGIA, 6, Rio de Janeiro, CPRM, 1980. 69p. Il. [Inédito] Coque. Acessado em 14.05.2016.

VALE-MOÇAMBIQUE - **Coal handling and preparation plant - Process management training presentation**, 2016.

VASCONCELOS L. **Geologia do Carvão de Moatize**, 2005

VASCONCELOS L. 1995. **Contribuição para o conhecimento dos carvões na Bacia Carbonífera de Moatize, Província de Tete**, República de Moçambique. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal, 2 volumes.

VASCONCELOS L. & PEDRO A.J., 2004. **Variation of mineral phases of Mozambican coals with different heating temperatures. Poster presented on Workshop on Environmental management implications of organic facies studies** (Budapest, Hungria, 15.09.04). Resumo alargado no Abstract Book do Workshop, P64-66.

VASCONCELOSL. A. MUCHANGOS & E. SIQUELA. **Elementos-traço em cinzas de carvões aflorantes Moçambique**, Junho/2009.

WARREN, L. J. **Determination of the contributions of true flotation and entrainment in batch flotation tests.** International Journal of Mineral Processing, v.14, n.1, p.33-44, 1985.

**ANEXO I: ENSAIOS ESPECÍFICOS DE FLOTAÇÃO COM BETACOL**

Tabela 12. Resultado do ensaio com Betacol 400 g/t – 300 g/t

Ensaio com betacol (g/t)	flotado	massa (g)	massa (%)		teor de cinzas (%)		teor de voláteis (%)		Matéria Carbonosa (%)		
			%	acum	%	acum	%	acum	"teor"	recup.	acum
400 - 300	1	19,4	11,76	11,76	7,91	7,91	25,34	25,34	66,75	14,57	14,57
	2	5,1	3,09	14,85	7,86	7,90	26,27	25,53	65,87	3,78	18,35
	3	54,2	32,85	47,70	11,35	10,28	24,25	24,65	64,40	39,28	57,63
	4	13,6	8,24	55,94	11,19	10,41	24,23	24,59	64,58	9,88	67,51
	5	6,8	4,12	<b>60,06</b>	16,29	10,81	23,87	24,54	59,84	4,58	<b>72,09</b>
	Rej.	58,8	35,64	95,70	40,88		18,99	22,47	40,13	26,55	
	A	<b>165</b>	<b>100,00</b>		<b>22,84</b>		<b>23,3</b>		<b>53,86</b>		

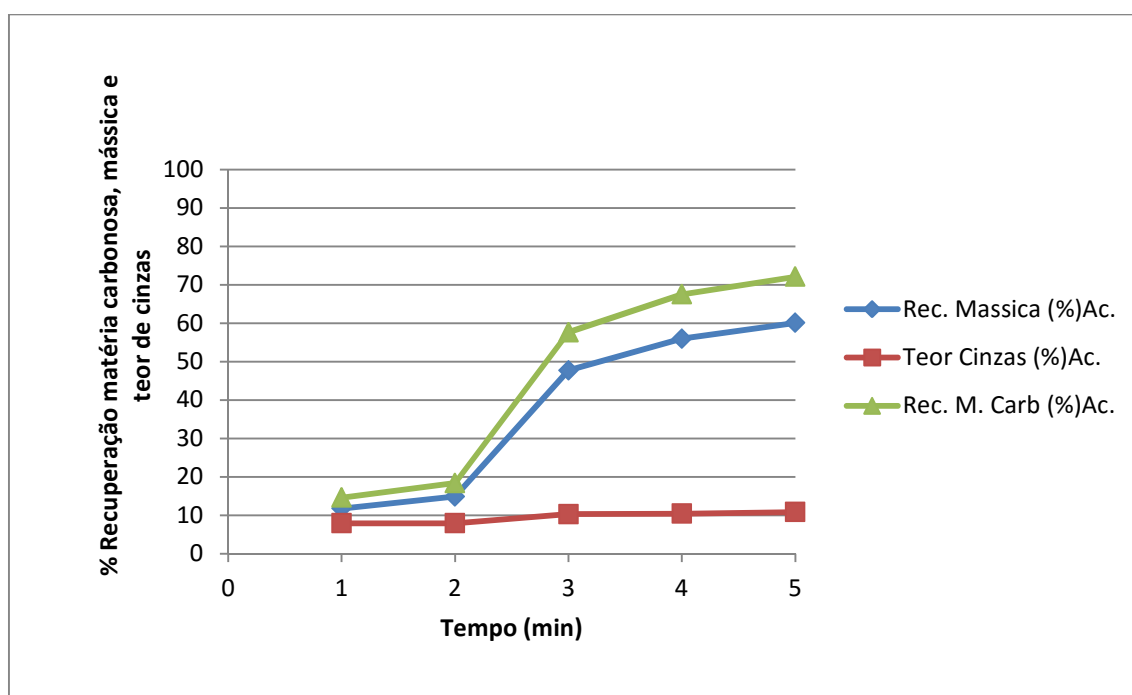
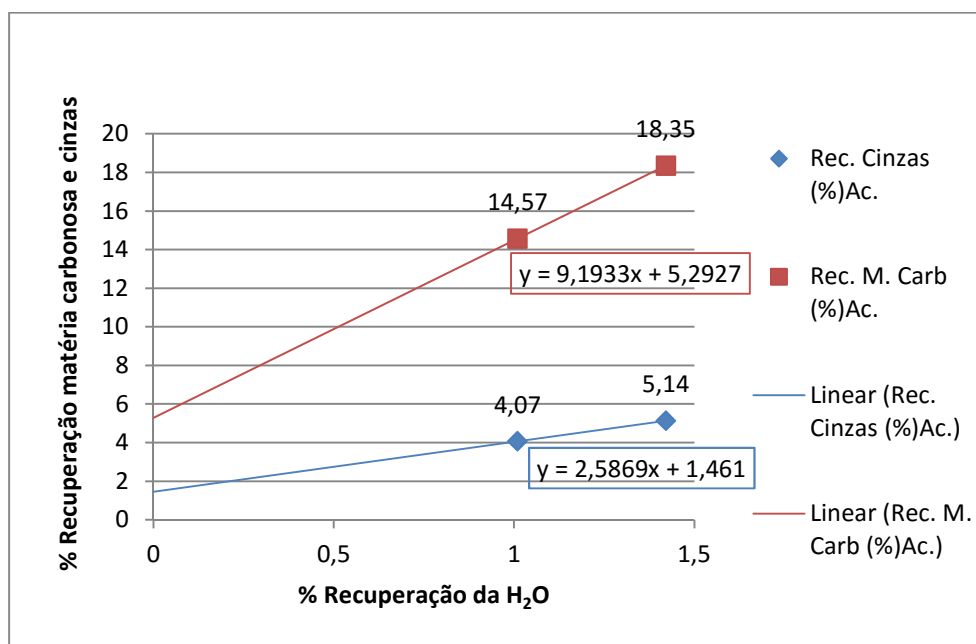


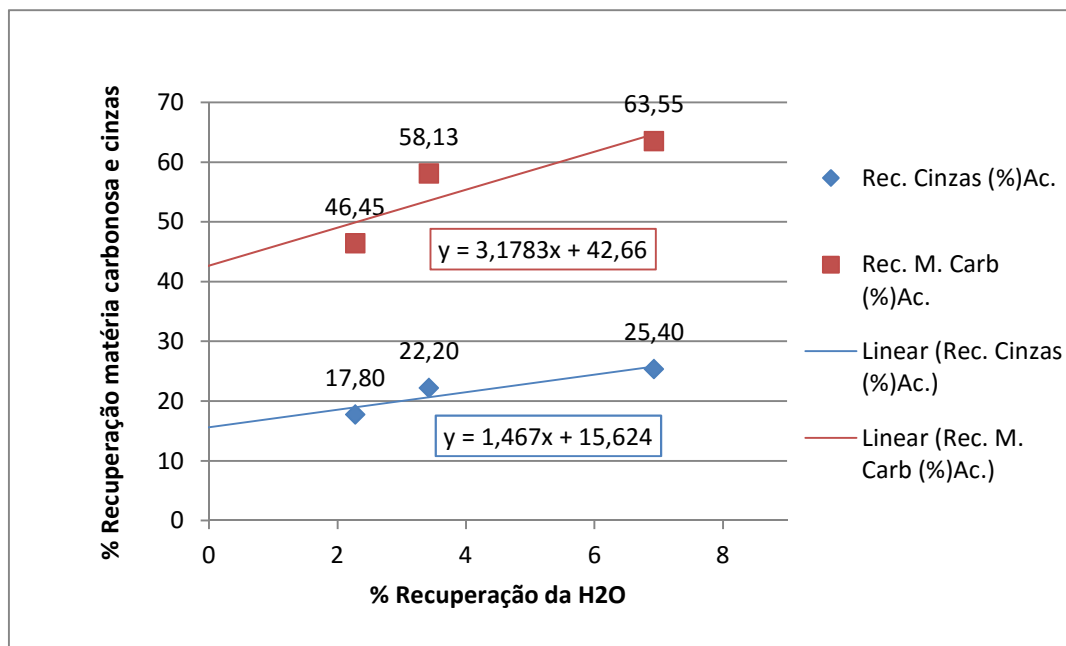
Figura 31. Ensaio específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com betacol 400 g/t – 300 g/t.

**Tabela 13.** Resultado do ensaio com Betacol 400 g/t - 300 g/t : Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H<sub>2</sub>O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.

Ensaio	PH	Reagente betacol (g/t)	Tempo (min)	Rec. Massica (%Ac.)	Rec. H <sub>2</sub> O (%Ac.)	Teor Cinzas (%Ac.)	Rec. Cinzas (%Ac.)	Teor M. carb (%) Ac.	Rec. M. Carb (%Ac.)
E	6,7	400 - 300	1	11,76	1,01	7,91	4,07	66,75	14,57
			2	14,85	1,42	7,90	5,14	66,57	18,35
			3	47,70	3,70	10,28	17,80	65,07	46,45
			4	55,94	4,85	10,41	22,20	65,00	58,13
			5	60,06	8,35	10,81	25,40	64,65	63,55
			Rej.	95,70		22,01	94,95	55,52	94,95



**Figura 32.** Ensaio específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 300 g/t.



**Figura 33.** . Ensaio específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 300 g/t.



Tabela 14. Resultado do ensaio com Betacol 400g/t – 400g/t

Ensaio com betacol (g/t)	flotado	massa (g)	massa (%)		teor de cinzas (%)		teor de voláteis (%)		Matéria Carbonosa (%)		
			%	acum	%	acum	%	acum	"teor" recup.	recup.	acum
400 - 400	1	16,9	10,24	10,24	7,03	7,03	25,54	25,54	67,43	12,82	12,82
	2	4,1	2,48	12,73	7,19	7,06	25,77	25,58	67,04	3,09	15,92
	3	61,6	37,33	50,06	11,41	10,30	24,42	24,72	64,17	44,48	60,40
	4	13,4	8,12	58,18	9,79	10,23	24,66	24,71	65,55	9,88	70,28
	5	6	3,64	<b>61,82</b>	14,25	10,47	23,97	24,66	61,78	4,17	<b>74,45</b>
	Rej.	56	33,94	95,76	42,13		18,76	22,57	39,11	24,64	
A		<b>165</b>	<b>100,00</b>		<b>22,84</b>		<b>23,3</b>		<b>53,86</b>		

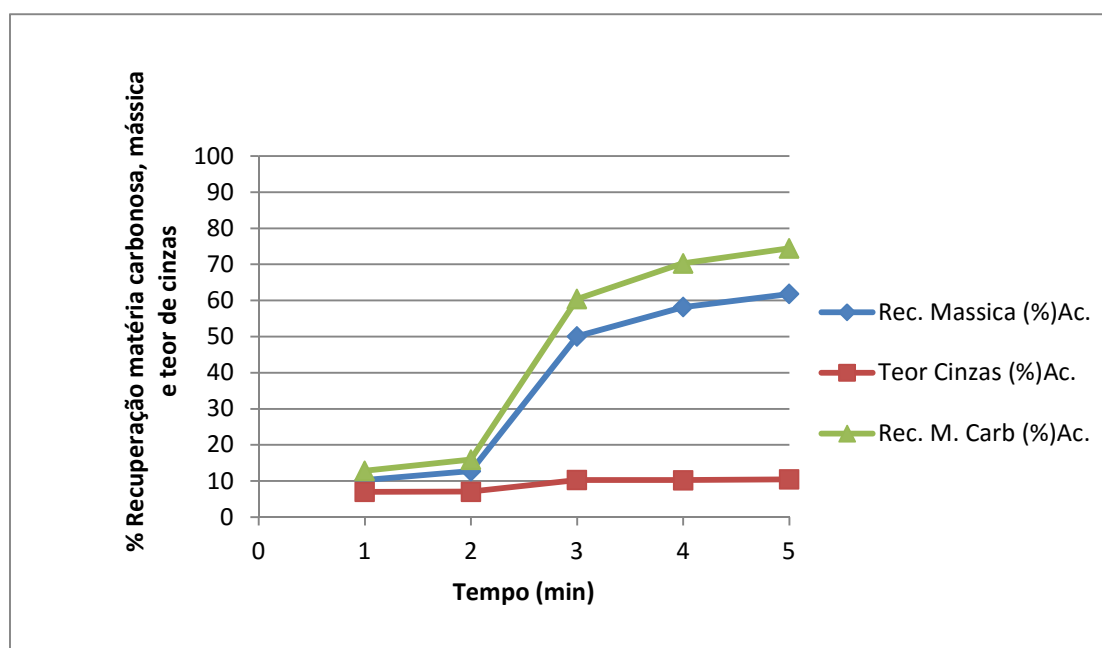
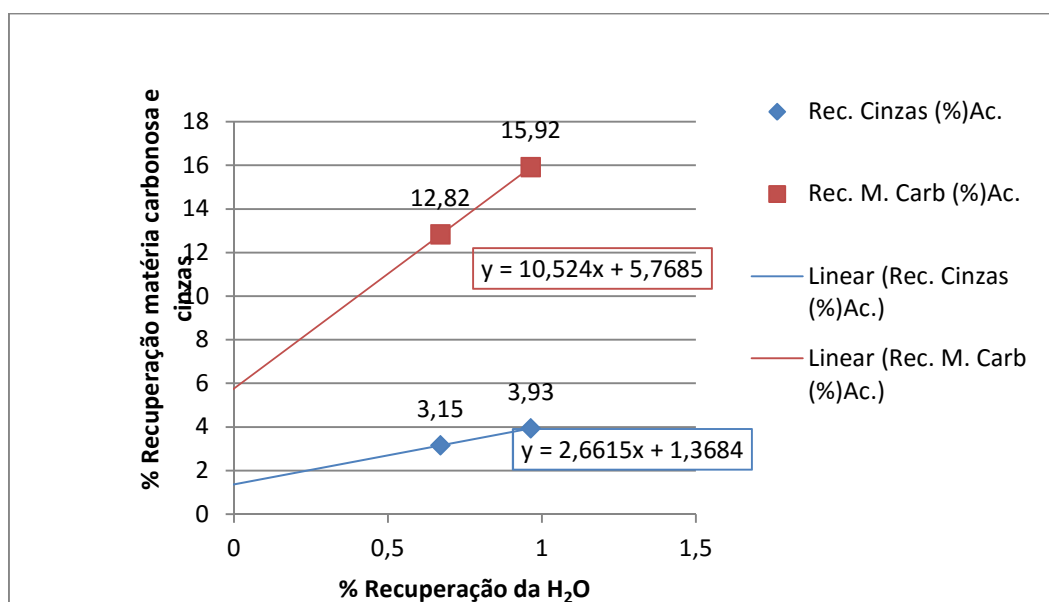


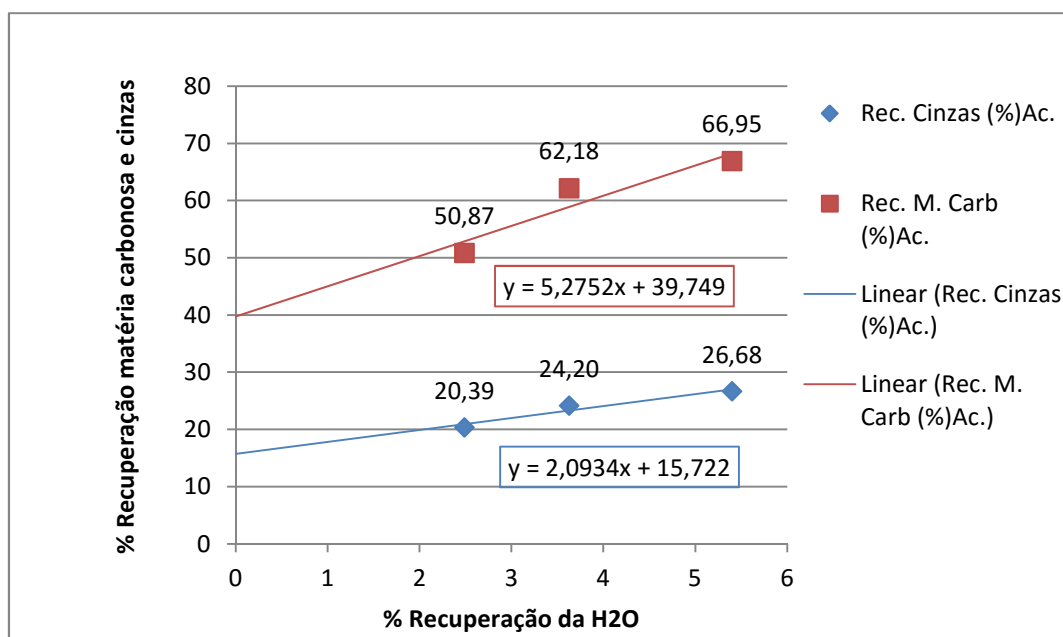
Figura 34. Ensaio específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com betacol 400 g/t – 400 g/t.

**Tabela 15.** Resultado do ensaio com Betacol 400 g/t – 400 g/t: Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H<sub>2</sub>O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.

Ensaio	PH	Reagente betacol (g/t)	Tempo (min)	Rec. Massica (%Ac.)	Rec. H <sub>2</sub> O (%Ac.)	Teor Cinzas (%Ac.)	Rec. Cinzas (%Ac.)	Teor M. carb (%Ac.)	Rec. M. Carb (%Ac.)
D	6,8	400 - 400	1	10,24	0,67	7,03	3,15	67,43	12,82
			2	12,73	0,96	7,06	3,93	67,35	15,92
			3	50,06	3,45	10,30	20,39	64,98	50,87
			4	58,18	4,59	10,23	24,20	65,06	62,18
			5	61,82	6,36	10,47	26,68	64,87	66,95
			Rej.	95,76		21,69	95,14	55,74	95,14



**Figura 35.** Ensaios específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 400 g/t.



**Figura 36.** Ensaios específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 400 g/t.

Tabela 16. Resultado do ensaio com Betacol 400g/t – 500 g/t

Ensaio com betacol (g/t)	flotado	massa (g)	massa (%)		teor de cinzas (%)		teor de voláteis (%)		Matéria Carbonosa (%)		
			%	acum	%	acum	%	acum	"teor"	recup.	recup. acum
400 - 500	1	18,1	10,97	10,97	7,4	7,40	25,38	25,38	67,22	13,69	13,69
	2	4,7	2,85	13,82	7,77	7,48	25,63	25,43	66,60	3,52	17,21
	3	59,6	36,12	49,94	12,41	11,04	24,48	24,74	63,11	42,32	59,53
	4	18,4	11,15	61,09	11,84	11,19	24,59	24,72	63,57	13,16	72,69
	5	7,3	4,42	<b>65,52</b>	15,52	11,48	23,50	24,63	60,98	5,01	<b>77,7</b>
	Rej.	49,9	30,24	95,76	43,94		18,62	22,73	37,44	21,02	
	A		<b>165</b>	<b>100,00</b>		<b>22,84</b>		<b>23,3</b>	<b>53,86</b>		

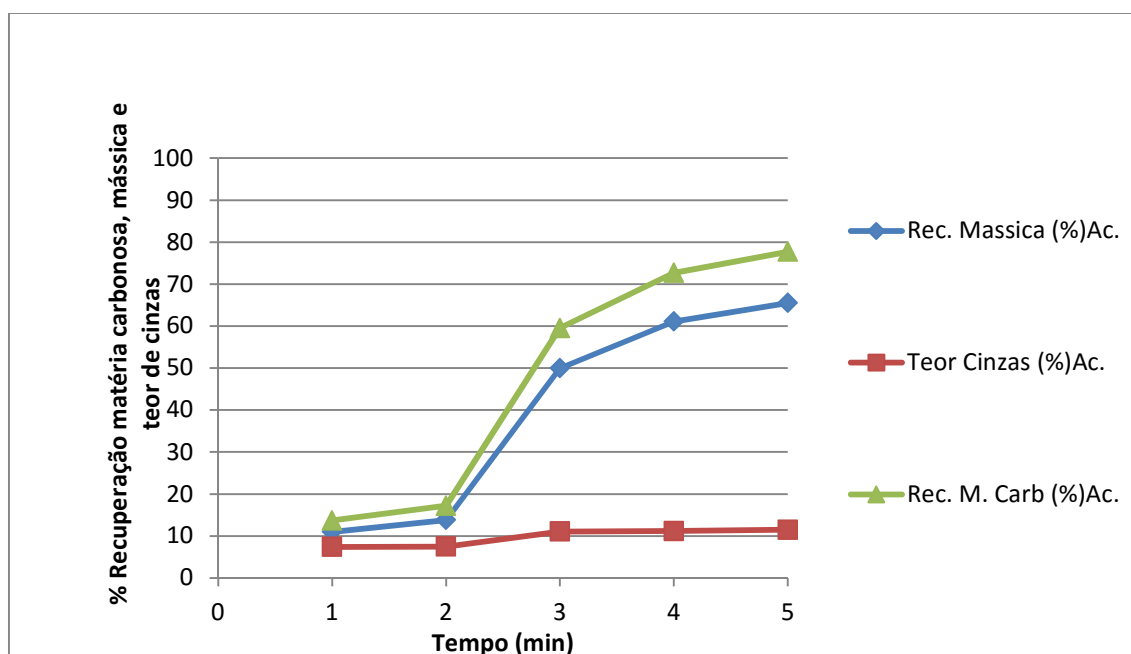
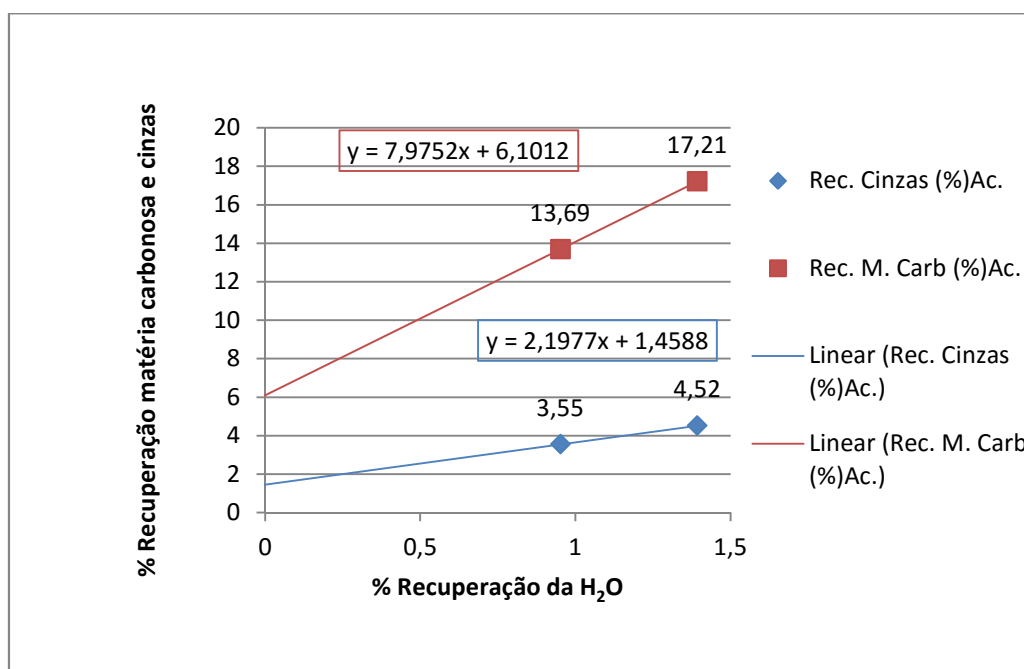


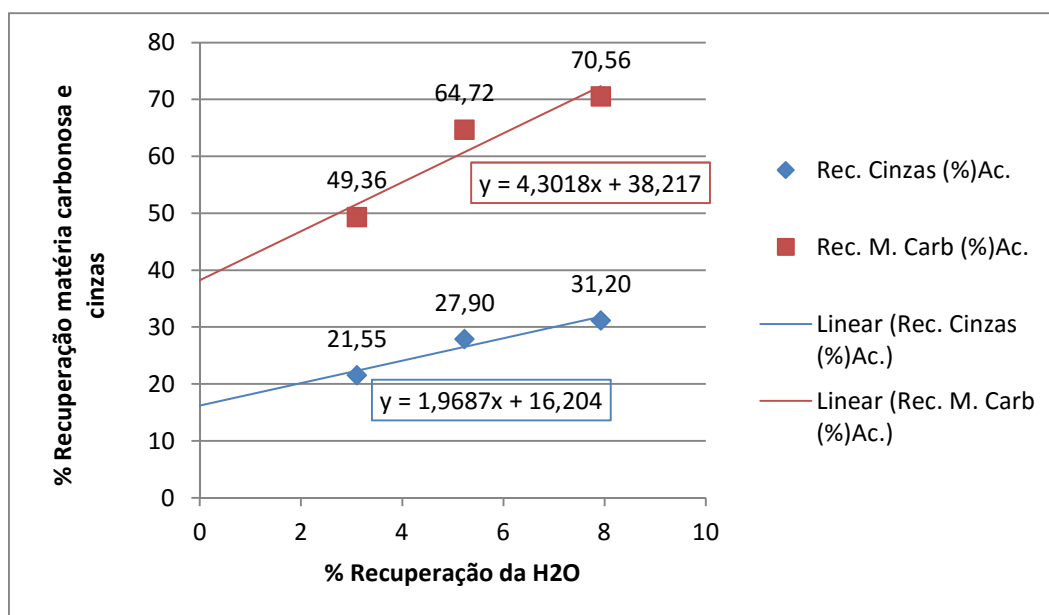
Figura 37. Ensaio específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com betacol 400 g/t – 500 g/t.

**Tabela 17.** Resultado do ensaio com Betacol 400 g/t – 500 g/t : Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H<sub>2</sub>O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.

Ensaio	PH	Reagente betacol (g/t)	Tempo (min)	Rec. Massica (%Ac.)	Rec. H <sub>2</sub> O (%Ac.)	Teor Cinzas (%Ac.)	Rec. Cinzas (%Ac.)	Teor M. carb (% Ac.)	Rec. M. Carb (%Ac.)
C	6,56	400 - 500	1	10,97	0,95	7,40	3,55	67,22	13,69
			2	13,82	1,39	7,48	4,52	67,09	17,21
			3	49,94	4,50	11,04	21,55	64,21	49,36
			4	61,09	6,63	11,19	27,90	64,09	64,72
			5	65,52	9,32	11,48	31,20	63,88	70,56
			Rej.	95,76		21,73	95,08	55,53	95,08



**Figura 38.** Ensaios específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 500 g/t



**Figura 39.** Ensaios específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com betacol 400 g/t – 500 g/t.

**ANEXO II: ENSAIOS ESPECÍFICOS DE FLOTAÇÃO COM ÓLEO DIESEL  
MAIS MIBC**

Tabela 18. Resultado do ensaio com 300 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)

Ensaio (g/t)	flotado	massa (g)	massa (%)		teor de cinzas (%)		teor de voláteis (%)		Matéria Carbonosa (%)		
			%	acum	%	acum	%	acum	"teor"	recup.	Acum
300 (O.D) - 300 (MIBC)	1	4,3	2,61	2,61	8,90	8,90	25,19	25,19	65,91	3,19	3,19
	2	2,9	1,76	4,36	9,64	9,20	24,72	25,00	65,64	2,14	5,33
	3	34,0	20,61	24,97	7,14	7,50	25,88	25,73	66,98	25,63	30,96
	4	12,9	7,82	32,79	8,60	7,76	25,17	25,59	66,23	9,61	40,57
	5	7,1	4,30	<b>37,09</b>	10,56	8,09	24,60	25,48	64,84	5,18	<b>45,75</b>
	Rej.	95,9	58,12	95,21	28,97		20,84	22,65	50,19	54,16	
	A		<b>165</b>	<b>100,00</b>		<b>22,84</b>		<b>23,3</b>		<b>53,86</b>	

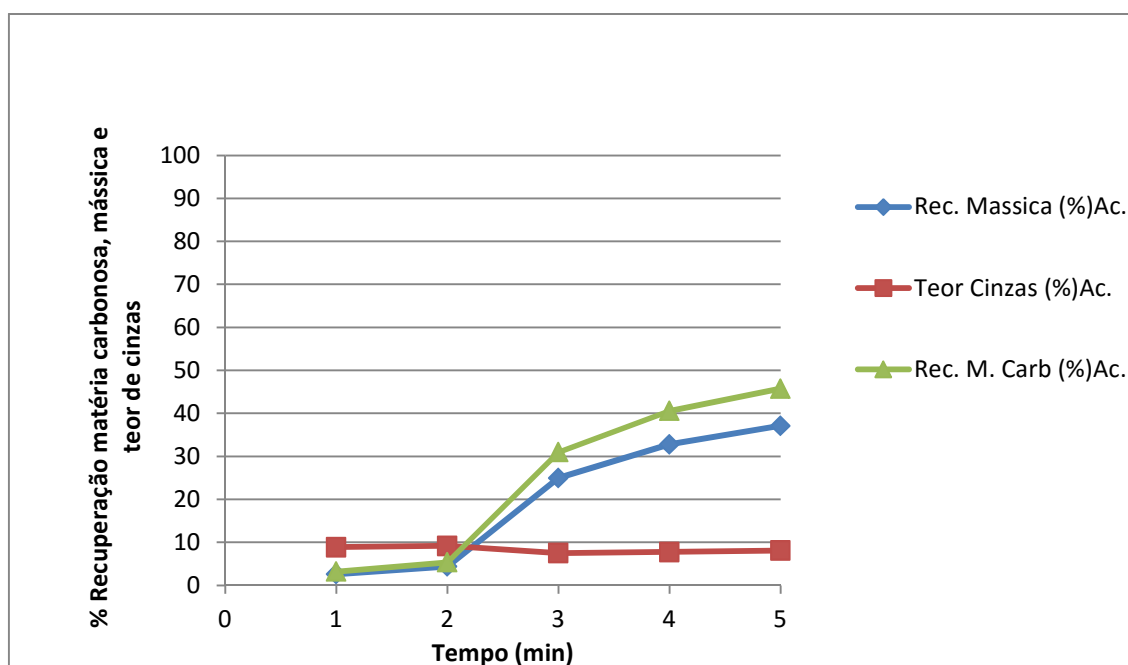
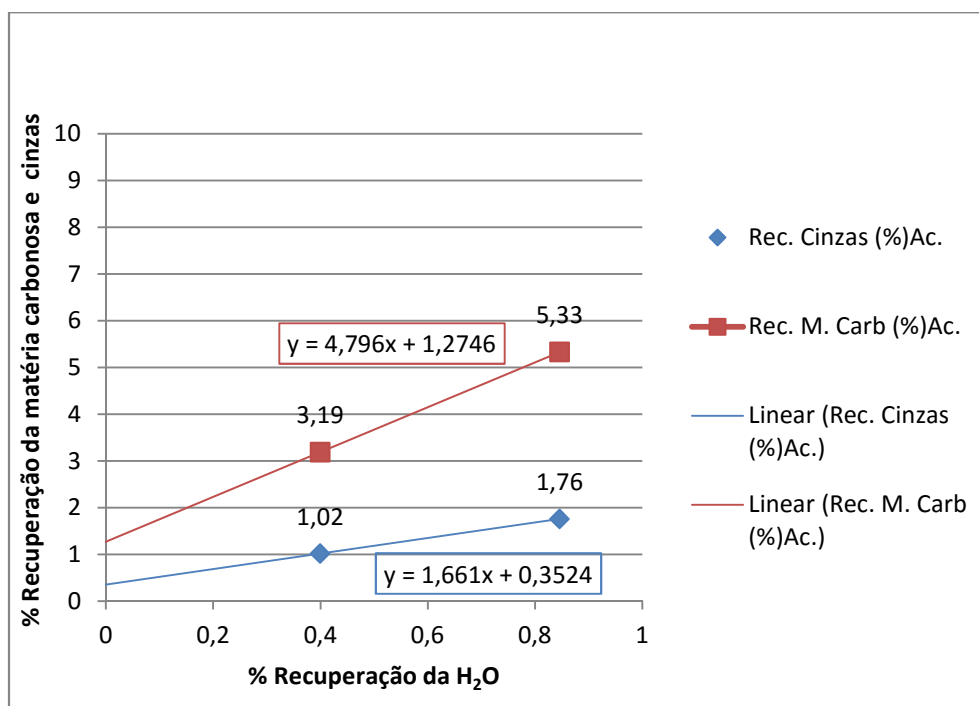


Figura 40. Ensaio específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com 300 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)

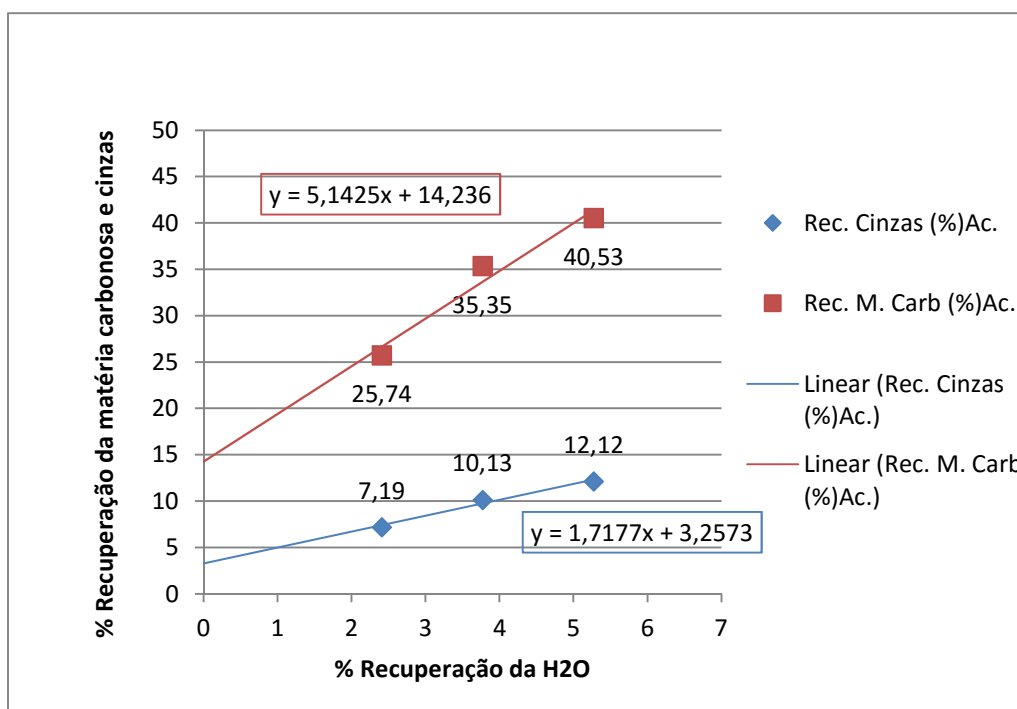


**Tabela 19.** Resultado do ensaio com 300 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC): Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H<sub>2</sub>O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.

Ensaio	PH	Reagente OD e MIBC (g/t)	Tempo (min)	Rec. Massica (%Ac.)	Rec. H2O (%Ac.)	Teor Cinzas (%Ac.)	Rec. Cinzas (%Ac.)	Teor M. carb (% Ac.)	Rec. M. Carb (%Ac.)
H	6,6	300 - 300	1	2,61	0,40	8,90	1,02	65,91	3,19
			2	4,36	0,85	9,20	1,76	65,80	5,33
			3	24,97	3,26	7,50	7,19	66,77	25,74
			4	32,79	4,62	7,76	10,13	66,64	35,35
			5	37,09	6,12	8,09	12,12	66,43	40,53
			Rej.	95,21		20,83	85,84	56,52	94,69



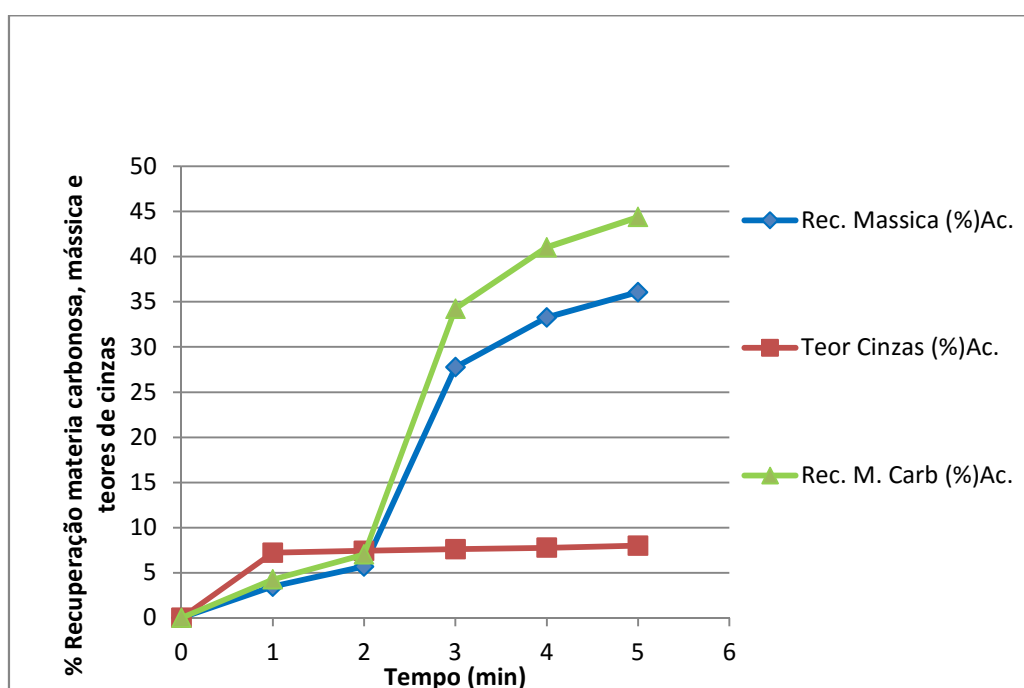
**Figura 41.** Ensaio específico de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 300 g/t (O.D) -300 g/t (MIBC)



**Figura 42.** Ensaios específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 300 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)

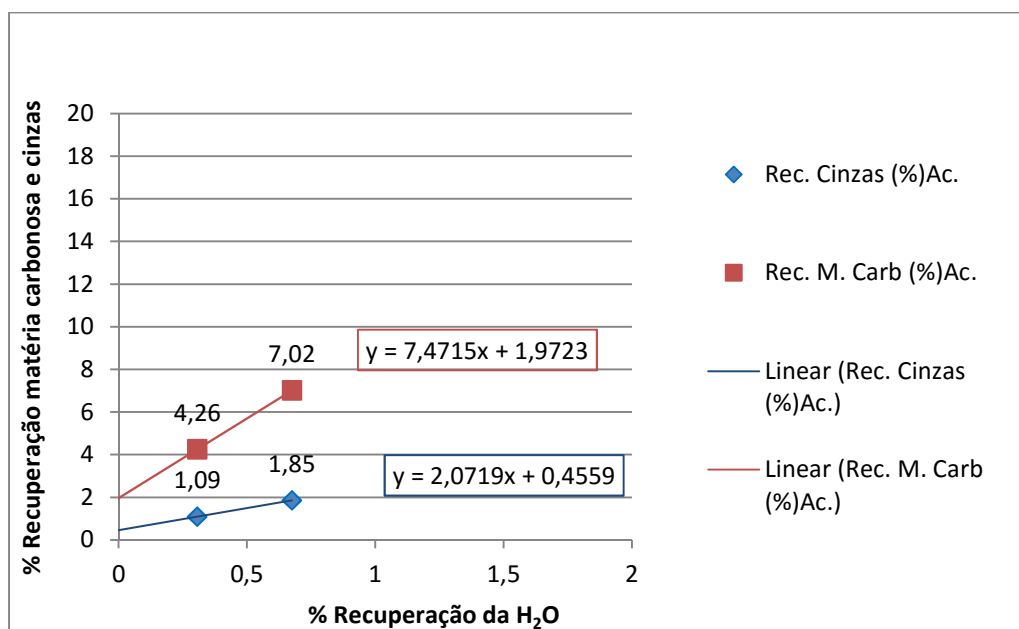
**Tabela 20.** Resultado do ensaio com 400 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)

Ensaio (g/t)	flotado	massa (g)	massa (%)		teor de cinzas (%)		teor de voláteis (%)		Matéria Carbonosa (%)		
			%	acum	%	acum	%	acum	"teor"	recup.	recup. Acum
400 (O.D) - 300 (MIBC)	1	5,7	3,45	3,45	7,21	7,21	26,36	26,36	66,43	4,26	4,26
	2	3,7	2,24	5,70	7,78	7,43	26,06	26,24	66,16	2,75	7,02
	3	36,4	22,06	27,76	7,66	7,61	25,92	25,99	66,42	27,21	34,22
	4	9,1	5,52	33,27	8,58	7,77	24,94	25,81	66,48	6,81	41,03
	5	4,6	2,79	<b>36,06</b>	10,68	8,00	24,58	25,72	64,74	3,35	<b>44,38</b>
	Rej.	97,9	59,33	95,39	29,57		20,59	22,53	49,84	75,61	
	A		<b>165</b>	<b>100,00</b>		<b>22,84</b>		<b>23,3</b>		<b>53,86</b>	

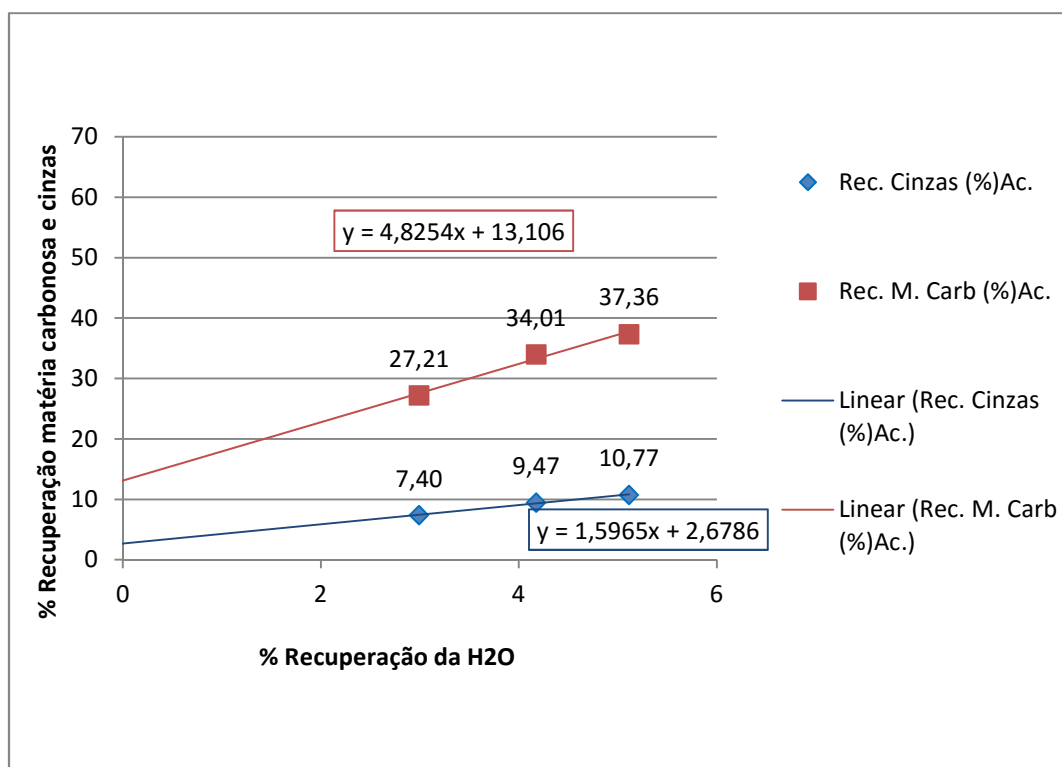
**Figura 43.** Ensaio específico de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo com 400 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)

**Tabela 21.** Resultado do ensaio com 400 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC): Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H<sub>2</sub>O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.

Ensaio	PH	Reagente OD e MIBC (g/t)	Tempo (min)	Rec. Massica (%Ac.)	Rec. H <sub>2</sub> O (%Ac.)	Teor Cinzas (%Ac.)	Rec. Cinzas (%Ac.)	Teor M. carb (%Ac.)	Rec. M. Carb (%Ac.)
I	5,8	400 - 300	1	3,45	0,31	7,21	1,09	66,43	4,26
			2	5,70	0,67	7,43	1,85	66,32	7,02
			3	27,76	3,67	7,61	7,40	66,40	27,21
			4	33,27	4,85	7,77	9,47	66,41	34,01
			5	36,06	5,79	8,00	10,77	66,28	37,36
			Rej.	95,39		21,42	87,59	56,06	92,27



**Figura 44.** Ensaio específicos de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 400 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)



**Figura 45.** Ensaios específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 400 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC)

Tabela 22. Resultado do ensaio com 500 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC)

Ensaio (g/t)	flotado	massa (g)	massa (%)		teor de cinzas (%)		teor de voláteis (%)		Matéria Carbonosa (%)		
			%	acum	%	acum	%	acum	"teor"	recup.	recup. Acum
500 (O.D) - 300 (MIBC)	1	11,3	6,85	6,85	6,67	6,67	25,65	25,65	67,68	8,61	8,61
	2	6,8	4,12	10,97	7,02	6,80	25,20	25,48	67,78	5,19	13,79
	3	42,3	25,64	36,61	8,27	7,83	25,02	25,16	66,71	31,75	45,54
	4	14,1	8,55	45,15	8,90	8,03	24,94	25,12	66,16	10,50	56,04
	5	3,6	2,18	<b>47,33</b>	11,28	8,18	24,60	25,09	64,12	2,60	<b>58,64</b>
	Rej.	80,2	48,61	95,94	34,59		20,17	22,60	45,24	40,83	
	A		<b>165</b>	<b>100,00</b>		<b>22,84</b>		<b>23,3</b>		<b>53,86</b>	

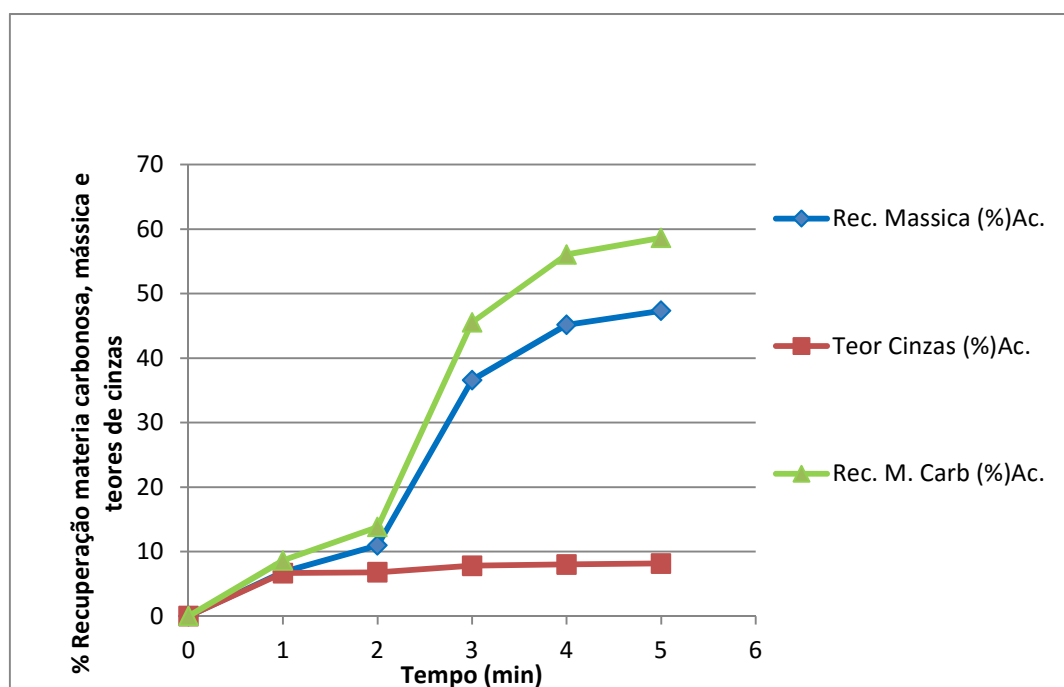
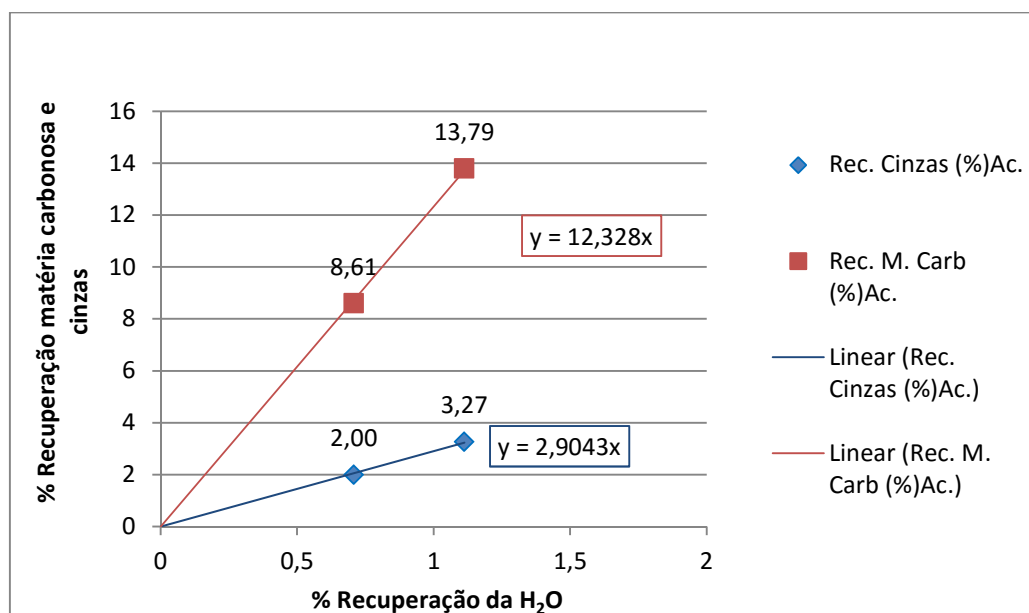


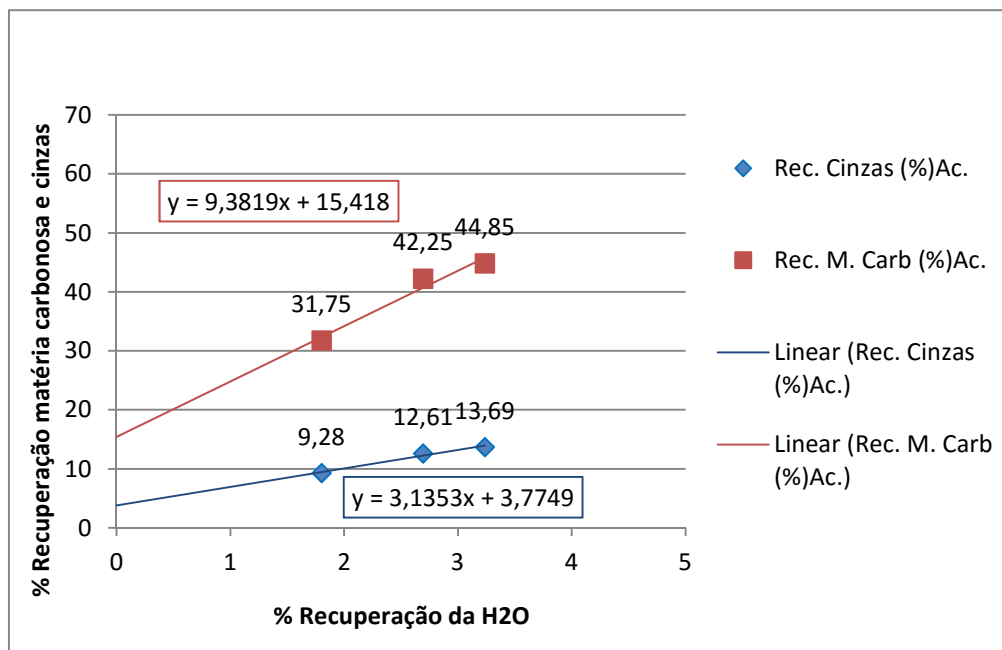
Figura 46. Ensaio específicos de flotação: Recuperação mássica, recuperação da matéria carbonosa e teor de cinzas em função do tempo, com 500 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC).

**Tabela 23.** Resultado do ensaio com 500 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC) : Valores acumulados de recuperação mássica, matéria carbonosa, H<sub>2</sub>O, cinzas, teores de matéria carbonosa, matéria volátil e cinzas em função de tempo.

Ensaio	PH	Reagente OD e MIBC (g/t)	Tempo (min)	Rec. Massica (%Ac.)	Rec. H <sub>2</sub> O (%Ac.)	Teor Cinzas (%Ac.)	Rec. Cinzas (%Ac.)	Teor M. carb (%Ac.)	Rec. M. Carb (%Ac.)
J	6,3	500 - 300	1	6,85	0,71	6,67	2,00	67,68	8,61
			2	10,97	1,11	6,80	3,27	67,72	13,79
			3	36,61	2,92	7,83	9,28	67,01	31,75
			4	45,15	3,81	8,03	12,61	66,85	42,25
			5	47,33	4,35	8,18	13,69	66,72	44,85
			Rej.	95,94		21,56	87,30	55,84	85,67



**Figura 47.** Ensaio específico de flotação – etapa *rougher*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 500 g/t (OD0 – 300 g/t (MIBC))



**Figura 48.** Ensaio específicos de flotação – etapa *scavenger*: Recuperação de cinzas, recuperação da matéria carbonosa e recuperação de H<sub>2</sub>O em função do tempo, com 500 g/t (OD) – 300 g/t (MIBC).