

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)**

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE CARVÃO ROM DA MINA DE
MOATIZE-MOÇAMBIQUE PARA O *DESTONING*, VISANDO SEU
BENEFICIAMENTO**

DAVID SELEMANE JOSÉ

PORTO ALEGRE

2019

DAVID SELEMANE JOSÉ

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE CARVÃO ROM DA MINA DE
MOATIZE-MOÇAMBIQUE PARA O *DESTONING*, VISANDO SEU
BENEFICIAMENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos H. Sampaio

PORTO ALEGRE

2019

CIP - Catalogação na Publicação

JOSÉ, DAVID SELEMANE

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE CARVÃO ROM DA MINA DE MOATIZE-MOÇAMBIQUE PARA O DESTONING, VISANDO SEU BENEFICIAMENTO / DAVID SELEMANE JOSE. -- 2019.

174 f.

Orientador: CARLOS HOFFMANN SAMPAIO.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Jigue a ar. 2. pré-lavagem. 3. Caracterização tecnológica. 4. carvão mineral. I. SAMPAIO, CARLOS HOFFMANN, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DAVID SELEMANE JOSÉ

Esta Tese foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. **Carlos Hoffmann Sampaio**: (Orientador)

Prof. Dr. **Carlos Pérez Bergmann**: Coordenador do Programa (**PPGE3M**)

Aprovada em 19 de Fevereiro de 2019

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves (**UNIPAMPA**)

Prof.^a Dra. Gelsa Edith Navarro Hidalgo (**UFRGS**)

Prof. Dr. Weslei Ambrós Monteiro (**UFRGS**)

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter (**UFRGS**)

Dedicatória

Este trabalho dedico aos meus pais:

Rosa Abede Amade & Sulemane José

(in memoriam)

AGRADECIMENTOS

O Autor agradece em primeiro lugar ao seu orientador Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio, pela orientação e diretrizes bem desenhadas para a concretização dos objetivos definidos para o êxito deste trabalho de Tese.

Em segundo lugar agradece a toda a sua família por apoio moral, espiritual recebido durante todo este período da realização do doutorado.

A todos os membros e colegas do LAPROM em particular ao Dr. Gerson Miltzarek pela paciência, e prontidão no fornecimento dos materiais que fossem necessários para a realização de testes e ensaios, sem ele seria quase impossível à efetivação do objetivo traçado. Ao Prof. Dr. Weslei Ambrós pela orientação e apoio incondicional prestado sempre que fosse necessário.

A todos os professores do Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pelo apoio, convívio dentro e fora de salas de aulas.

À empresa VALE (empresa brasileira de mineração) pelo fornecimento das amostras de carvão mineral que serviram como objeto de estudo para este trabalho de Tese.

A CNPq (Brasil) junto ao Ministério de Ciência e tecnologia da de Moçambique (MCT), pela oportunidade.

Ao Instituto Superior Politécnico de Tete (ISPT), pelo apoio prestado durante os quatro anos de formação.

A todas aquelas pessoas e identidades que não foram acima citadas, mas que contribuíram de uma ou de outra forma para a concretização dessa importante etapa da vida acadêmica do autor, a todos;

MUITO OBRIGADO!

“Hasta la Victoria Siempre!”

Ernesto Che Guevara

RESUMO

Este estudo investigou o uso do jig pneumático a ar a escala piloto para a caracterização tecnológica da camada de carvão mineral (Chipanga) de Moatize, Tete, em Moçambique. O foco foi na remoção da fração indesejada de alta densidade (material acima de $2,2 \text{ g/cm}^3$) apresentada no carvão bruto (ROM). Para este fim, foram caracterizadas as quatro subcamadas que compõem a camada Chipanga nomeadamente (UCT, UCB, MLCU e LC 45/6), que actualmente são exploradas na Mina de Moatize, estas tendo sido caracterizadas e analisadas separadamente. Os resultados de afunda-flutua mostraram uma diferença acentuada de liberação entre as subcamadas de carvão. Todas as subcamadas de carvão apresentaram baixo teor de enxofre total, com teores inferiores a 1% em quase todas as fracções de densidade. Com base nas curvas de Near-Gravity Material (NGM), a subcamada inferior LC 45/6 foi considerada a camada de carvão mais fácil de separar os resíduos, e os resultados obtidos indicaram que a remoção significativa de resíduos poderia ser conseguida utilizando jigs de ar com eficiências razoáveis e recuperações em massa para todas as subcamadas de carvão. Na escala de uma planta de beneficiamento industrial, os resultados apontam para a possibilidade de remoção de cerca de 18% dos resíduos de alta densidade apresentados na faixa de tamanho de 50x1 mm. Nesta base, a caracterização tecnológica de carvão bruto da camada Chipanga de Moatize mostrou-se viável e poderia ser vantajosa para o circuito dos grossos.

Palavras-Chave: **Jigue a ar, pré-lavagem, Caracterização tecnológica, carvão mineral.**

ABSTRACT

This study investigated the use of air jigs for destoning Chipanga coal seam, of Moatize, Tete, in Mozambique. The focus was the removal of the unwanted high-density fraction (material over 2.2 g/cm^3) presented in the raw coal. For this purpose, the four coal layers (UCT, UCB, MLCU and LC 456), which are nowadays exploited in the mine were separately examined. Sink-float results showed a marked difference of liberation among the coal layers. All coal layers presented low total sulfur content, with contents lower than 1% in almost all density fractions. Based on the Near-Gravity Material (NGM) curves, the LC 45/6 coal layer was found to be the easiest coal layer for waste separation. The obtained results indicated that significant waste removal could be achieved by using air jigs with reasonable efficiencies and mass recoveries for all coal layers. At the scale of an industrial destoning plant, the results points to the possibility to remove about 18% of the high-density waste presented in the size range 50 to 1 mm. On this basis, destoning of raw coals from the Moatize coal seam showed to be feasible and could be advantageous to the coarse coal preparation plant.

Key words: Air Jig, Destoning, Waste Separation, Moatize coal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estágios de carbonificação de carvão mineral	21
Figura 2: Principais componentes do jigge pneumático a escala piloto	36
Figura 3: Processo de estratificação do leito.....	37
Figura 4: Mapa de localização do Distrito de Moatize (esq.); Figura 5: Mapa de Divisão Administrativa de Moatize (dir.).....	42
Figura 6: Mapa geológico regional simplificado da bacia de Moatize	43
Figura 7: Série produtiva da bacia de Moatize.	44
Figura 8: Antigas e novas nomenclaturas da camada Chipanga	44
Figura 9: Bacias e sub-bacias de Moatize.....	46
Figura 10: Fluxograma geral de circuito de beneficiamento dos grossos (Moatize-I) .	49
Figura 11: Fluxograma simplificado do circuito de beneficiamento dos grossos (Moatize-I)	50
Figura 12: Homogeneização das amostras (Esq.) Quarteamento das amostras (Dir)	53
Figura 13: Exemplo prático de separação em meio denso de forma crescente.....	55
Figura 14: Fluxograma de caracterização do processo de afunda-flutua	56
Figura 15: Jigge pneumático modelo AllAir® S-500. (a) Esquema geral (b) detalhe do compartimento de separação do jigge, dotado de gavetas sobrepostas de Plexiglass.	62
Figura 16: Equipamento usado no processo da jigagem (jigge pneumático).....	65
Figura 17: Composição dos produtos após a jigagem.....	65
Figura 18: Fluxograma descritivo do processo de análise das amostras após a jigagem.....	66
Figura 19: Fluxograma de descritivo de fases da análise petrográfica	70
Figura 20: Tipo de britador e peneiras usados para a britagem e peneiramento das amostras.....	72
Figura 21: Gráfico de distribuição granulométrica das subcamadas	73
Figura 22: Curvas de Lavabilidade da subcamada UCT: 50x1 mm	86
Figura 23: Curvas de Lavabilidade da subcamada UCT: 1x0,25 mm	86
Figura 24: Curvas de Lavabilidade da subcamada UCB: 50x1 mm.....	87

Figura 25: Curvas de Lavabilidade da subcamada UCB: 1x0,25 mm.....	88
Figura 26: Curvas de Lavabilidade da subcamada MLCU: 50x1 mm	88
Figura 26: Curvas de Lavabilidade da subcamada MLCU: 1x0,25 mm	88
Figura 27: Curvas de Lavabilidade da Camada LC 45/6: 50x1 mm.....	89
Figura 28: Curvas de Lavabilidade da subcamada LC 45/6: 1x0,25 mm	89
Figura 30: Gráfico em função de Enxofre Total das subcamada	92
Figura 31: Quadro resumo do concentrado e rejeito após a jigagem	94
Figura 32: Gráfico de Recuperação Mássica da subcamada UCT	100
Figura 33: Gráfico de Recuperação Mássica da subcamada UCB	101
Figura 34: Gráfico de Recuperação Mássica da subcamada MLCU	102
Figura 35: Gráfico de Recuperação Mássica da subcamada LC 45/6	103
Figura 36: Gráfico de Recuperação Mássica e teor de cinzas da subcamada UCT .	104
Figura 37: Gráfico de Recuperação Mássica e de teor de cinzas da subcamada UCB	105
Figura 38: Gráfico de Recuperação Mássica e teor de cinzas da subcamada MLCU	107
Figura 39: Gráfico de Recuperação Mássica e Teor de Cinzas da subcamada LC 45/6	108
Figura 40: Gráfico de Recuperação Mássica da gaveta A.....	109
Figura 41: Gráfico de Recuperação Mássica da gaveta B.....	110
Figura 42: Gráfico de Recuperação Mássica da gaveta C	111
Figura 43: Gráfico de recuperação mássica e teores de cinzas (Gaveta A).	112
Figura 44: Gráfico de recuperação mássica e de teores de cinzas (Gaveta B).	113
Figura 45: Gráfico de recuperação mássica e de teores de cinzas (Gaveta C).	114
Figura 46: Circuito geral de beneficiamento dos grossos da planta da Vale (Moatize-I).	116
Figura 47: Rota de beneficiamento da subcamada UCT	118
Figura 48: Rota de beneficiamento da subcamada UCB	119
Figura 49: Rota de beneficiamento da subcamada MLCU	120
Figura 50: Rota de beneficiamento da subcamada LC 45/6.....	121
Figura 51: Histograma das classes da vitrinita da camada UCT (16-119).....	125

Figura 52: Histograma das classes da vitrinita da subcamada UCB (16-059)	126
Figura 53: Histograma das classes da vitrinita da subcamada MLCU (Amostra 16-118).	127
Figura 54: Histograma das classes da vitrinita da subcamada LC 45/6 (16-060).	129
Figura 55: Composição Petrográfica das subcamadas após a redistribuição dos Macerais	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Origem e composição - química de carvão mineral.....	19
Tabela 2: Classificação dos carvões pelo rank	20
Tabela 3: Parâmetros do rank do carvão.	21
Tabela 4: Aplicabilidade de processos de separação densimétrica.....	29
Tabela 5: Densidades de líquidos orgânicos usados em ensaios de afunda-flutua.	31
Tabela 6: Densidades de alguns solventes usados em ensaios de afunda-flutua (a 25 °C)	32
Tabela 7: Tipos de jigues.....	35
Tabela 8: Componentes básicos de um jique pneumático a escala piloto.....	36
Tabela 9: Intervalo típico de operação de diferentes tipos de jigues	39
Tabela 10: Identificação laboratorial das amostras para análise petrográfica.....	68
Tabela 11: Resultados da análise densimétrica da subcamada UCT	75
Tabela 12: Resultados da análise densimétrica da subcamada UCT	76
Tabela 13: Resultados da análise densimétrica da subcamada UCB.....	77
Tabela 14: Resultados da análise densimétrica da subcamada UCB.....	78
Tabela 15: Resultados da análise densimétrica da subcamada MLCU	79
Tabela 16: Resultados da análise densimétrica da subcamada MLCU	80
Tabela 17: Resultados da análise densimétrica da subcamada LC 45/6.....	80
Tabela 18: Resultados da análise densimétrica da subcamada LC 45/6.....	81
Tabela 19: Resultados da análise petrográfica da subcamada UCB	125
Tabela 20: Resultados da análise petrográfica da subcamada MLCU	126
Tabela 21: Resultados da análise petrográfica da subcamada LC 45/6	128
Tabela 22: Recálculo de grupos de Macerais / Análise imediata das amostras das subcamadas	129

LISTA DE SÍMBOLOS

ρa = peso específico do mineral mais denso

ρb = peso específico do mineral menos denso

ρf = peso específico do meio fluido da separação

CO₂: Dióxido de Carbono

CH₄: Metano

H₂O: Água

°C: Graus centígrados

d_{máx}: Diâmetro máximo

FeS₂: Sulfeto de Ferro II

Gt: Gigatoneladas

g/cm³: Gramas por centímetros cúbicos

h/d: horas por dia

J/Kg: Joule por quilograma

Kg: Quilogramas

km: Kilómetros

kPa: Kilopascal

km²: Kilómetros quadrados

mm: Milímetros

m: Metros

min: Minutos

m/t: Milhões de toneladas

Mtpa: Milhões de toneladas por ano

MJ/Kg: Mega Joule por quilograma

MV (%): percentual de materiais voláteis

t/a: toneladas ano

%: Porcentagem

μm: Micrómetros

<: Menor que

>: Maior que

LISTA DE ABREVIATURAS

Ac: Acumulado

Af: Afundado

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CHPP: Coal Handling Preparation Plants (Plantas de Preparação de Carvão)

CZ: Teor de Cinzas

Dcm: Dense medium cyclone (Ciclones de Meio denso)

Dir: Direita

DINAGECA: Direção Nacional de Geografia e Cadastro

ESE-WNW: Este Sudeste- Oeste Noroeste

EN: Estrada Nacional

Esq: Esquerda

Eq: Equação

Fig: Figura

Fl: Flutuado

GBCHealth: Global Business Coalition on HIV/AIDS, Tuberculose and Malaria

ICCP: International Committee for Coal Petrology (Comitê Internacional de Petrologia de Carvão)

ISO: Organização Internacional para Padronização

HVB-A: Betuminoso Alto Volátil

HVB: Betuminoso Médio Volátil

LAPROM: Laboratório de Processamento Mineral

LTM: Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental

LC 45/6: Lower Chipanga (Camada Chipanga inferior)

MAE: Ministério da Administração Estatal

m.a: Milhões de anos

mtpa: Milhões de toneladas por ano

MIREM: Ministério dos Recursos Minerais e Energia

MLCU: Middle Lower Chipanga Upper (Camada Média Chipanga Superior)

NBR: Normas brasileira de regulação

NE: Noroeste

N^o: Número

NS: Norte Sul

NE-SW: Noroeste- Sudoeste

NGM: *Near Gravity Materials*

NW: Noroeste

PC: Poder calorífico

PCI: Poder calorífico inferior

PCS: Poder calorífico superior

PCM: Programa de Carvão de Moçambique

PGMs: Platinum-Group Metals

RGPH: Recenseamento Geral da População e Habitação

R.M: Recuperação Mássica

ROM: *run-of-mine* (minério que vem diretamente da mina-Carvão bruto)

SW: Sudoeste

S.A: Sociedade Anónima

UCB: Upper Chipanga Base (Base da camada Chipanga)

UCT: Upper Chipanga Thermal (Topo da camada Chipanga)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos	15
1.2 Justificativa.....	16
1.3 Estrutura da Tese.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Carvão mineral.....	18
2.1.1 Carvão definição.....	18
2.1.2 Origem, processos de formação e classificação	18
2.1.3 Classificação	19
2.1.4 Rank do carvão	20
2.1.5 Macerais:.....	21
2.1.6 Vitrinita	22
2.1.7 Liptinita	22
2.1.8 Inertinita.....	22
2.1.9 Caracterização de carvão mineral.....	23
2.1.10 Análise imediata	23
2.1.11 Teor de umidade (U)	23
2.1.12 Teor de matéria volátil (MV)	24
2.1.13 Teor de cinzas (CZ).....	24
2.1.14 Teor de carbono fixo (CF)	24
2.1.15 Análise elementar.....	25
2.2 Beneficiamento de carvões	25
2.2.1 Caracterização para o beneficiamento gravimétrico de carvões	26
2.2.2 Aparelhagem usada em ensaios de afunda-flutua	27
2.2.3 Curvas de lavabilidade	27
2.2.4 Curva de NGM.....	28

2.2.5	Processo de beneficiamento de carvões	29
2.2.6	Ensaio de afunda-flutua para o beneficiamento	30
	Tabela 5: Densidades de líquidos orgânicos usados em ensaios de afunda-flutua.....	31
2.3.	Jigagem.....	32
2.3.1	Teoria da jigagem.....	33
2.3.2	Tipos de jigues	34
2.3.3	Jigues Baum (ALLAIR) pneumático.....	35
	Figura 2: Principais componentes do jigue pneumático a escala piloto	36
2.3.4	Princípio de funcionamento	36
2.3.5	Variáveis operacionais de um jigue	38
2.3.6.	Amplitude e freqüência das pulsações	38
2.3.7	Camada de fundo	40
2.3. 8	Granulometria da alimentação	40
2.4	Bacia carbonífera de Moatize	41
2.4. 1	Localização da área de estudo, Superfície e População.....	41
2.4.2	Geologia local.....	42
2.4.3	Base rochosa	42
2.4.4	Série produtiva	42
2.4.5	Estratigrafia, da camada Chipanga	44
2.4.6	Principais bacias e sub-bacias carboníferas de Moatize.....	45
2.5	Usina de beneficiamento de Moatize	46
2.5.1	Operações unitárias do Fluxograma de beneficiamento de Moatize-I.....	47
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	Materiais.....	51
3.2	Metodologia.....	51
3.2.1	Identificação, preparação e padrões das amostras da alimentação.....	51
3. 3	Etapas.....	51
3. 3.1	Primeira etapa:	51

3. 3.2 Segunda etapa:	52
3. 3.3 Terceira etapa: Caracterização para o beneficiamento	52
3.3.4 Quarta etapa	53
3. 4 Preparação das amostras.....	53
3.5 Caracterização das amostras	54
3.5.1 Classificação granulométrica.....	54
3.6 Caracterização densimétrica	54
3.6.1 Análises imediata e elementar	55
3.6.2 Descrição das fases	56
3.6.3 Análises de umidade (U)	57
3.6.4 Determinação de teor de cinza (CZ).....	58
3.6.5 Matéria volátil (MV).....	59
3.6.6 Carbono fixo	59
3.6.7 Determinação de enxofre total (S).....	59
3. 6.8 Pesagens das amostras (g).....	60
3.7 Elaboração de curvas de lavabilidade	60
3.8 Testes no jigue a ar.....	61
3.8.1 Preparação do equipamento	62
3.8.2 Preparação das amostras	63
3.8.3 Verificação de densidades	63
3.8.4 Umidade de alimentação.....	63
3.8.5 Quantidade de amostra	63
3.8.6 Procedimento	64
3.8.7 Descrição das Fases do fluxograma	66
3.9 Análise petrográfica.....	68
3.9.1 Preparação das amostras	68
3.9.2 Determinação do Poder refletor da vitrinita	68

3.9.3 Análises de Macerais/ grupos de macerais	69
3.9.4 Descrição das Fases do fluxograma	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1 Resultados da análise granulométrica	73
4.2 Resultados da análise do estudo gravimétrico.....	75
4.3 Resultados da análise imediata e elementar da alimentação	82
4.4 Curvas de lavabilidade de HENRY –REINHARDT.....	85
4.5 Resultados da análise de enxofre total	90
4.6 Resultados de ensaios após a jigagem	93
4.6.1 Recuperação mássica da alimentação após a jigagem.....	93
4.6.3 Resultados de Recuperação mássica por camada	100
4.6.4 Recuperações mássicas e seus teores de cinzas por gaveta para cada subcamada.....	104
4.6.5 Recuperações mássicas das subcamadas estratificadas em cada gaveta	109
4.6.6 Recuperação mássica das subcamadas estratificadas em cada gaveta e seus respectivos teores de cinzas.....	111
4.6.7 Circuito de beneficiamento dos grossos (Moatize- I).....	116
4.6.8 Proposta de definição de circuito de beneficiamento	117
4.7 Análise petrográfica.....	123
5. CONCLUSÕES.....	131
6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
7. REFERÊNCIAS	135
APÊNDICES.....	140
Apêndice 1: Distribuição granulométrica da subcamada UCT.....	141
Apêndice 2: Distribuição granulométrica da subcamada UCB	141
Apêndice 3: Distribuição granulométrica da subcamada MLCU	141
Apêndice 4 : Distribuição granulométrica da subcamada LC 45/6.....	141
Apêndice 5: Tabela de resultados da análise de Umidade das subcamadas	142

Apêndice 6: Tabela de resultados da análise de Matéria Volátil das subcamadas	143
Apêndice 7: Tabela de resultados da análise de teores de cinzas das subcamadas.	144
Apêndice 8: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada UCT (50X1mm).....	145
Apêndice 9: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada UCB (50X1mm).....	145
Apêndice 10: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada MLCU (50X1mm).....	146
Apêndice 11: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada LC 45/6 (50X1mm).....	146
Apêndice 12: Tabela de resultados de análises de Umidade das subcamadas (1x0,25 mm)	147
Apêndice 13: Resultados de análises de Materiais Voláteis das subcamadas (1x0,25 mm)	148
Apêndice 14: Tabela de resultados de análise de Teores de Cinzas das (1x0,25 mm)	149
Apêndice 15: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada UCT (1x0,25 mm).....	150
Apêndice 16: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada UCB (1x0,25 mm).....	150
Apêndice 17: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada MLCU (1x0,25 mm).....	151
Apêndice 18: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada LC 45/6 (1x0,25 mm).....	151
Apêndice 19: Tabela de resultados da análise de Enxofre Total-UCT.....	152
Apêndice 20: Tabela de resultados da análise de Enxofre Total-UCB	153
Apêndice 21: Tabela de resultados da análise de Enxofre Total-MLCU	154
Apêndice 22: Tabela de resultados da análise de Enxofre Total-LC 45/6	155
Apêndice 23: Tabela de resultados da análise de Umidade das subcamadas após a jigagem.....	156
Apêndice 24: Tabela de resultados da análise de Teores de cinzas das subcamadas após a jigagem	157
Apêndice 25: Tabela de Resultados de análise petrográfica da subcamada UCT.....	158
Apêndice 26: Tabela de Resultados de análise petrográfica da subcamada UCB	159

Apêndice 27: Tabela de resultados de análise petrográfica da subcamada MLCU ...	160
Apêndice 28: Tabela de resultados da análise petrográfica da subcamada LC 45/6.	161
ANEXOS.....	162
Anexo 1: Pontos de coleta de amostras da camada UCT-Minas de Moatize	163
Anexo 2: Pontos de coleta de amostras da camada UCB- Mina de Moatize	164
Anexo 3: Pontos de coleta de amostras da camada MLCU- Mina de Moatize	165
Anexo 4: Pontos de coleta de amostras da camada LC 45/6- Mina de Moatize	166

1. INTRODUÇÃO

Mesmo com a decadência dos preços da maioria das matérias primas minerais como o carvão mineral, o petróleo e gás, na atualidade, a mineração de carvão é uma atividade de grande importância para a economia nacional moçambicana, não só, mas também para muitos países do mundo em vias de desenvolvimento. A escassez de energia elétrica aliada à menor disponibilidade de recursos hídricos faz com que a geração de energia térmica e o fabrico de coque passem a ser um dos focos principais das possibilidades de expansão do sistema elétrico internacional. Nos últimos anos a província de Tete, em particular em Moatize, virou um ponto de pesquisas geológicas de jazidas ou depósitos de carvão mineral ali existente.

A Caracterização tecnológica deste recurso visando à remoção de material desnecessário para seu beneficiamento é fundamental conhecer uma série de processos que visam o conhecimento íntegro das características deste material na avaliação e redução da matéria inorgânica, tais como rocha (estéril-ganga) e impurezas existentes nele a fim de definir parâmetros essenciais e da avaliação para a melhoria da sua qualidade.

Por outro lado, a visão para o beneficiamento de carvão, ou carvão lavado, refere-se ao tratamento dado ao carvão *ROM* (Carvão bruto), logo após sua extração, a fim de assegurar a qualidade do mesmo e aumentar sua potencialidade para o seu uso pelo consumidor. O tratamento depende das propriedades do carvão e de finalidade pretendida, podendo exigir uma simples lavagem/moagem ou necessitar de processos mais complexos.

Entre os recursos energéticos não renováveis, o carvão mineral ocupa a primeira colocação tanto em abundância, quanto em perspectivas de vida útil; considerado, portanto, a mais importante reserva energética mundial a longo prazo. Sua demanda atual em Tete, está aumentando consideravelmente, com o objetivo de produção de coque para a fundição de ferro nas empresas siderúrgicas no Brasil, assim como para abastecer usinas termelétricas na Ásia Oriental, as Américas e Europa.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da pré-concentração de carvão *ROM* da Mina de Moatize-Moçambique visando a eliminação de material estéril na entrada da usina (no início do processamento). A área de estudo fica localizada no Município de Moatize, Província de Tete, em Moçambique onde atualmente se localizam as maiores reservas de carvão mineral do país VASCONCELOS (2005). A pré-concentração de carvão *ROM*, consiste em remover uma parte de rejeito logo após a britagem no circuito dos grossos antes de enviar para os ciclones de meio denso. O uso do processo de jigagem à seco neste processo de separação pode ser uma alternativa sustentável. A Mina pertence a empresa brasileira de mineração “Vale” esta, vem minerando em Moatize desde o ano de 2011 usando o método à céu aberto, objetivando a produção de carvão metalúrgico e termelétrico. Segundo a VALE (2015), indica que hoje a produção enquadra-se na faixa de mais de 22 mtpa em cada módulo instalado (Moatize – I e II).

A caracterização tecnológica de carvão mineral, os seus resultados, permitem conhecer as principais características através de ensaios laboratoriais específicos, como as análises químicas, físicas, mineralógicas, petrográficas que podem definir com exatidão o tipo de carvão (térmico ou metalúrgico), podendo determinar por outro lado a avaliação econômica da jazida. As análises realizadas seguiram os procedimentos, normas e critérios exigidos pelas técnicas vigentes e os resultados obtidos foram interpretados, discutidos e comparados com base na bibliografia existente sobre o assunto em estudo.

1.1 Objetivos

- **Geral:**

- ◆ O objetivo geral deste trabalho de Tese é avaliar a viabilidade técnica da pré-concentração de carvão *ROM* da Mina de Moatize-Moçambique visando a eliminação de material estéril na entrada da usina no início do processamento de beneficiamento.

- **Específicos:**

Desejando alcançar o objetivo geral proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- ◆ Caracterizar os carvões ROM das subcamadas da camada Chipanga da bacia de Moatize (UCT, UCB, MLCU e LC 45/6);

- ◆ Avaliar o comportamento petrográfico de carvão *ROM* das subcamadas anteriormente relacionadas da camada Chipanga;

- ◆ Estimar a capacidade do jigue à seco de pré-concentrar os diferentes carvões das sub-camadas da camada Chipanga e promover uma adequada remoção de rejeitos.

1.2 Justificativa

Pela importância do carvão mineral na atualidade, aumenta a necessidade de se incrementar investimentos por forma em aperfeiçoar as tecnologias com o propósito de se conhecer ainda mais em detalhe o comportamento do carvão mineral para a sua utilização futura, seja para queima ou para uso em altos fornos.

Pela relevância do processo de pré-lavagem no carvão mineral usando o jigue à seco para alimentar os ciclones de meio denso como forma de remover uma parte de material desnecessário (rejeitos) no circuito de grossos da usina de beneficiamento da Mina de Moatize-I.

A falta de estudos de caracterização tecnológica de carvão de Moatize, em particular visando à redução de rejeito a ser enviado para uma usina de beneficiamento. Falta de estudos publicados sobre o processo de pré-lavagem usando equipamentos como o jigue à seco em toda a sua história da mineração de Moçambique. Pela pouca informação científica publicada, a falta de artigos científicos, dissertações e teses publicados referentes ao beneficiamento do carvão de Moatize. Nesse contexto se justifica a necessidade da realização de um trabalho desta índole visando à contribuição científica com relação ao processo de beneficiamento dos carvões de Moçambique e em particular os da Mina de Moatize.

1.3 Estrutura da Tese

O presente trabalho de tese está composto por quatro principais capítulos descritos minuciosamente a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: Aborda o contexto geral da pesquisa, relata as principais motivações do pesquisador e os objetivos estabelecidos no desenvolvimento do estudo;

Capítulo 2 – Fundamentação teórica: Engloba o estado da arte da caracterização tecnológica dos carvões, beneficiamento usando meio denso (método de afundamento). Processos de jigagem á seco, suas aplicações e seus principais modelos teóricos e a sua influência nas propriedades sobre a estratificação e recuperação mássica do carvão mineral. Caracterização petrográfica para a determinação de principais macerais e grupos de macerais que constiuem o carvão mineral de Moatize, sua classificação, avaliação e aplicação;

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: Retrata o procedimento geral adotado ao longo da realização dos testes, bem como a seleção dos equipamentos e materiais utilizados;

Capítulo 4 – Resultados e discussões: (Principais resultados obtidos e sua detalhada discussão);

Capítulo 5 – Conclusões: (Principais resultados obtidos de acordo com o objetivo pré-definido);

Capítulo 6 – Propostas para estudos futuros: (Se propõem alguns trabalhos que poderão dar contribuições importantes no futuro).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Carvão mineral

2.1.1 Carvão definição

JOSÉ (2011) define como carvão mineral sendo: uma rocha sedimentar combustível, formada a partir de determinados vegetais encontrados em diferentes estados de conservação e tendo sofrido soterramento e compactação em bacias originalmente pouco profundas, possuindo teores de carbono, hidrogênio e oxigênio variáveis de acordo com os diversos estágios de transformação da planta em carvão. Na carbonificação há um aumento de teor de carbono e diminuição dos teores de oxigênio e hidrogênio nas sucessivas etapas do processo, ou seja, vegetal (celulose), turfa, linhito, hulha, antracito e grafite.

SANTANA (2002) define como uma rocha sedimentar combustível formada pela decomposição parcial de matéria vegetal, soterrada originalmente em bacias pouco profundas, na ausência do contato do ar, sob a influência de aumento de pressão, temperatura e tempo.

2.1.2 Origem, processos de formação e classificação

GOMES (2002) descreve que os carvões originaram-se de vegetais superiores e de resíduos vegetais terrestres como: troncos, galhos, arbustos, folhas, sementes, polens, celulose, cujas deposições ao longo do tempo geológico sofreram diagênese e compactação na bacia sedimentar, e transformações devidas as pressões e a temperaturas concentrando carbono e hidrogênio nas rochas estratificadas.

MILLER & TILLMAN (2008), referem que na ausência de ar, os vegetais sofreram pela ação de bactérias, de temperaturas entre (100-600 °C) e pressão até (1500 atm), tendo um vasto número de complexas alterações. O processo de formação de carvão envolve diferentes processos dentre bioquímicos, geológicos e físico-químicos tais como: decomposição da matéria vegetal, deposição e soterramento de sedimentos e compactação e transformação dessa matéria em rocha sedimentar orgânica conhecida hoje por carvão mineral.

Por sua vez STUTZER & NOÉ (1940), relacionam que os teores de hidrogênio e oxigênio decrescem com o aumento do *rank*, fundamentando que esses dois gases escapam com o aumento do grau de carbonificação. O hidrogênio combina-se com

carbono e forma metano (CH_4) e ao mesmo tempo combina com oxigênio formando H_2O , mas também o oxigênio escapa como dióxido de carbono (CO_2). Nesse processo resta como resíduo uma mistura de sólido que é o carvão, compostos complexos constituídos de carbono, hidrogênio, oxigênio no qual o hidrogênio, oxigênio, e outros constituintes de voláteis continuam diminuindo com o aumento do rank. Desta forma, conclui-se que na medida em que aumenta o rank do carvão, o teor de carbono aumenta e os componentes que constituem a matéria volátil diminuem.

Finalmente SANTANA (2002), sustenta afirmando que a formação do carvão depende da decomposição parcial de matéria vegetal, soterrada originalmente em bacias pouco profundas, na ausência de ar, sob a influência de aumento de pressão, temperatura e tempo. Nesse processo, os restos vegetais ao longo do tempo geológico perderam a matéria volátil e se enriqueceram em carbono.

Tabela 1: Origem e composição - química de carvão mineral.

Composição	Madeira e combustíveis fósseis					
	Madeira	Turfa	Linhito	Carvão	Antracito	Carvão
Carbono (%)	44-52	50-68	55-75	74-96	90-96	100
Oxigênio (%)	43-42	35-28	26-19	20 -3	3-0	0
Hidrogênio (%)	5-6	7-5	6-9	5-1	3-1	0

Fonte: DNPM (2017)

2.1.3 Classificação

Sendo o carvão mineral uma substância complexa de acordo com a sua definição. Devido a essa complexidade das suas propriedades físicas e químicas e as suas várias formas de utilização, existem uma variada formas de classificação dos carvões que datam desde 1931.

Como forma de harmonizar adequadamente os Estados Unidos da América, estabeleceu uma norma internacional de classificação dos carvões (ASTM- D388, 1972), entidade internacional de mérito para a normalização e padronização de testes, análises e ensaios para os mais variados tipos de materiais, incluindo o carvão fóssil. A tabela 2 mostra a classificação dos carvões pelo sistema americano

em função de grupos e subgrupos, baseando-se em (CF): Carbono Fixo, (PC): Poder Calorífico, (MV): Materia Volátil e o (PA): Poder Aglomerante.

Tabela 2: Classificação dos carvões pelo rank

Grupo	Subgrupo	CF (≥ % <	MV (%) ≤	PC Kcal/kg ≥ (%) <	Poder Aglomerante
I. Antracito	Meta-antracito	98	2	----	Não Aglomerante
	Semi-antracito	92-98	2-8	----	
	Antracito	86-92	8-14	----	
II. Betuminoso	Carvão betuminoso médio volátil	78-86	14-22	----	Comumente Aglomerante
	Carvão betuminoso baixo volátil	69-78	22-31	----	
	Carvão betuminoso alto volátil A	69	31	7840	
	Carvão betuminoso alto volátil B	----	----	7280-7840	
	Carvão sub-betuminoso C	----	----	6440-7280 5880-6440	Aglomerante
III.Sub- betuminoso	Carvão sub-betuminoso A	----	----	5880-6440	Não Aglomerante
	Carvão sub-betuminoso B	----	----	5320-5600	
	Carvão sub-betuminoso C	----	----	4648-5320	
IV. Linhito	Linhito A	----	----	3528-4648	Não Aglomerante
	Linhito B	----	----	3528	

Fonte: Adaptado de ASTM- *American Society for Testing and Materials* (1972).

2.1.4 Rank do carvão

O *rank* de carvão se refere ao grau de coalificação suportado pela matéria orgânica, sendo calculado pelo conteúdo da mistura, da energia específica, da refletância da vitrinita ou da matéria volátil, estes são os parâmetros do *rank*. CORREIA da SILVA *et al.* (1987).

Este processo pode ser definido como um processo geoquímico que transformou restos de plantas em carvão ou corresponde o estágio da transformação progressiva da matéria orgânica vegetal em carvão mineral. Os carvões possuem diversos estágios de carbonificação, cuja proporção de carbono

fixo aumenta à medida o carvão se forma. De forma crescente, destacam-se: turfa→ linhito→ carvão (sub-betuminoso)→ carvão (betuminoso)→ antracito. Quanto mais intensas a pressão e temperatura e quanto mais tempo durar (tempo geológico) o processo de carbonificação mais alto será o conteúdo de carbono fixo, logo mais alta será a sua classificação e o poder calorífico.

Tabela 3: Parâmetros do rank do carvão.

Estágio do <i>rank</i>	(%) de carbono (daf)	(%) Matéria volátil (daf)	Energia específica (Mk/kg)	(%) de Umidade in situ	(%) Refletância da vitrinita	
					Random	Máxima
Madeira	50	> 65	-	-	-	-
Turfa	60	> 60	14,7	75	0,2	0,2
Carvão Marrom	71	52	23	30	0,4	0,42
Sub-Betuminoso	80	40	33,5	5	60	0,63
Carvão Betuminoso de alto volátil	86	31	35,6	3	0,97	1,03
Carvão betuminoso de médio volátil	90	22	36	< 1	1,47	1,58
Semi-antracito	92	8	36	1	2,65	2,83
Antracito	95	2	35,2	2	6,55	7

Fonte: Adaptado: DIESEL (1992)



Figura 1: Estágios de carbonificação de carvão mineral

Fonte: Adaptado de DPRM (2017)

2.1.5 Macerais:

São componentes microscópicos orgânicos do carvão e são compostos pelos restos de plantas terrestres superiores (carvão húmico) e restos de algas e

esporinitas (carvão sapropélico). As propriedades de carvão e os diversos tipos desta matéria, dependem das porções e das associações dos macerais presentes (ISO 7404/3 de 1984).

De acordo com ICPP (1998), refere que os principais macerais dos carvões podem ser classificados em três grupos fundamentais: Vitrinita, Exinita e Inertinita.

2.1.6 Vitrinita

De forma geral é o grupo de maceral mais abundante nos carvões húmicos com cerca de 50 a 90%. Ela, é formada a partir de matérias ricas em lignina, como caules, raízes e folhas das plantas. Este material passa por uma decomposição/preservação, antes da degradação mecânica e oxidação parcial reduzida, que produz gel colóide húmico. Este processo é chamado de humificação. A estrutura celular da matéria vegetal pode ser preservada e eventualmente ser identificável ao microscópio óptico. Os macerais da vitrinita são derivados da parede da célula da madeira, que são compostas quimicamente de polímeros, celulose e lignina e se forma sob condições úmidas, num nível freático inferior, devido a uma taxa menor de subsidência da bacia de deposição.

2.1.7 Liptinita

É o grupo de maceral constituído por restos de matéria orgânica, como esporos, cutículas e resinas que são resistentes ao aquecimento e à diagêneses, constitui cerca de 5 a 15% dos carvões e com uma refletância que varia de 1,35 a 1,40%. Ela possui como principal característica de um alto teor de hidrogênio e de matérias voláteis. Estes componentes, quando excitados por luz azul ou UV, podem ser identificados com facilidade pela sua propriedade de fluorescência. Este grupo, a mudança do *rank* de betuminoso alto volátil para betuminoso médio volátil altera significativamente as propriedades ópticas e químicas. As liptinitas não podem ser distinguidas quando o *rank* de carvão chega a níveis mais altos.

2.1.8 Inertinita

É composta da mesma matéria da vitrinita, exceto que o material orgânico que lhe deu origem tenha sido oxidado e /ou sofrido o processo redox antes e /ou após a sua deposição. Tem sido altamente alterada e degradada no estágio da turfa na

formação do carvão, podendo alcançar até 70% nos carvões. Este grupo de maceral apresenta maior refletância que os outros grupos de macerais do mesmo rank, que é pobre em matéria volátil, sendo ela relativamente inerte.

2.1.9 Caracterização de carvão mineral

A caracterização de carvão passa em descrever, analisar todos os seus parâmetros sendo análises elementares que indicam a composição química do carvão em termos de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio numa base isenta de umidade e cinzas.

O oxigênio e o hidrogênio influenciam diretamente às propriedades plásticas do carvão. A análise do enxofre e das suas formas é fundamental, pois praticamente todo o enxofre contido no ferro-gussa e no aço é proveniente do carvão. O carvão mineral não apresenta uma composição uniforme, assim, não se tem uma fórmula química definida que o caracterize por isso as análises químicas, imediatas e elementares são importantes.

2.1.10 Análise imediata

A análise imediata é um método simples e rápido para a determinação da distribuição dos produtos obtidos em aquecimento de uma amostra de carvão, em termos de teor de matéria volátil (MV), cinzas (CZ), Umidade (U), e Carbono fixo (Cfix) por diferença. Carvões coqueificantes possuem matéria volátil, em base seca isenta de cinzas (Mvbasic), numa faixa em torno de 20 a 30%. O teor das cinzas não tem uma relação direta com as propriedades coqueificantes de um carvão, mas deve ser o mais baixo possível em função do alto forno.

Segundo PEUKER & FAGUNDES (2006) a análise imediata envolve a determinação dos principais componentes de carvão mineral para a sua aplicação como combustível na indústria. Nessa análise são avaliados os teores de umidade (NBR: 8293), teores de matéria volátil (NBR: 8290), teores de cinzas (NBR: 8289) e de carbono fixo (NBR: 8299), todos os resultados são expressos em base seca.

2.1.11 Teor de umidade (U)

PEUKER & FAGUNDES (2006), o teor de umidade é a quantidade total de água presente em uma amostra de carvão mineral resultante de combinação entre a

umidade superficial e inerente ao produto. Durante as etapas de beneficiamento, transporte e armazenamento se incorporam a umidade nas amostras. A parte inerente de umidade é o resultado das propriedades naturais. Neste caso, a umidade ocorre na forma de combinação química na matriz porosa do carvão mineral.

De salientar que a determinação da umidade total numa amostra de carvão mineral varia de acordo com a norma, equipamento e os procedimentos laboratoriais. Por exemplo, no Brasil em geral é considerada válida para esta análise a norma NBR: 8293, levando em consideração a umidade superficial, residual ou inerente, higroscópica e a umidade total.

2.1.12 Teor de matéria volátil (MV)

A matéria volátil é o resultado das combinações de carbono, hidrogênio e outros gases. Sabe-se ainda que o poder calorífico aumenta com o teor de matéria volátil até um nível de 20%. Acima desse valor, há redução no poder calorífico, já que em alguns dos voláteis são formados por compostos de nitrogênio e oxigênio não-combustíveis PEUKER & FAGUNDES (2006).

2.1.13 Teor de cinzas (CZ)

A presença de teor de cinzas no carvão mineral é devida a presença de minerais associados no processo de formação, isto é, à fase de crescimento da vegetação ou àqueles que entraram nas jazidas durante ou depois do período de formação. A presença deste teor no carvão mineral implica a redução no seu poder calorífico. De forma geral, os carvões moçambicanos apresentam menores teores de cinzas comparados com os carvões brasileiros, isto se deve aos processos anteriormente referidos. É diretamente proporcional a relação entre teor de cinzas, poder calorífico e custo do produto.

2.1.14 Teor de carbono fixo (CF)

O carbono fixo calcula-se pela diferença, subtraindo 100 a soma das percentuais de cinzas, umidade e de materiais voláteis, isto é: $100 - (\% CZ + \% U + \% MV)$, segundo NBR-8299. O carbono fixo no carvão mineral refere-se ao carbono

residual que não foi queimado nem volatizado. Refere-se ao carbono em seu estado livre, não combinado com os outros elementos.

2.1.15 Análise elementar

Segundo PEUKER & FAGUNDES (2006), a análise elementar determina os elementos individuais de um carvão mineral tais como: a presença de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio.

Esses elementos são aqueles que podem sofrer gaseificação e liberar ou absorver calor durante as etapas das reações de combustão. Para determinar os tipos de enxofre contido nos carvões, primeiramente, procede-se à determinação do teor de enxofre total da amostra.

Esse procedimento pode ser feito através de análises químicas ou via instrumental. Segundo a norma NBR: 8297 se determinam as diferentes formas de enxofre no carvão mineral.

Teor de enxofre sulfático é determinado pela sua extração em solução diluída em ácido clorídrico, o pirítico é determinado pela sua extração pela solução em ácido nítrico diluído. Assim, a forma orgânica do enxofre, é determinada pela diferença, ou seja: % Enxofre total= (% enxofre sulfático +% enxofre pirítico+ % enxofre orgânico).

De acordo com PEUKER & FAGUNDES (2006), referem que o conteúdo de enxofre no carvão mineral pode ser reduzido nas plantas de beneficiamento através da remoção da pirita (Fe_2S) existente. Esse procedimento é feito de maneira simples já que os grãos de pirita são facilmente liberados através de sucessivas fases de pulverização (moagem ou britagem), onde a diferença entre as densidades específicas permitem a separação por processos gravimétricos consagrados.

2.2 Beneficiamento de carvões

O tratamento de minérios é a parte do conhecimento da mineração que visa preparar os minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais. Os métodos de tratamento são divididos segundo a propriedade diferenciadora dos minerais. Quando essa propriedade é a densidade a chamamos de métodos gravíticos (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

O tipo de processo mais empregado no beneficiamento de carvão mineral é o gravimétrico, que consiste no processo em que partículas de diferentes tamanhos, formas e densidades são separadas entre si pela força da gravidade ou pela força centrífuga. A concentração gravimétrica é uma das mais antigas formas de beneficiamento mineral conhecida, onde processos primitivos de separação datam de 4000 a.c. Os aparelhos utilizados em beneficiamento nos primórdios foram, provavelmente, desenvolvidos a partir de observações da natureza, uma vez que a natureza a milhões de anos concentra minerais pesados em leitos de rios formando jazimentos de aluvião. O sucesso da separação de uma espécie mineral em relação à outra depende da diferença relativa entre as características do material (SAMPAIO, 2005).

Segundo MÜLLER *et al.*, (1987), destaca que os processos de beneficiamento de carvão são diversos, sendo a grande maioria deles baseados na diferença de densidade entre a matéria carbonosa e matéria mineral principalmente nas frações grosseiras. E o beneficiamento gravimétrico é o mais adequado e usual.

Ainda MÜLLER *et al.*, (1987), considera que os estudos de beneficiamento dos carvões e as suas aplicações industriais constituem uma série de propriedades tais como: moabilidade, fragilidade e composição granulométrica, densidade, teor de cinzas, teor de matérias voláteis, teor de carbono fixo, FSI, reatividade, plasticidade, temperatura de fusão das cinzas e o poder calorífico.

A modernização técnica de beneficiamento de carvão mineral, aplicado nas indústrias mineiras, tendo em conta aumentar a capacidade de produção e ampliação do seu mercado consumidor, para os diferentes segmentos industriais, surge da necessidade de desenvolver tecnologias, aumentar as capacidades das plantas de beneficiamento, melhorando a sua eficiência, visando a sua adequação para atender a demanda existente; assim o conhecimento das especificações dos produtos desejados. SAMPAIO & TAVARES (2005)

2.2.1 Caracterização para o beneficiamento gravimétrico de carvões

Todo o beneficiamento de carvões com tamanhos superiores a 0,1 mm é realizado pelo chamado beneficiamento gravimétrico, o qual está baseado na diferença de densidades entre a matéria orgânica (normalmente densidade 1,3

g/cm³) e a matéria inorgânica (argilas com densidade próxima a 2,0 g/cm³ e pirita com densidade próxima a 2,4 g/cm³). Portanto antes de qualquer técnica de beneficiamento a ser empregada, faz-se necessária a caracterização do carvão visando o seu beneficiamento SAMPAIO (2002),

Esta caracterização é normalmente, realizada utilizando-se curvas de lavabilidade de **Henry-Reinhardt**: curvas densimétricas e curvas dos flutuados e afundados. A curva densimétrica de **Henry-Reinhardt**, descreve a liberação das partículas de carvão, por outro lado sabe-se que os carvões, quando comunidos, não são formados por partículas somente de material orgânico ou somente de material inorgânico, existem também a presença de mistos.

2.2.2 Aparelhagem usada em ensaios de afunda-flutua

Os principais critérios envolvidos na montagem da aparelhagem para um ensaio de afunda-flutua são a conveniência, a segurança e a simplicidade na operação. Diferentes tipos de aparelhagens e recipientes são usados na separação de partículas em diferentes intervalos de tamanhos.

Partículas grossas (da ordem de vários milímetros e decímetros) podem ser adequadamente separadas usando **béqueres** ou até mesmo **tambores**. Nestes casos, a fração flutuada pode ser removida do recipiente com o auxílio de uma peneira de malha fina (tipo coador caseiro), seguido de decantação cuidadosa. As frações flutuada e afundada, devem ser, então, lavadas com os solventes adequados e, sem seguida, filtradas. Na separação de partículas de tamanho intermediário (décimo de milímetro a alguns milímetros), **funis** de separação são normalmente utilizados.

2.2.3 Curvas de lavabilidade

Ensaio seqüenciais de afunda-flutua fornecem as informações necessárias para a preparação de curvas de separabilidade densimétrica de materiais. Estas curvas- também chamadas, erroneamente, de curvas de lavabilidade¹-são úteis na previsão de resultados teóricos de separação. As curvas de lavabilidade são conhecidas também por curvas de Henry- Reinhardt, as mais usualmente usadas são: curva dos flutuados (concentrado), afundados (rejeito) e curvas de tolerância ou

¹ A denominação lavabilidade origina do beneficiamento do carvão, chamado de "lavagem".

conhecidas por (NGM) *Near Gravity Materials*. Estas são utilizadas para avaliar o grau de dificuldade ou facilidade de separação gravimétrica de carvão bruto, promovendo dados qualitativos ou quantitativos para os produtos de separação na densidade relativa selecionada, através de ensaios de afunda-flutua.

SOUZA (2012) refere que as curvas de lavabilidade permitem nelas extrair informações que podem ser utilizadas na avaliação das principais características de lavabilidade do carvão, podendo mostrar diferentes camadas de carvão em um mesmo gráfico, o que facilita a comparação das suas características de lavabilidade.

O formato da curva densimétrica indica uma dificuldade a ser encontrado na separação, portanto a partir desta curva pode-se observar em qual intervalo densimétrico se encontra a maior liberação do material orgânico em relação ao material inorgânico além da maior quantidade de massa acumulada (PACHECO, 2008).

LEONARD (1979) refere ainda que de acordo com as curvas dos flutuados e afundados pode-se plotar no eixo da abscissa o percentual da massa de enxofre total, dependendo da finalidade de uso do carvão.

HORSFALL (1980) destaca a importância na curva dos afundados em alguns casos, onde quando um carvão lavado apresenta baixo teor de cinzas no seu produto, o seu descarte ou ganga pode também ser valioso, mesmo que contenha uma considerável quantidade de cinzas.

Todos os dados de recuperação de teor de cinzas obtidos a partir das curvas de lavabilidade são para uma perfeita separação. Por essa razão, esses dados são conhecidos como valores teóricos. Portanto quanto maior for a eficiência na separação do carvão, mais próximos os valores práticos serão obtidos através das curvas de **Henry-Reinhardt**. HORSFALL (1980).

2.2.4 Curva de NGM

Esta curva é de extrema importância, pois ela determina a variação de partículas que tenham densidades próximas à densidade de separação estipulada no equipamento de beneficiamento gravimétrico.

A curva de *NGM* é preparada a partir da proporção de partículas com densidade dentro de um intervalo estabelecido, em função da densidade de separação. A proporção de material com densidade próxima à de separação é, normalmente, considerada como aquela correspondente ao intervalo de $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ em relação á densidade de corte SAMPAIO & TAVARES (2005).

Tabela 4: Aplicabilidade de processos de separação densimétrica.

NGM (%) Distribuição com escala em $0,1 \text{ g/cm}^3$	Grau de dificuldade esperado	Processo esperado gravimétrico	Tipo
0-7	Simples	Quase qualquer processo a altas taxas de alimentação	-----
7-10	Relativamente simples	Processo eficiente a altas taxas de alimentação	Separação em meio denso, jigues, calhas, mesas e espirais
10-15	Moderadamente difícil	Processo eficiente	-----
15-25	Difícil	Processo de meio denso	Separação em meio
> 25	Extremamente difícil	Processos de meio denso com estrito controle da densidade do meio	Separação em meio denso com controle estrito da densidade do meio

Fonte: BIRD, *apud* SAMPAIO & TAVARES (2005)

2.2.5 Processo de beneficiamento de carvões

Segundo SAMPAIO (2002), a operação de beneficiamento de carvões, propriamente dita, é uma etapa que não é danosa ao meio ambiente. Isto se justifica uma vez que as plantas de beneficiamento utilizam água para o beneficiamento de carvões. A água utilizada nesse processo é utilizada diretamente em misturas com carvões para facilitar a estratificação do particulado como exemplos na utilização de jigues, mesas concentradoras entre outros, etc. ou então na preparação de polpas (misturas com sólidos finamente cominuídos no caso da magnetita que é usado nos processos em meio-densos).

Nos processos que utilizam meio-densos, após o beneficiamento o meio denso é regenerado por meio de separação magnética, restando à água misturada com partícula sólida; esta água é reaproveitada. Nas plantas de beneficiamento de carvões, a água não é totalmente re-aproveitada, pois isto acarretaria aumento da concentração de sais dissolvidos proveniente do carvão beneficiado.

Isso poderia diminuir o tempo de vida útil dos equipamentos, devido à corrosão causada por esses sais. Recomenda-se então que a água utilizada sempre deve ser filtrada ou espessada antes do seu descarte, não causando nenhum efeito negativo ao meio ambiente, pois todo o particulado é removido.

2.2.6 Ensaio de afunda-flutua para o beneficiamento

Os ensaios de afunda-flutua consistem em colocar as amostras de objeto de estudo num líquido de menor densidade, onde a fração flutuada é recolhida e analisada. A fração afundada no primeiro líquido é introduzida no líquido seguinte com maior densidade que a primeira, isto é, de maior densidade, em seguida recolhe-se novamente o flutuado e assim sucessivamente até o líquido de densidade máxima pré-definido a investigação (RÚBIO, 1988).

De acordo com a norma brasileira -NBR 8738, os ensaios densimétricos que através dos mesmos se realiza a separação gravimétrica. São realizados para conhecer quantitativamente a variação da densidade do carvão bruto fracionando-o, usualmente, por meio de líquidos de densidades médias pré-fixadas.

RÚBIO *apud* SAMPAIO & TAVARES (2005), apuram que os líquidos utilizados nos ensaios de afunda-flutua são orgânicos e apresentam densidades que variam entre 1,30 e 2,89 g/cm³. Ademais, podem apresentar intervalos variáveis de densidades específicas conforme o ensaio que se pretende realizar. Na tabela 5, observam-se diferentes líquidos orgânicos, suas densidades e possíveis solventes.

Tabela 5: Densidades de líquidos orgânicos usados em ensaios de afunda-flutua.

Nome	Fórmula química	Densidade relativa*	Sinônimos	Solventes
Tricloroetileno	CHCl.CCl ₂	1,46		Álcool etílico
Tetraclorometano	CCl ₄	1,59	Tetracloroeto de carbono	Benzeno
Tetracloroetileno	CCl ₂ CCl ₂	1,62	Percloroetileno	
Pentacloroetano	CCl ₃ CHCl ₂	1,67		
Triclorobromometano	CCl ₃ Br	2,00		
Dibrometileno	CH ₂ BrCH ₂ Br	2,17	Etileno dibrometo	
Iodeto de metila	CH ₃ I	2,28		
Dibromometano	CH ₂ Br ₂	2,59	Brometo de metileno	Éter etílico ou álcool etílico
Tribromofluormetano	CBr ₃ F	2,75		
Tribromometano	CHBr ₃	2,89	Bromofórmio	Tetracloroeto de carbono, álcool etílico
Tetrabromoetano	CHBr ₂ CHBr ₂	2,96	Tetrabrometo de acetileno, tetracloroetileno, tetrabromoacetileno	Tetracloroeto de carbono, benzeno, éter etílico, acetona, álcool etílico
Diiodometano,	CH ₂ I ₂	3,31	Iodeto de metileno, iodofórmio	Trietil ortofosfato, acetona, tetracloroeto de carbono, benzeno
Solução de Clérics**	CH ₂ (COOTI) ₂ e HCOOTI	4,20	Mistura de malonato de tálio e formato de tálio	

Fonte: Modificado de SAMPAIO &TAVARES (2005).

*A 25 °C em relação à água a 4 °C – ela irá variar de acordo com a pureza do reagente.

Ainda referente a esta temática, é possível obter líquidos com qualquer densidade intermediária entre os compostos, através de misturas com determinados solventes.

Tabela 6: Densidades de alguns solventes usados em ensaios de afunda-flutua (a 25 °C)

Composto	Fórmula química	Densidade relativa
Água	H ₂ O	1,00
Dimetil formamida	HCON(CH ₃) ₂	0,95
Benzeno (Xilol)	C ₆ H ₆	0,88
Tolueno	C ₆ H ₅ .CH ₃	0,87
Álcool etílico (etanol)	CH ₃ CH ₂ OH	0,79
Acetona (propanona)	CH ₃ COCH ₃	0,79
Álcool metílico (metanol)	CH ₃ OH	0,79
Éter	(CH ₃ CH ₂) ₂ O	0,71

Fonte: (PERRY & GREEN, *apud* SAMPAIO & TAVARES (2005).

2.3. Jigagem

Nos primórdios da mineração, o minério moído misturado com água sob agitação já revelava que as partículas mais pesadas concentravam-se no fundo desses recipientes. Posteriormente, descobriu-se que o recipiente com fundo poroso, dotado de pulsação ascendente e descendente, produziria uma separação mais eficiente e rápida, nascia, então, a jigagem (SAMPAIO, *et al*, 2008).

A jigagem é um processo de separação hidráulica que consiste da repetida expansão e contração vertical de um leito de partículas pelo movimento pulsante de água ou a ar este último foco da presente pesquisa. O resultado desse movimento é a estratificação do leito, onde se tem a separação dos materiais por densidade em ordem crescente do topo à base (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

Hoje, o jigage é utilizado com sucesso na pré-lavagem de minérios. O equipamento possui construção barata, além de operação e manutenção relativamente simples. Há no mercado uma variedade em tamanho e formas de jigues que são usados nos estudos de concentração de minérios. Esses equipamentos, como a maioria em tratamento de minérios, possuem limitações na concentração de minérios com granulometrias finas (SAMPAIO, *et al*, 2008).

É um processo de separação hidráulica que consiste da repetida expansão (dilatação) e contração (compactação) vertical de um leito de partículas pelo

movimento pulsante da água ou ar. O resultado é a estratificação do leito, que corresponde à separação das partículas em camadas ou estratos de densidades crescentes desde o topo até a base. Jigues foram e continuam sendo amplamente usados principalmente devido aos seus custos.

Além de apresentar baixo custo operacional, jigues são robustos, têm elevada capacidade, são de simples operação e admitem alimentação com granulometria relativamente ampla, o que permite simplificar o fluxograma de beneficiamento. Se comparados a outros separadores, jigues apresentam uma maior capacidade de absorver grandes flutuações de teor do minério, taxa de alimentação e percentagem de sólidos, sendo, por isso, especialmente adequados nas operações de beneficiamento de minérios aluvionares (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

Mesmo sendo um equipamento antigo não existe uma teoria que o descreva de forma quantitativa. Mesmo assim, duas teorias explicam vários aspectos da estratificação vertical na jigagem e vários modelos têm sido desenvolvidos com o intuito de utilização de técnicas de simulação numérica. Entretanto, nenhum destes modelos representa fielmente todas as condições do processo.

2.3.1 Teoria da jigagem

Não existe ainda uma teoria quantitativa que explique a jigagem em todos os seus âmbitos, mesmo o equipamento sendo de grande relevância no tratamento de minérios. Ainda assim, existem pelo menos duas teorias que explicam vários aspectos da estratificação vertical na jigagem.

Uma delas, a teoria hidrodinâmica, tenta descrever a jigagem a partir do comportamento de partículas individuais no fluido, enquanto a outra, a teoria da energia potencial, descreve o comportamento do leito como um todo (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

Teoria hidrodinâmica da jigagem segundo SAMPAIO & TAVARES (2005) a teoria hidrodinâmica clássica considera inicialmente o movimento de uma partícula individual no leito do jigue e, então, relaciona ao movimento de todas as partículas em conjunto, sendo que a estratificação das partículas ocorre devido a três mecanismos:

- Sedimentação retardada diferencial;

- Aceleração diferencial no início da queda;
- Consolidação intersticial das partículas durante a sucção.

Sedimentação retardada diferencial: Uma partícula em sedimentação livre é acelerada em certo período pela ação da gravidade, aumentando sua velocidade até alcançar a velocidade terminal (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

Consolidação Intersticial: A consolidação intersticial ocorre quando as partículas finas continuam a se sedimentar nos interstícios das partículas grosseiras que se depositaram primeiro. Este mecanismo foi proposto originalmente por GAUDIM (1939) e é importante na jigagem, pois explica como a recuperação de partículas finas no produto denso aumenta com uma etapa de sucção mais intensa.

O tamanho máximo de partículas capaz de passar pelos interstícios deixados por partículas esféricas, posicionadas em um arranjo compacto, o qual é igual a 0,41 vezes o diâmetro das esferas que formam o leito (TAGGART, 1945; BURT, 1984).

No caso do jigue este fenômeno é de grande importância, pois, uma vez empacotado o leito, formando uma estrutura semelhante a um meio filtrante, o fluido continua atravessando o leito, carregando os finos arrastados. Este efeito é muito mais significativo que a simples percolação dos finos através do leito de grossos pelo efeito da gravidade observado em diversos outros equipamentos de concentração gravimétrica (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

2.3.2 Tipos de jigues

Uma vez que os princípios básicos de operação dos diferentes tipos de jigues são essencialmente os mesmos, as diferenças entre os vários tipos estão normalmente associadas apenas a diferenças na geometria da arca, no sistema de acionamento empregado, na forma de transporte do material e descarga dos produtos, bem como nos sistemas de controle adotados (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

Tabela 7: Tipos de jigues.

Condição do crivo	Mecanismo de pulsação	Separação dos produtos	Tipo	Aplicações comuns
Crivo fixo	Mecânico pistão	Sobre o crivo	Harz	Carvão
		Através do crivo	COOLEY, COLLOM	Minérios
			Centrífugo (<i>Kelsey e Altair</i>)	Minérios
	Mecânico-Diafragma	Sobre crivo	<i>Bendelari</i>	Minérios
			<i>JEFFREY</i>	Carvão
		Através do crivo	<i>Denver</i>	Minérios
			<i>Wemco/Remer</i>	Minérios
			<i>Yuba</i>	Minérios
			<i>Pan-American Placer</i>	Minérios
			<i>IHC</i>	Minérios
	Pneumático	Sobre crivo	Baum (McNALLY, ALLJIG) ALLAIR	Carvão, Minérios
			<i>Batac/Tacub (KHD, APIC. KOPEX)</i>	Carvão, minérios, materiais secundários
Através do crivo		<i>Feldspato (KHD)</i>	Carvão	
Crivo Móvel	Mecânico	Sobre crivo	<i>HALKYN, JAMES</i>	Minérios
			<i>WILMOTPAN</i>	Carvão
			<i>Jigue de Rom (KHD)</i>	Carvão
		Através do crivo	<i>Hancock</i>	Minérios
			Pressurizado (IPJ)	Minérios

Fonte: Adaptado de SAMPAIO & TAVARES (2005)

2.3.3 Jigues Baum (ALLAIR) pneumático

O jigue pneumático é um equipamento em escala de planta-piloto usado para concentração de material particulado grosseiro, minérios e carvões.

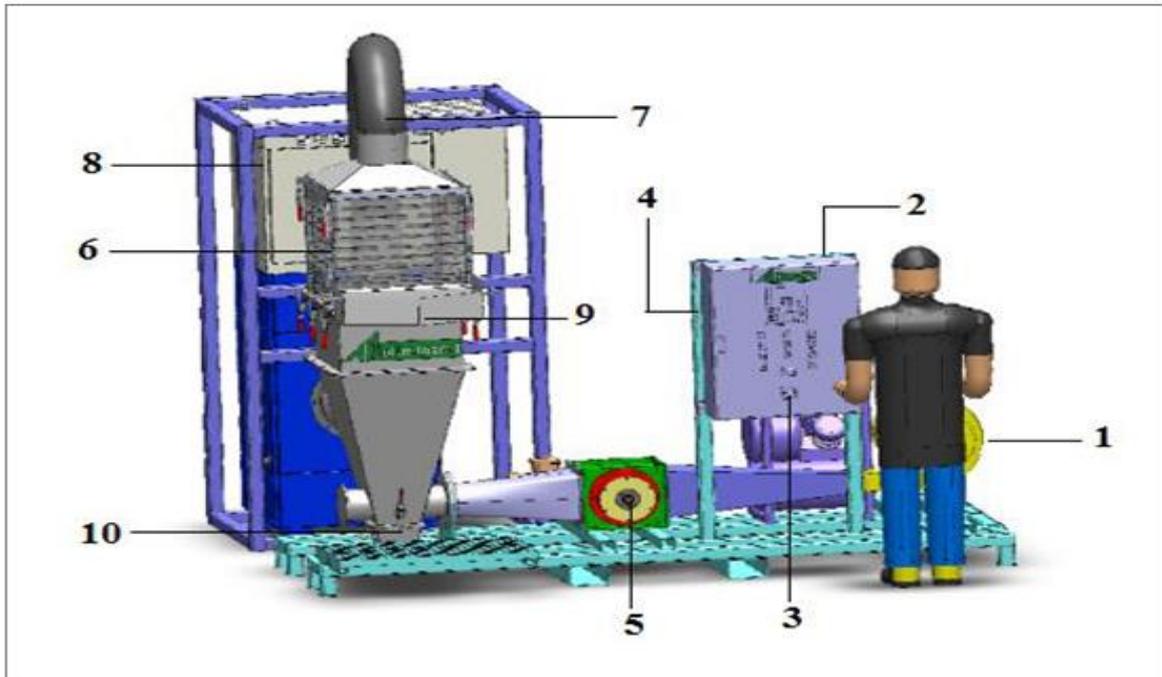


Figura 2: Principais componentes do jique pneumático a escala piloto
 Fonte: Adaptado de AMBRÓS (2014)

Tabela 8: Componentes básicos de um jique pneumático a escala piloto

REF	ITENS	REF	ITENS
1	Ventilador centrífugo	6	Câmara de estratificação
2	Quadro de comando	7	Bocal de exaustão
3	Chave geral	8	Filtro de mangas
4	Fieldlogger	9	Coletor da câmara
5	Válvula rotativa	10	Coletor de fundo

Fonte: Adaptado de AMBRÓS (2014)

2.3.4 Princípio de funcionamento

O jique pneumático utiliza a técnica de jigagem para concentração de sólidos particulados. A jigagem é um processo de separação gravimétrica que consiste da repetida expansão (dilatação) e contração (compactação) vertical de um leito de partículas pelo movimento pulsante de um meio fluido, no caso, o ar. O resultado é a estratificação do leito, que corresponde na separação das partículas em camadas ou estratos de densidades crescentes desde o topo até a base.

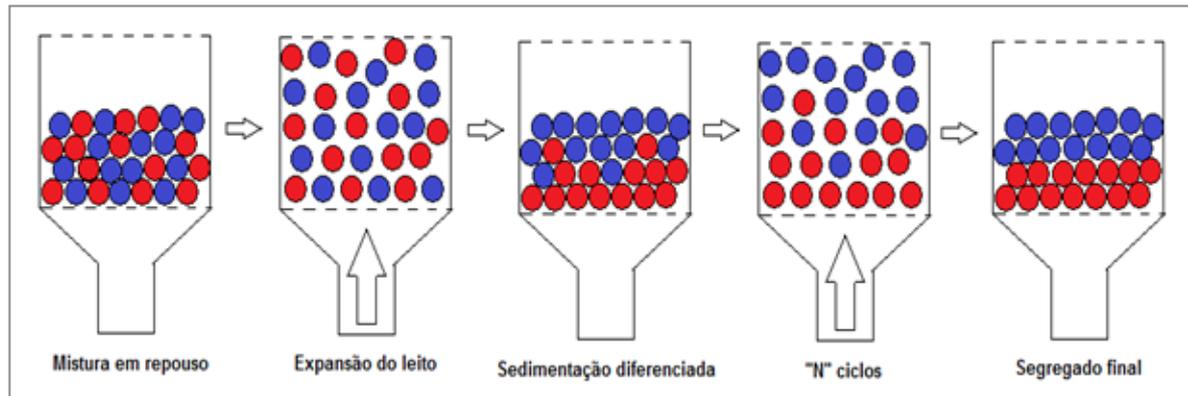


Figura 3: Processo de estratificação do leito no jigge a ar

Fonte: Adaptado de AMBRÓS (2014)

Este tipo de equipamento foi desenvolvido e patenteado pela companhia mineral *ALLMINERALS*. Este está baseado no princípio de que uma maior gama de variações do ciclo de jigagem pode ser obtida pelo uso de ar comprimido nas pulsações do que usando dispositivos mecânicos. Este jigge encontrou enorme aplicação no beneficiamento de carvão, especialmente devido à sua alta capacidade em comparação ao jigge *Harz*. Particularmente para os produtores de carvão, o *allair*® representa uma inovação única em matéria de produtividade e qualidade. *ALLMINERALS* (2018).

Usando este tipo de equipamento pode-se gerar produtos comercializáveis no possível menor custo usando um processo seco. Assim, carvão que não poderia ser utilizado anteriormente devido ao seu teor de cinzas ou enxofre pode agora ser eficientemente processado usando o *allair*® sistema.

No jigge pneumático, uma câmara de ar vedada posicionada acima do compartimento é acoplada a uma válvula de ar que, por sua vez, é conectada a um suprimento de ar comprimido. Válvulas de diferentes tipos são empregados, podendo ser tanto do tipo de pistão operados por um excêntrico, quanto uma válvula rotativa *SAMPAIO apud AMBRÓS* (2017).

O ponto chave da operação do jigge Baum está no controle da válvula de controle de admissão e exaustão de ar. No início do ciclo de jigagem a válvula é aberta para a admissão de ar (a pressões da ordem de 10-15 kPa), produzindo um rápido movimento ascendente da água.

No instante de fechamento da válvula, o ar continua a expandir, dissipando a sua pressão e permitindo que a água continue a subir através do crivo. À medida que a válvula continua a girar, o ar é descarregado para a atmosfera a uma taxa controlada, de maneira que as partículas contidas no leite começam a sedimentar, somente sob a ação da gravidade. Assim, a separação ocorre principalmente pela sedimentação retardada diferencial, sendo a percolação intersticial suprimida (SAMPAIO *apud* BURT, 1984).

2.3.5 Variáveis operacionais de um jig

Segundo BURT (1984), embora ainda exista muita controvérsia sobre o ciclo de jigagem ideal, algumas observações de caráter geral podem ser feitas:

- O ciclo de jigagem deve ser ajustado de maneira que o leite expanda durante o golpe de impulsão (porém não em demasia, de maneira que as partículas não sedimentem livremente, pois isso prejudicaria a separação com relação à densidade) e retorne totalmente ao repouso no crivo antes do final da etapa de sucção, permitindo a ação do mecanismo de consolidação intersticial;
- Quanto mais tempo o fluido permanece parado na sua posição mais alta (final da impulsão), maior é a oportunidade que as partículas atinjam dispersão e sedimentem de acordo com a sua velocidade terminal e maior o efeito do mecanismo da sedimentação retardada diferencial;
- Quanto maiores for às velocidades do fluido e mais prolongada a etapa de sucção, mais acentuado será o efeito da consolidação intersticial. Uma ação excessiva deste mecanismo pode fazer com que o produto denso seja contaminado com partículas finas leves;
- Quanto maior a densidade do material a ser separado (minérios pesados ou carvões com alto teor de cinzas), maior será a velocidade do fluido durante o golpe de impulsão necessária para garantir que o leite seja disperso nesta etapa. Em jiges que empregam um ciclo senoidal, nos quais o aumento da velocidade é normalmente obtido com o auxílio da água de arca, menor será o efeito da etapa de sucção.

2.3.6. Amplitude e freqüência das pulsações

Ainda BURT (1984), afirma que de acordo com as características dos sólidos, estas podem influenciar diretamente a freqüência e a amplitude da jigagem. Quanto

maior a densidade do material contido do leite, maiores as freqüências e amplitudes na jigagem.

Adicionalmente, em leitos formados por partículas mais grossas ou que formam leitos compactos, a amplitude necessária é mais alta, com um correspondente aumento do período de pulsação (menor freqüência) como se ilustra na tabela 6.

Tabela 9: Intervalo típico de operação de diferentes tipos de jigues

Tipo de jigue	Tamanho de partícula (mm)	Amplitude (mm)	Frequência (c/min)
Baum	200-5	30-40	30-60
Câmara de ar sob o leite	100-0,5	30-60	40-60
	25-0,25	20-30	125-150
Diafragma	10-0,2	10-15	150-200

Fonte: BURT (1984)

Por outro lado, a estratificação de material fino ou quando a espessura do leite é pequena, a amplitude requerida é menor, assim como o período (maior freqüência).

Durante o golpe de impulsão as partículas do leite devem se tornar suficientemente dispersas, e após o golpe o leite tem que retornar inteiramente ao repouso sobre o crivo antes do final da etapa de sucção, sendo assim o controle da freqüência e da amplitude devem ser ajustados cuidadosamente.

O ajuste inadequado dessas variáveis trará uma jigagem ineficiente. Se a freqüência for baixa, a velocidade do fluxo de fluido necessária para elevar e dispersar o leite, torna-se relativamente baixa e não haverá tempo suficiente para dispersar o leite. Assim, o volume de vazios nas partículas dispersas permanece baixo, exercendo uma influência negativa na altura absoluta de dispersão.

Quando a freqüência de jigagem for elevada significativamente, o leite é elevado a uma altura considerável, havendo assim um excesso na dispersão do leite SAMPAIO & TAVARES (2005).

2.3.7 Camada de fundo

A camada de fundo controla a taxa com que as partículas finas densas penetram e percolam através do leito e do crivo em direção ao fundo da arca. Em geral, as partículas da camada de fundo devem ser densas o suficiente para se depositar no fundo do leito, junto ao crivo, mas deve ser leve o suficiente para se dilatar durante a impulsão. O tamanho de partícula geralmente recomendado é de quatro vezes o top size das partículas a serem recuperadas (BURT, 1984).

Materiais usados incluem pelotas de aço, hematita e feldspato, dentre outros. Em geral, quanto mais densa e espessa for a camada de fundo, menor será a recuperação do produto denso e maior será a perda de partículas densas grossas no produto leve. Por outro lado, quanto mais grossas forem as partículas da camada de fundo, maior será a recuperação do produto denso.

2.3. 8 Granulometria da alimentação

O intervalo de tamanho de partículas processado em jigge depende do material e do tipo de equipamento. A ação dos mecanismos de separação que atuam na jiggagem faz com que a influência da granulometria na separação seja muito pequena, em comparação aos outros processos de concentração hidráulica.

Os jiggues são equipamentos robustos que possuem como principais vantagens: o baixo custo operacional:

- Alta capacidade produtiva;
- Simples operação;
- Admissão de alimentação com ampla diversidade granulométrica;
- Admissão de alimentação com amplos teores e percentagens.

Apesar de a jiggagem ser uma técnica antiga e de grande relevância, não existe ainda uma teoria quantitativa que a explique, mesmo através das duas teorias que explicam vários aspectos da estratificação vertical na jiggagem. Existem muitos tipos de jiggues e todos são compostos essencialmente pelos mesmos elementos básicos: A arca, que dá suporte ao equipamento, o crivo, responsável pela sustentação do

leito de partículas, onde ocorre a estratificação, o acionamento, responsável pela geração das pulsações do fluido.

Para líquidos ideais, cujos volumes são aditivos, a fração volumétrica do líquido denso necessária para adição em uma mistura (C_v), a fim de obter uma mistura com densidade ρ_f , é dado por Equação (1)

$$\rho_f = \rho_{solv} + C_v(\rho_{den} - \rho_{solv}), \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo ρ_{den} a densidade do líquido denso, ρ_{solv} a densidade do solvente e C_v a fração volumétrica do líquido denso usado. Alternativamente, pode-se calcular a fração mássica de líquido denso na mistura (C_m) por Eq. (2).

$$\frac{1}{\rho_f} = \frac{C_m}{\rho_{den}} + \frac{1 - C_m}{\rho_{solv}}. \quad (\text{Eq. 2})$$

É recomendável que a densidade da mistura seja sempre verificada, com a utilização de densímetros ou picnômetros.

2.4 Bacia carbonífera de Moatize

2.4. 1 Localização da área de estudo, Superfície e População

A bacia de Moatize fica localizada no distrito de Moatize, província de Tete-Moçambique.

A partir do ano 2007, Moatize passou a receber significativos contingentes humanos vindos de quase todo o mundo, com o princípio da construção das primeiras infra-estruturas e da base logística para garantir a exploração e exportação de carvão mineral de Moatize.

Num universo de 27.909.798 de habitantes de Moçambique, a população de Moatize é jovem, estimada em 343.546 habitantes, majoritariamente feminina num total de 176.743 correspondendo a 51,45%, e uma taxa de masculinidade de 48.55% correspondente a 166.803 homens e uma taxa de urbanização estimada em 23% (IV RGPH-INE, 2017).

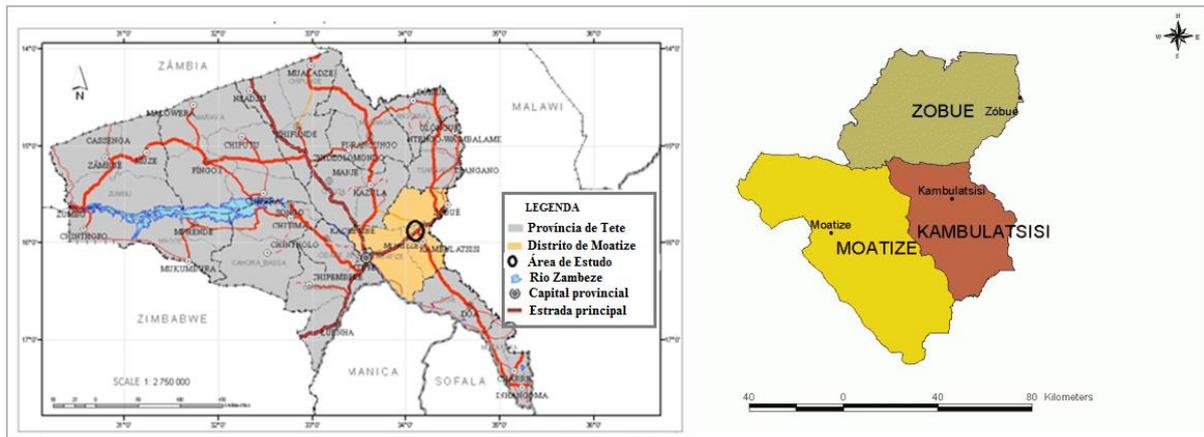


Figura 4: Mapa de localização do Distrito de Moatize (esq.); Figura 5: Mapa de Divisão Administrativa de Moatize (dir.).

Fonte: Adaptado de DINAGECA (2014)

2.4.2 Geologia local

A geologia da bacia de Moatize distingue-se pela ocorrência de importantes jazidas anteriormente mencionadas. As jazidas de carvão cobrem uma extensa área que vai desde Chingodzi ao rio Mecombedzi. Portanto, essa extensa área compõe a Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova, a maior e, mais importante reserva de carvão mineral no país, cujas quantidades são estimadas em aproximadamente 2,5 bilhões de toneladas (MAE, 2005).

VASCONCELOS (2005) destaca que a geologia da bacia de Moatize é dominada por uma sequência de sedimentos contendo carvão da era do Karoo, da era do Baixo ao Médio Ecca, consistindo predominantemente de Argilitos, Lodolitos, Siltitos e Arenitos com Grés arcósicos ocasionais em alternância. Esta sequência de sedimentos está contida numa extensa bacia com falhas descendentes criada pelas tectônicas primordiais do Vale do *Rift*.

2.4.3 Base rochosa

As rochas mais expostas dentro da área da licença são granitos gnáissicos e rochas gabróicas pertencentes aos complexos de bases rochosas na base da bacia do Karoo. Os afloramentos da base rochosa estão confinados ao canto do extremo Nordeste da área do projeto, onde terminam contra sedimentos mais jovens na linha de uma falha principal, torcendo para baixo, para Sudoeste SRK (2010).

2.4.4 Série produtiva

De acordo com relatórios da GTK-1636 e 1534 de (2006), indicam que a porção inferior contém unidades de argilitos e siltitos. Encontram-se amplamente expostos

argilitos carbonosos na secção central da área do Projeto, particularmente dentro do canal do Rio Murrongozi.

Segundo JOSÉ & SAMPAIO (2011), indicam que geologicamente a região do depósito de carvão de Moatize é constituída por rochas de origem sedimentar, tais como, siltitos e arenitos que correspondem as litologias da rocha estéril. O minério é composto por três camadas horizontalizadas principalmente de carvão com a seguinte nomenclatura: a Bananeiras, a Chipanga e a camada Souza Pinto, sendo apresentadas da camada mais rasa, para a mais profunda.

VASCONCELOS (2005) refere que a série produtiva afirmou que ela 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.

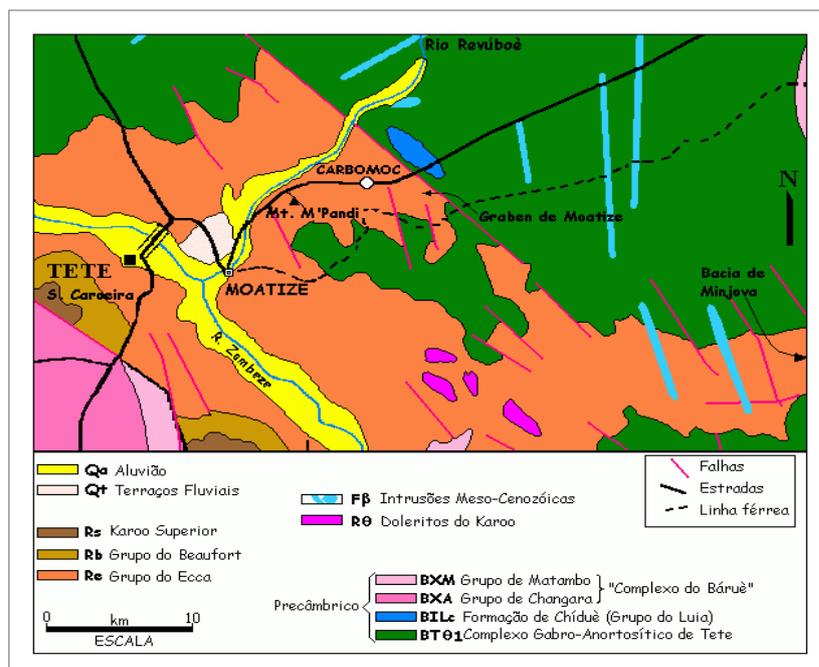


Figura 6: Mapa geológico regional simplificado da bacia de Moatize
Fonte: VASCONCELOS (2005)

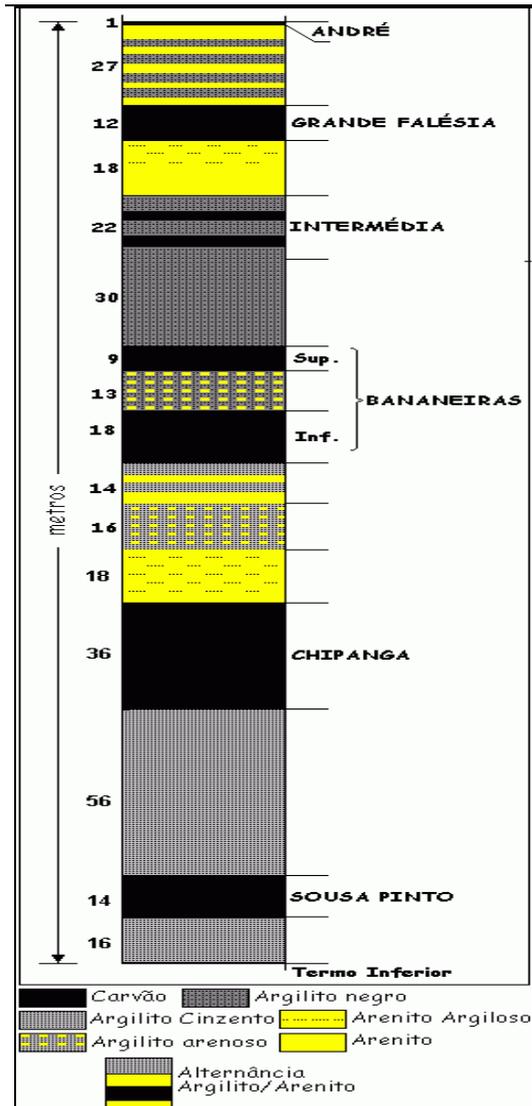


Figura 7: Série produtiva da bacia de Moatize.

Fonte: VASCONCELOS (2005).

2.4.5 Estratigrafia, da camada Chipanga

A VALE (Cia-2015) divide a camada Chipanga em quatro subcamadas denominadas UCT, UCB, MLCU e LC 45/6, por ordem de profundidade, da superfície para baixo. Por razões operacionais as quatro camadas anteriormente mencionadas são agrupadas resultando as seguintes UCS, MCS e LCS. (ver figura 8).

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

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

A partir do modelamento realizado foi possível verificar intensa atividade geológica nas camadas de carvão de Moatize. Na série produtiva são conhecidas seis camadas de diferentes espessuras e designadas a partir de cima para baixo:

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

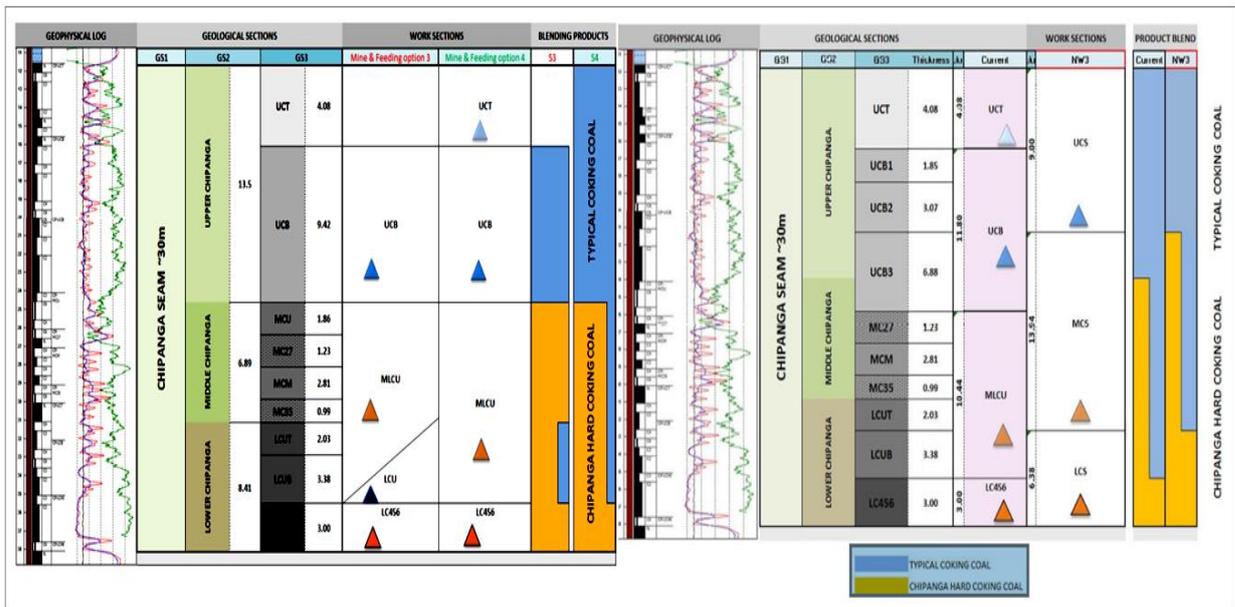


Figura 8: Antigas e novas nomenclaturas da camada Chipanga.

Fonte: VALE (2015)

2.4.6 Principais bacias e sub-bacias carboníferas de Moatize

A bacia de Moatize tem sido uma das regiões moçambicanas em que se têm visto esperanças pela existência de recursos minerais importantes. Como conseqüência desta perspectiva, tem sido direcionado um maior número de estudos geológicos, quer sistemático, quer localizado com o objetivo de reconhecimento de determinadas mineralizações e jazidas, e posteriormente a sua avaliação econômica das mesmas.

Estudos recentemente apresentados por HATTON & FARDEL (2012), sobre as bacias de carvão de Moatize, revelam que a rede de bacias carboníferas não exploradas do mundo se encontram na província de Tete e a geologia nelas corrente referem que, para além destes campos de Moatize, estima-se a existência de outras sub bacias a escassos quilómetros a Oeste de Moatize como o caso dos depósitos de “Mucanha-Vúzi” (reservas estimadas maiores de três bilhões de toneladas) e de “Senâgoe” (reservas maiores que um bilhão de toneladas).

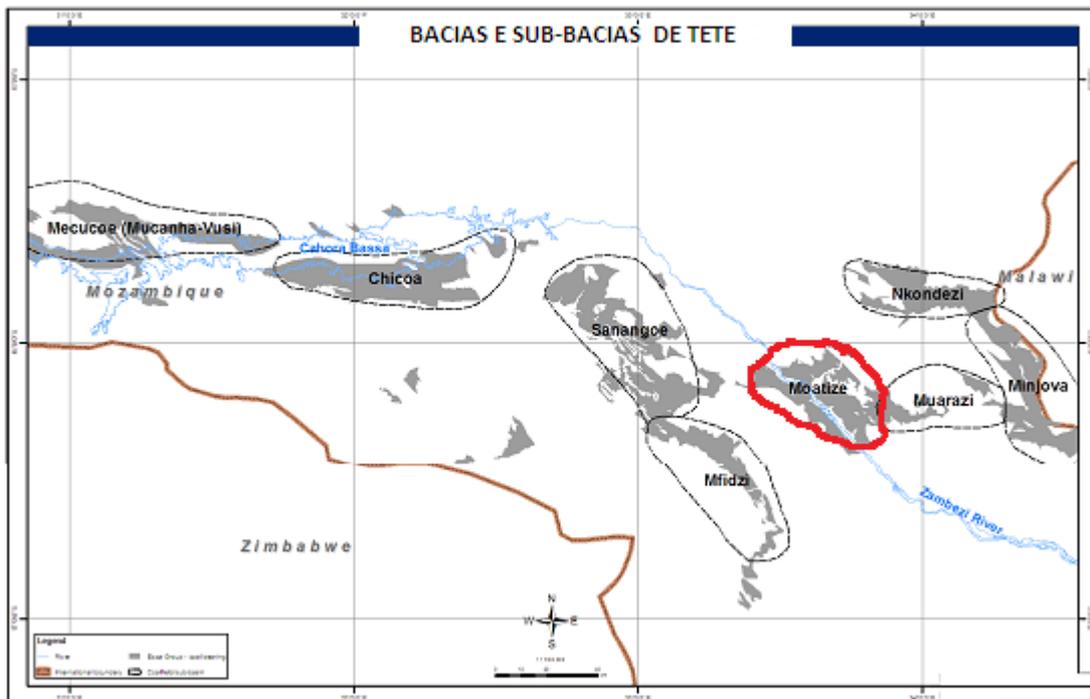


Figura 9: Bacias e sub-bacias de Moatize
Fonte: RMR, Lda (2012)

2.5 Usina de beneficiamento de Moatize

O objetivo do beneficiamento é separar o material valioso, contido no mineral, daquilo que não tem utilidade: as impurezas, também chamadas de ganga no vocabulário da mineração. Além de promover essa “limpeza” no minério, máquinas e equipamentos entram em ação para deixá-lo com tamanho compatível com as demandas do mercado consumidor.

A caracterização fornece subsídios para a definição dos processos aos quais os minérios devem ser submetidos para possibilitar a sua utilização. Nesta etapa, estudos feitos em laboratório analisam, além do mineral valioso, os vários elementos que constituem a rocha, assim como a textura, a granulometria e a densidade do material, ou seja, as propriedades responsáveis pelo comportamento do minério ao passar pelos processos de beneficiamento.

Os principais parâmetros de beneficiamento podem ser destacados os seguintes:

a) Análise granulométrica; b) Descrição qualitativa e quantitativa; c) Composição química; d) Tamanho de liberação e Índice de moabilidade.

2.5.1 Operações unitárias do Fluxograma de beneficiamento de Moatize-I

As operações unitárias são etapas essenciais do fluxograma do beneficiamento mineral, constituído pela combinação adequada dessas operações. Os processos de beneficiamento mineral têm importância vital para a indústria de mineração, uma vez que constituem uma etapa, quase sempre, necessária para o aproveitamento dos minérios. Assim como numa orquestra sinfônica, quando os instrumentos são afinados isoladamente, as operações são avaliadas, ou mesmo testadas, separadamente.

Em seguida, faz-se uma análise de um fluxograma do beneficiamento da usina beneficiamento de Moatize-I. As operações possuem características próprias em cada caso, cujo inter-relacionamento forma o beneficiamento.

Essas operações unitárias são de duas naturezas distintas: fragmentação e separação. Em tempo: em alguns casos, os minérios podem passar por todas as etapas, ou até repetir um mesmo processo. Por exemplo: quando há necessidade de mais de uma etapa de fragmentação para atingir a granulometria desejada do material. A seguir são descritas as principais operações unitárias da usina de beneficiamento de (Moatize- I) VALE (2015).

A usina de beneficiamento instalada na Planta I (Moatize-I) apresenta em seus processos divididos em quatro módulos fundamentais, a saber: a) Planta de britagem; b) Circuito de finos; c) Circuito de grosso e, d) Desaguamento.

Na industrial beneficia o carvão mineral *rum of mine* (carvão bruto). Nesse processo de beneficiamento são produzidos dois principais produtos: a) Carvão metalúrgico com 10,5% de teores de cinzas e 10% de umidade; b) Carvão térmico com um teor de cinzas entre 20-24,9%.

Essa unidade de beneficiamento tem uma capacidade nominal de 4000 t/h, estando constituída por quatro módulos *Dmc*, espiral e circuito de flotação projetada para receber 1000 t/h de carvão *ROM*.

A unidade de transformação consiste em carvão bruto que sai da Mina com uma granulometria de 1200 mm que é encaminhado para a britagem primária (britadores de rolos dentados), o material britado é reduzido em até 250 mm. O Carvão que sai da britagem primária segue para a britagem secundária (britadores de rolos

dentados) onde é reduzido em até 125 mm. O Carvão que sai da britagem secundária é submetido a um processo de classificação em peneiras de 50 mm. O *oversize* (+50 mm) segue a britagem terciária (britador a rolos lisos), enquanto que o *undersize* (-50 mm) se junta com o carvão da britagem terciária (-50 mm) seguindo assim para o CHPP antecedido por um detector de metal.

Para que haja a separação de minerais é necessário que exista uma diferença física ou físico-química entre o mineral de interesse e os demais e os métodos de concentração podem ser classificados de acordo com a propriedade diferenciadora do método. WILLS (2006).

Separação magnética: a propriedade determinante nesse processo é a suscetibilidade magnética. Baseado nesse fato, os minerais podem ser divididos em três grupos, de acordo com o seu comportamento quando submetidos a um campo magnético: ferromagnéticos (fortemente atraídos pelo campo magnético), paramagnéticos (fracamente atraídos pelo campo magnético) e diamagnéticos (repelidos pelo campo magnético). Os equipamentos mais utilizados são os tambores, correias, rolos, carrosséis e filtros.

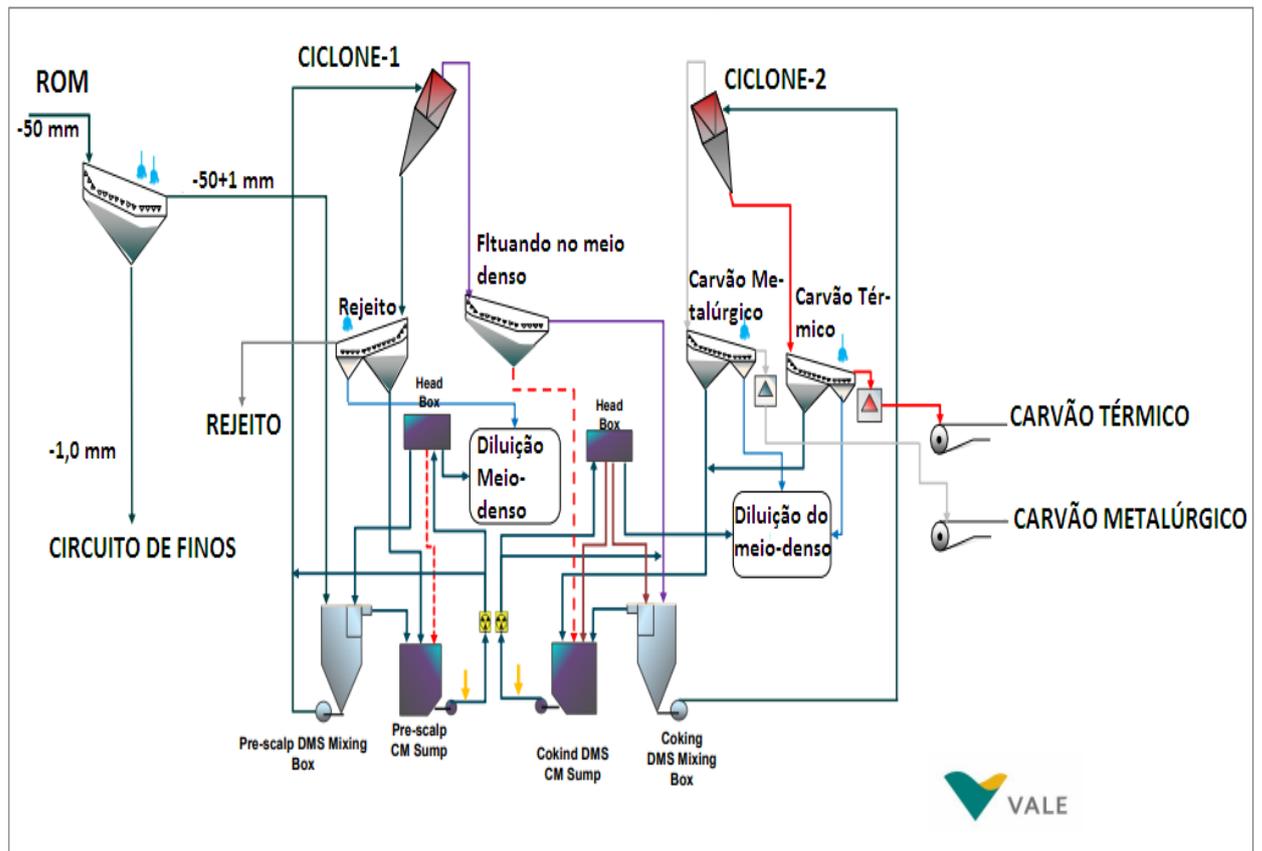


Figura 10: Fluxograma geral de circuito de beneficiamento dos grossos (Moatize-I)
Fonte: VALE (2015)

O fluxograma da figura 8, euclida a rota de beneficiamento dos grossos pela planta de beneficiamento da Mina de Moatize (Moatize -I), objeto de estudo deste trabalho.

De acordo com o fluxograma pode-se atestar que o carvão com a granulometria +50 mm é britado em seguida peneirado. Onde a granulometria 50x1 mm é alimentado ao ciclone de meio denso I com um corte densimétrico de 1,6 g/cm³. Neste ciclone 50% de massa sai como rejeito com um teor estimado de 40-60% de teores de cinzas. O outro 50% de massa segue para o segundo ciclone onde é realizado o corte de 1,3 g/cm³ obtendo-se assim dois produtos.

1. 30% de massa constituída por carvão térmico produto usado para a queima (Produção de energia elétrica nas termelétricas) contendo aproximadamente 20 a 24% de teores de cinzas.

2. 20% de massa é de carvão metalúrgico destinado para as indústrias sedurúrgicas com um teor inferior a 10% de teores de cinzas.

As frações inferiores que 50x1 mm, são também dadas suas rotas específicas isto é para os correspondentes módulos ou circuitos de tratamento para a obtenção de produtos finas. A granulometria de 1x0,25 mm é direcionado para espirais , enquanto que a granulometria de - 0,25 mm é destinada para o módulo de flotação.

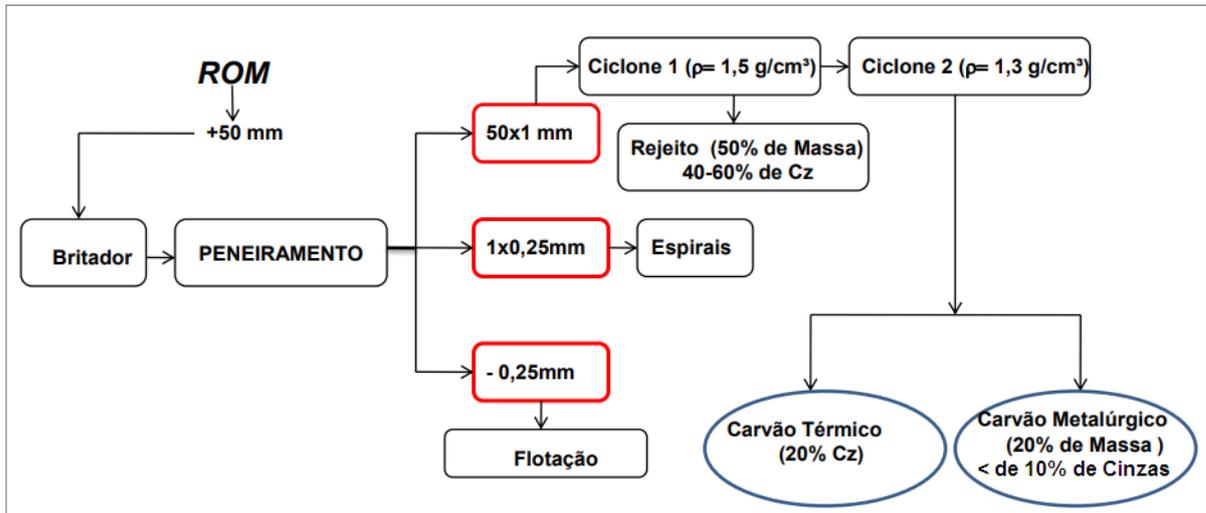


Figura 11: Fluxograma simplificado do circuito de beneficiamento dos grossos (Moatize-I)
Fonte: O Pesquisador

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a presente pesquisa, foram usadas amostras de carvão ROM das camadas UCT, UCB, MLCU e LC45/6 de Moatize. Bégueres (para colocação de amostras no proceso de afunda-flutua), papel filtro, diferentes líquidos densos, moinho vibratório para a moagem de amostras, peneiras de tamanho 50,8 mm, 1 mm e 0,25, cadinhos, e fornos Deleo, mufla para análises imediatas e elementar, capelas para a secagem das amostras, balanças analíticas, quarteadores de bancada, manual e Jones.

3.2 Metodologia

3.2.1 Identificação, preparação e padrões das amostras da alimentação

As amostras utilizadas para o presente trabalho são da camada Chipanga correspondentes às suas subcamadas designadamente por (**UCT, UCB, MLCU e LC 45/6**) respectivamente. As mesmas como já foi referenciado anteriormente, foram coletadas na Mina da Vale-Moatize, Tete-Moçambique

Depois de uma observância de todos os procedimentos de segurança, as amostras foram colocadas em tonéis e enviadas para o Brasil via marítima. Uma vez chegado no Brasil, no LAPROM-LTM, os tonéis foram catalogados de acordo com o tipo de carvão contido nele (*ROM* - alimentação, Metalúrgico (coqueificável), Térmico (Rejeitos grossos/finos)

3.3 Etapas

3.3.1 Primeira etapa:

- ◆ Foi feito um levantamento da literatura relacionada com a fundamentação teórica, revisão da literatura relacionada com os principais tópicos como: características geológicas do carvão de Moçambique, da Província de Tete, e de Moatize em particular;

- ◆ Seleção do acervo bibliográfico como: (Livros, Teses e Dissertações, Mapas, Perfis, Esboços, Gráficos etc) relacionados com a temática em discussão.

- ◆ Identificação e preparação das amostras de carvão *ROM* das subcamadas da camada Chipanga;

- ◆ Foram realizadas, nesta etapa, reuniões técnicas regulares com os pesquisadores do LAPROM, LTM e os da Vale, com objetivo de harmonizar os aspectos técnicos.

- ◆ Para mais harmonização dos planos de trabalho, pesquisadores da UFRGS envolvidos no processo, realizaram visitas técnicas à Mina da Vale em Moatize.

3. 3.2 Segunda etapa:

- ◆ Foram caracterizadas as amostras quanto a sua granulometria;
- ◆ Foram preparadas as amostras em duas granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm (tamanho da partícula).

3. 3.3 Terceira etapa: Caracterização para o beneficiamento

Nesta etapa foi o começo da realização da caracterização propriamente dita das amostras, onde:

- ◆ Foram realizados ensaios de afunda-flutua nas duas frações granulométricas da alimentação nas granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm, nas densidades (1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0 e 2,2 g/cm³) respectivamente;

- ◆ Nesta etapa, foram executados também testes de jigagem;
- ◆ Os testes de jigagem foram executados na granulometria de 50x1mm (tamanho das partículas da alimentação da Mina da Vale de Moatize-I;

- ◆ Após a jigagem, foi realizado ensaio de afunda- flutua das amostras de cada leito em dois cortes densimétricos 1,6 g/cm³ e 2,2 g/cm³ para a obtenção de três produtos: flutuado em 1,6 g/cm³, flutuado em 2,2 g/cm³ e afundado em +2,2 g/cm³. O flutuando em 2,2 g/cm³ e o seu afundado, foram considerados como o rejeito e flutuado em 1,6 g/cm³ foi considerado como produto do processo de jigagem.

- ◆ Foram feitas análises petrográficas para determinar macerais e seus grupos para a devida delimitação do grau de evolução dos carvões, sua classificação quanto ao seu "*rank*";

- ◆ As análises petrográficas foram realizadas no Instituto de Geociências da UFRGS, no Departamento de Geologia;

♦ Com as análises realizadas nesta etapa, foram obtidos os resultados tendo sido traduzidos em (Gráficos, Tabelas, Curvas e Histogramas).

3.3.4 Quarta etapa

♦ Uma vez concluídas as etapas subseqüentes, iniciou-se a caracterização detalhada, análise, discussão e interpretação dos dados;

♦ Foram comparadas as características de todas as camadas nas frações granulométricas de 50x1 mm e 1x0,25 mm através de curvas de lavabilidade;

♦ Após a jigagem foi feita a pesagem dos leitos estratificados nas respectivas gavetas e seguidamente foi feita a pesagem das amostras para a determinação da massa obtida em cada um dos leitos e suas respectivas perdas;

♦ Foi calculada a recuperação mássica após a jigagem e realizado os ensaios de afunda-flutua; e finalmente foi feita a análise e interpretação dos resultados.

3. 4 Preparação das amostras

As amostras foram homogeneizadas e quarteadas manualmente. Os procedimentos de homogeneização e quarteamento podem ser testemunhados na figura 11. Devido à presença de umidade em alguns tonéis, as amostras foram secadas a temperatura ambiente.



Figura 12: Homogeneização das amostras (Esq.) Quarteamento das amostras (Dir)
Fonte: O Pesquisador

3.5 Caracterização das amostras

3.5.1 Classificação granulométrica

A classificação granulométrica consistiu na separação de amostras de acordo com seu tamanho. Com isso, pretendia-se obter uma granulometria pré-definida da alimentação da planta (50x1 mm), que é o tamanho padrão utilizado para alimentação da planta de beneficiamento depois da primeira britagem. Também definida a granulometria de 1x0,25 mm com o intuito de avaliar a liberação com relação a 50x1 mm.

A distribuição granulométrica foi feita em peneiras de malha quadrada com apoio do agitador mecânico instalado na sala de tratamento de minérios do LAPROM. Para a obtenção das granulometrias desejadas para ensaios de afunda-flutua nas granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm; as amostras de carvão foram devidamente separadas por tamanho por meio de peneira vibratória tendo sido usadas as peneiras com aberturas de 50,8 mm, 25,4 mm, 1,00 mm e 0,25 mm.

3.6 Caracterização densimétrica

Com relação à análise densimétrica, foram realizados os ensaios de afunda-flutua das amostras nas duas granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm, considerando a primeira granulometria como a alimentação padrão usada na Mina de Moatize e a segunda para fins comparativos quanto à recuperação mássica e teores de cinzas fundamentalmente.

As amostras abaixo de (0,25 mm), foram desconsideradas por serem partículas finas, normalmente usadas para processos físico-químicos de beneficiamento de carvão (flotação) o que não era objeto de estudo para este trabalho de Tese.

Para a realização dos ensaios de afunda-flutua foram utilizadas as misturas de líquidos orgânicos tais como: Benzeno-Xilol ($C_6 H_6$ - 0,9 g/cm³), Percloetileno (CCl_2 , Tetracloroetileno ($C_2 Cl_4$ - 1,6 g/cm³) e Bromofórmio ($CHBr_3$ - 2,9 g/cm³), nos intervalos densimétricos de (1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0 e 2,2 g/cm³).

Sabe-se, no entanto que os ensaios de separação em meio denso se dão pela mistura de líquidos orgânicos em diferentes proporções, com objetivo de se obter líquidos nas densidades desejadas.

Para o reajuste dos intervalos densimétricos para a realização do ensaio de afunda-flutua, foi usada a equação Eq. (3).

$$V_2 = \frac{V_1(d_1 - d_2)}{(d - d_2)} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

V_2 : Volume do líquido a acrescentar

V_1 : Volume do líquido a alterar

d_1 : Densidade do líquido a alterar

d_2 : Densidade do líquido a acrescentar

d : Nova densidade

A figura 12, demonstra um exemplo de como foi realizado o teste de afunda-flutua foi.

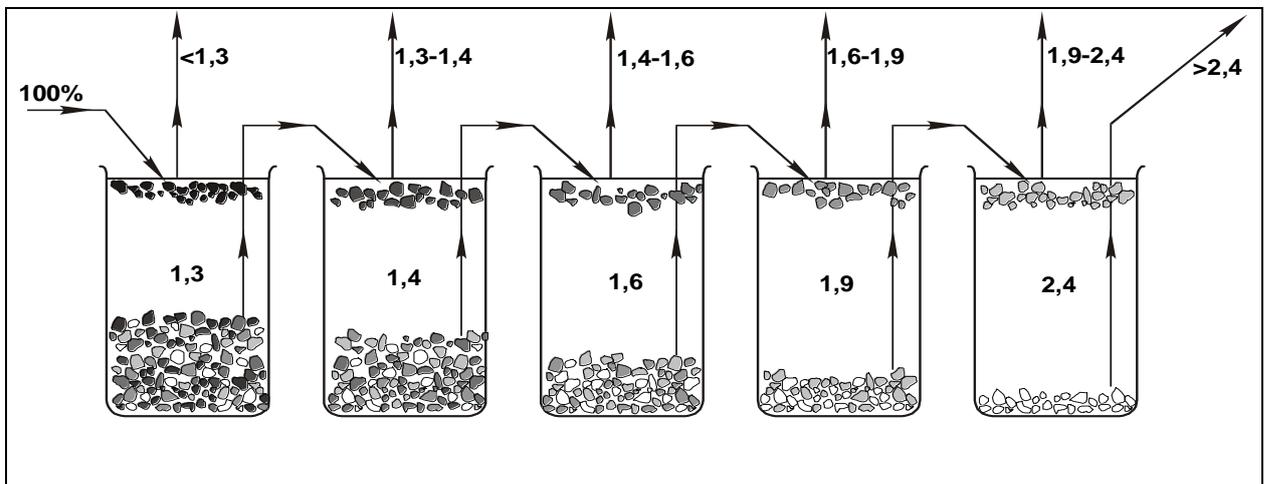


Figura 13: Exemplo prático de separação em meio denso de forma crescente

Fonte: SAMPAIO & TAVARES (2005)

3.6.1 Análises imediata e elementar

Para a fração a faixas granulométrica 50x1mm foram realizadas as análises imediatas e elementares. Enquanto que para a granulometria de 1x0,25 mm não foi feita análise elementar Foi realizada análise imediata, (Teores de Umidade, Teores de Cinzas e de Materiais Voláteis) usando as NBRs, isto é, para Umidade: ASTM: Associação Brasileira de Normas Técnicas- NBR 8293: Carvão Mineral; Determinação de Umidade de (1983). Para Teor de Cinzas: ASTM: Associação

Brasileira de Normas Técnicas- NBR 8289: Carvão Mineral; Determinação de Teor de cinzas (base seca) de (1983) e para teores de Materiais Voláteis: ASTM: Associação Brasileira de Normas Técnicas-NBR 8290: Carvão Mineral de (1983).

E para a análise elementar, caso do elemento (Enxofre Total), foi determinado usando (ASTM: Associação Brasileira de Normas Técnicas- D7166- Carvão Mineral de (2015)).

O Fluxograma da figura 13, elucida minuciosamente as principais etapas do processo de afunda-flutua. Todos os ensaios para a obtenção de dados foram realizados no Laboratório de Processamento Mineral, no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

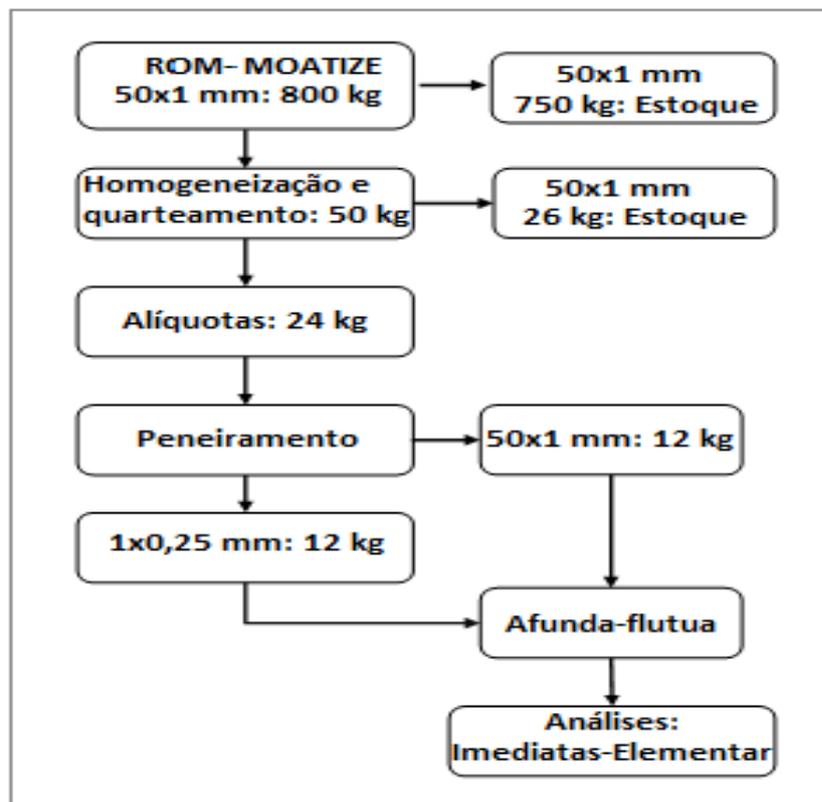


Figura 13: Fluxograma de caracterização do processo de afunda-flutua
Fonte: O Pesquisador

3.6.2 Descrição das fases

A seguir são descritas as fases do fluxograma representadas na figura 13:

♦ **Primeira fase:** De acordo com o tonel contendo as amostras, foram devidamente selecionados 800 kg de carvão ROM de cada uma das subcamadas em estudo.

♦ **Segunda fase:** As amostras foram homogeneizadas e quarteadas com objetivo de se retirar 50 kg de amostra (como alíquota) e os restantes 750 kg foram encaminhados para o estoque para estudos futuros.

♦ **Terceira fase:** Foram quarteadas 50 kg seguidamente peneiradas usando as peneiras com aberturas 50 mm, 1 mm e 0,25 mm onde foram obtidos 12 kg na fração de 50x1 mm e 12 kg na fração de 1x0,25 mm. Os restantes 26 kg da amostra na fração 50x1 mm foram estocados ou armazenados para estudos futuros. Como se fez menção, a fração 50x1 mm é o *top size* que é alimentação da planta de beneficiamento da Mina de Moatize. A faixa granulométrica de 1x0,25 mm foi para verificação da sua liberação em comparação com a faixa de 50x1 mm. Durante o processo de quarteamento foi usado o quarteador Jones Modelo 1260.

♦ **Quarta fase:** Esta fase foi caracterizada na realização da análise densitária, para as duas frações em nove cortes densimétricos começando em 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0 e 2,2 g/cm³ respectivamente.

♦ **Quinta fase:** Para as amostras menores, o quarteamento foi usado o quarteador de bancada. Para a moagem das mesmas, foi empregue o moinho vibratório (**VIBRO MILL-1 da Série 2523/09**); em seguida peneiradas na peneira de 60 mesh com a finalidade de obtenção de amostras menores que (0,25 mm) para a realização de análises imediatas e elementares.

As descrições detalhadas dos procedimentos da análise imediata são dadas a continuação:

3.6.3 Análises de umidade (U)

ASTM (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 8293: Carvão Mineral; Determinação de Umidade, (1983).

Metodologia: A umidade foi determinada secando-se as amostras a 105 °C em uma estufa mufla Jung DELEO durante 1 hora. A determinação da umidade de equilíbrio, para a obtenção da massa, foi medida um grama do carvão mineral abaixo de 60 mesh (-0,25 mm) num cadinho sem tampa em duplicata.

As amostras foram retiradas da estufa em duplicata, e colocadas num dessecador e deixadas esfriar a temperatura ambiente durante trinta minutos.

Posteriormente foram medidas novamente as massas com a mesma aproximação. Para o efeito, foi procedido o cálculo da umidade de equilíbrio usando a Eq. (4).

$$\%U = \frac{(m_1 - m_2)}{m} * 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

m_1 - massa de cadinho + massa de carvão antes da retirada de umidade na estufa

m_2 - massa de cadinho + massa de carvão depois de retirada da umidade.

m - massa da mostra (carvão).

3.6.4 Determinação de teor de cinza (CZ)

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

Metodologia: o percentual de teores de cinzas foi determinado a partir de amostras de carvão mineral moídas e peneiradas a baixo de 60 mesh (-0,25 mm) como se referiu anteriormente, medidas em um grama, em duplicata em cadinhos sem tampa. Esses percentuais foram determinados pela combustão do carvão mineral a uma temperatura de 800 °C, por 180 minutos no forno Jung Modelo 2312, fabrico brasileiro.

Terminada a incineração, foram retiradas do forno, e colocadas num dessecador por trinta minutos. Após o resfriamento, foram medidas as massas com a mesma aproximação inicial, e calculados os teores de cinzas pelas expressões representadas nas equações (5) e (6) respectivamente.

$$\% \text{ Cinzas (base úmida)} = \frac{m_2}{m_1} * 100 \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\% \text{ Cinzas (base seca)} = \frac{\% \text{ cinzas (base úmida)}}{100 - U_A} * 100 \quad \text{Eq. (6)}$$

m_1 , massa da amostra, em gramas

m_2 , massa do resíduo após a queima, em gramas

U_A : Percentagem da umidade da análise ou de higroscopia (Conforme NBR 8293)

3.6.5 Matéria volátil (MV)

ASTM (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 8290: Carvão Mineral; Determinação de Materiais Voláteis, (1983).

Metodologia: Para a determinação da percentagem da matéria volátil, as amostras foram medidas em um grama de carvão mineral em duplicatas seguidamente introduzidas no forno já aquecido a 950 °C. Foram introduzidas no forno Jung mantendo-se a porta parcialmente aberta para regular a temperatura em até 750 °C. A abertura parcial da porta é permitir a entrada de oxigênio. Posteriormente foram introduzidas no fundo do mesmo a uma temperatura de 950 °C durante 5 minutos. Foram esfriadas no dessecador por trinta minutos e pesadas novamente.

Os resultados foram calculados pelas expressões Matemáticas ilustradas pelas equações (7) e (8):

$$\%M.Volátil (base úmida) = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \right) - U_A \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\% M.Volátil(base seca) = \frac{\%M.V(base úmida)}{100 - U_A} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

m_1 : massa da amostra, em gramas

m_2 : massa do resíduo após o aquecimento, em gramas

U_A : Percentagem de umidade de análise ou de higroscopia (conforme NBR 8293)

3.6.6 Carbono fixo

A percentagem de carbono fixo é determinada por balanço de massas, isto é: a quantidade de matéria que não é volátil, nem mineral, nem umidade (NBR 8299). O seu valor é obtido pela soma dos resultados das análises imediatas subtraídos de 100, isto é:

$$CF = 100 - (\%Cinzas + \% Umidade + \% Materia volátil) \quad \text{Eq. (9)}$$

3.6.7 Determinação de enxofre total (S)

ASTM: Associação Brasileira de Normas Técnicas- (NBR-D7166): Carvão Mineral (2015). O elemento enxofre ocorre em carvão mineral em diferentes formas, na forma de sulfetos, enxofre orgânico, enxofre elementar e sulfato. O Enxofre nos

sulfetos é a forma mais comum e ocorre principalmente na forma de pirita (FeS_2). Para o presente trabalho, foi analisado o enxofre na sua forma total por cada corte densimétrico de $1,4 \text{ g/cm}^3$ a $2,2 \text{ g/cm}^3$ na granulometria 50x1 mm para todas as camadas.

Metodologia: As amostras de carvão mineral foram pesadas entre (0,20 a 0,25 gramas), abaixo de 60 mesh (-0,25 mm), colocadas nos cadinhos (barquinhos), em duplicata introduzidos no **LECO S-144 DR** durante três a cinco minutos a uma temperatura de $1340\text{-}1350 \text{ }^\circ\text{C}$ com ar de oxigênio aberto. Este tempo depende do percentual de enxofre existente na amostra. Uma vez incluídos os nomes do banco, padrão e amostras no programa LECO aberto no computador é feita a leitura automaticamente pelo computador ligado ao equipamento.

3. 6.8 Pesagens das amostras (g)

Para a pesagem das amostras para as análises de umidade, teor de cinzas, enxofre e teor de matérias voláteis foram usadas as balanças analíticas **SHIMADZU**, modelo AY220 cap. máx 220 g, mín 0,01 g, d= 0,1mg e **SHIMADZU**.

3.7 Elaboração de curvas de lavabilidade

Foram elaboradas as curvas de lavabilidade de **Henry Reinhardt**, (curvas dos flutuados, dos afundados, curva densimétrica e a curva de *NGM*). Estas, foram plotadas em função dos cortes densimétricos definidos para este estudo começando de $1,4 \text{ g/cm}^3$ até $2,2 \text{ g/cm}^3$.

As curvas de lavabilidade de **Henry Reinhardt** são importantes, pois nos permitem fazer uma visualização e interpretação dos parâmetros de recuperação mássica em cada faixa densimétrica, além do teor da densidade de corte e a separabilidade do carvão.

Para a realização das curvas densimétricas, foram usados os dados correspondentes aos cortes de densidade predefinidos de ($1,4 \text{ g/cm}^3$ a $2,2 \text{ g/cm}^3$) e o somatório das massas flutuadas obtidas em cada densidade de corte na fração definida

E as curvas de *NGM*, foram plotadas usando as densidades e os valores obtidos de *NGM* que resultaram da subtração das somatórias das massas, isto é, $NGM_1 = (A_3 - A_1)$. O *NGM* indica a possibilidade do carvão ser mais ou menos fácil de ser beneficiamento em um determinado corte densimétrico.

Para as curvas dos flutuados foram usados os valores da somatória das massas e a massa acumulada dos teores de cinzas; enquanto que para a curvas dos afundados foram usados os valores da somatória das massas e o teor de cinzas da massa acumulada; e finalmente, as curvas elementares foram traçadas a partir dos valores dos dados elementares.

3.8 Testes no jigue a ar

Para dar resposta ao tema que se propôs para este trabalho de Tese, foram realizados testes no jigue pneumático modelo **AllAir® S-500** instalado no LAPROM. Foram realizados vários testes no jigue para cada camada em estudo com o propósito de selecionar um para cada camada para a sua análise. Para tal, foram escolhidos aqueles que resultaram bons resultados. Para a caracterização tecnológica visando a pré-lavagem, foram alimentados no jigue por cada vez 51.6 kg de *ROM* para cada camada e usados os mesmos parâmetros operacionais. O jigue pneumático está estruturado para reproduzir em escala piloto o processo de estratificação por meio de operação em batelada, apresentando capacidade máxima de aproximadamente 100 kg (Ver figura 14).

Elementos do equipamento: O conjunto completo do jigue pneumático consiste de quatro elementos principais: unidade de alimentação de ar (1), sistema de controle e distribuição de ar (2), câmara de separação (3) e sistema coletor de poeira (4). Este equipamento visa de modo geral à realização de ensaios para a estratificação de leitos por densidade, isto é, separa os materiais por suas densidades. Esta é a primeira vez que se realiza estudo de gênero nessas modalidades para o carvão *ROM* de Moatize, objeto de estudo para o presente trabalho de Tese.



Figura 15: Jigue pneumático modelo AllAir® S-500. (a) Esquema geral (b) detalhe do compartimento de separação do jigue, dotado de gavetas sobrepostas de Plexiglass.
Fonte: Adaptado de AMBRÓS (2017)

3.8.1 Preparação do equipamento

Devido ao fato que o jigue pneumático opera com amostras de diferentes características físicas e granulométricas, devem ser observados certos cuidados durante a preparação do mesmo:

1. A tela perfurada que sustenta o leito do jigue deve ser selecionada de acordo com o menor tamanho de partícula da amostra;

2. O volume livre na câmara de estratificação deve ser suficiente para permitir que o ciclo de jigagem ocorra livremente;

3. A frequência de jigagem (pulsos por minuto) deve ser suficiente para provocar a dilatação do leito particulado, contudo, não deve ser demasiado alta a ponto de prejudicar a sedimentação das partículas;

4. Os quadros menores de 25 mm devem ser usados sempre que o tamanho de grão da amostra for menor que 10 mm. Se maiores, deve-se utilizar os quadros maiores que 50 mm. De qualquer modo, os quadros devem estar limpos de modo que a visibilidade do processo durante o ensaio não seja prejudicada. Este procedimento não é bem visível no carvão mineral devido à tonalidade máfica do mesmo (tonalidade escura);

5. A vedação de borracha dos quadros de acrílico sempre devem estar posicionadas para o lado de baixo. Neste estudo, foram feitos vários ensaios para cada camada, tendo sido selecionados quatro ensaios um para cada camada em estudo.

3.8.2 Preparação das amostras

A preparação da amostra para ensaios no jigue pneumático dependeu da conjugação do objetivo geral e dos específicos do presente trabalho de Tese. Nesse contexto, as amostras das subcamadas de carvão ROM (UCT, UCB, MLCU e LC 45/6), foram secadas a temperatura ambiente e classificadas em um intervalo específico, isto é, na faixa granulométrica 50x1 mm. (granulometria da alimentação da planta de processamento da planta da Mina da Vale).

3.8.3 Verificação de densidades

Foi verificada a diferença de densidades dos materiais nos ensaios anteriormente realizados de afunda-flutua já que os componentes da amostra que se pretende separar devem possuir gravidades específicas suficientemente diferentes. Para |critério de concentração (cc)| <1,5, visto que a separação por jigagem pneumática é pouco eficiente; e admite-se que quando |ccl| >2,5 a separação por jigagem é relativamente fácil de ser efetuada. Outros fatores que afetam a estratificação são o tamanho e o formato das partículas.

3.8.4 Umidade de alimentação

A separação eficaz por jigagem pneumática requer que a umidade da alimentação seja baixa, isto para evitar alteração da massa e na formação de aglomerados. Assim as amostras foram devidamente secadas a temperatura ambiente e separadas na faixa granulométrica pretendida para o ensaio de acordo com o objetivo traçado. No caso de carvão mineral, seu limite máximo é de 6%.

3.8.5 Quantidade de amostra

No caso que use componentes diferentes, a quantidade de amostra nos ensaios de análise densimétrica visando avaliar o uso de jigagem pneumático na separação do material recomenda-se usar alíquotas com volume semelhante de cada componente da amostra devido à melhor distinção na separação de fases. Isto pode

ser conseguido através do preenchimento de cada quadro compartimentado com um componente particular, seguido de mistura dos componentes.

No caso em particular foi usada uma alíquota correspondente a 51,6 kg de carvão *ROM* na faixa granulométrica de 50x1 mm. Foram realizados vários ensaios tendo sido selecionados aqueles que deram resultados mais promissores, um para cada camada em estudo como se fez referência anteriormente.

3.8.6 Procedimento

Como é necessário conhecer previamente a massa total da amostra, foram necessários os seguintes passos comumente adotados:

1. Com o jigge vazio, preencheu-se o compartimento inferior com o carvão mineral até o preenchimento do volume do compartimento, para neste caso em particular até três compartimentos que designamos metodologicamente por gavetas (**A**, **B** e **C**);

2. Procedeu-se a jigagem para a estratificação dos leitos durante cinco minutos;

3. Retirou-se o carvão mineral através de procedimento de arraste horizontal do quadro, depositando-o no coletor da câmara, em seguida, pesaram-se as amostras estratificadas nas três camadas pré-definidas (**A**, **B** e **C**), para avaliar as perdas após o ensaio;

4. Foram iterados ou repetidos várias vezes o procedimento para cada uma das subcamadas em estudo.

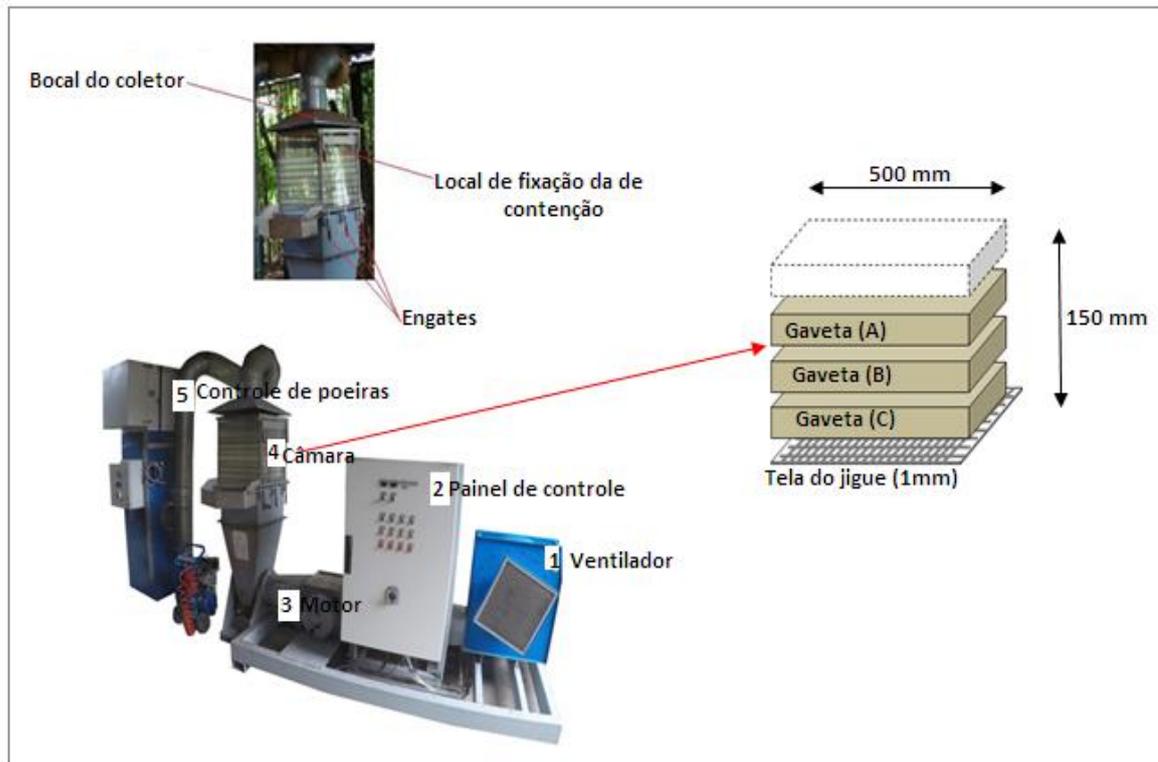


Figura 16: Equipamento usado no processo da jigagem (jigüe pneumático)
 Fonte: O Pesquisador

Como forma de aprimorar os ensaios, foram definidos os seguintes parâmetros operacionais: **Frequência** 98 RPM; **tempo de ensaio** 5 min, **amplitude**: 0,22 m e quantidade de amostra 51,6 kg de carvão **ROM** na faixa granulométrica de 50x1 mm.

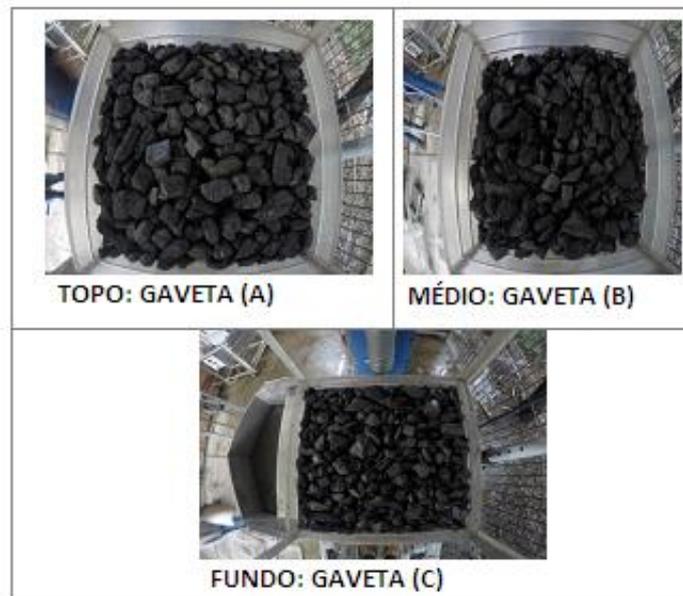


Figura 17: Composição dos produtos após a jigagem
 (Dados visuais)
 Fonte: O Pesquisador

Metodologicamente e para uma maior compreensão das fases sequenciais do ensaio do processo de jigagem, foi elaborado um fluxograma que pormenoriza as principais etapas desde a preparação, análise e obtenção dos resultados (Ver Figura 17).

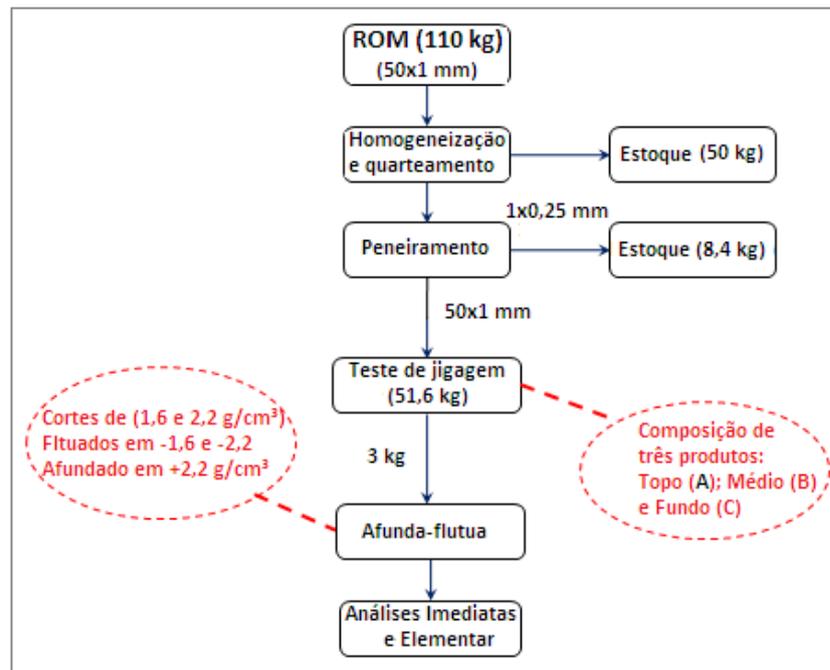


Figura 18: Fluxograma descritivo do processo de análise das amostras após a jigagem.
Fonte: O Pesquisador

3.8.7 Descrição das Fases do fluxograma

◆ **Primeira fase:** Foram devidamente selecionados e preparados 110 kg de amostras de carvão mineral *ROM* cada uma das camadas na faixa granulométrica de 50x1 mm. As amostras que se apresentavam com certa umidade, foram secadas a temperatura ambiente no galpão do LAPROM.

◆ **Segunda fase:** Dos 110 kg selecionados, foi feita a respectiva homogeneização e o quarteamento para obtenção de 60 kg para cada subcamada. Dos 60 kg quarteados, foram peneirados para a obtenção de uma alíquota de 51,6 kg para a realização dos experimentos no jigue. Os restantes 8,4 kg de amostras de cada subcamada foram conservadas para estudos posteriores (estudos futuros).

◆ **Terceira fase:** Após a realização dos testes no jigue, foram conformados três produtos designados metodologicamente por gavetas: gaveta **A** para o leito

estratificado no topo; gaveta **B** para o leito estratificado no meio e na gaveta **C** para o leito estratificado no fundo do jig.

Para cada leito estratificado após processo experimental, foi pesado para se ter a uma idéia da recuperação mássica em kg assim como as possíveis perdas.

♦ **Quarta fase:** Cada uma das amostras após a estratificação dos leitos foi realizado o quarteamento com o objetivo de se obter uma amostra representativa de 3 kg para cada leito para a realização de ensaios de afunda-flutua. Para o processo de quarteamento foi usado mais uma vez o quarteador Jones-1260.

♦ **Quinta fase:** Seguidamente foram realizados os ensaios de afunda-flutua dos 3 kg de amostra representativa de cada uma das camadas nas densidades de corte em 1,6 g/cm³ e 2,2 g/cm³, obtendo-se assim três produtos: flutuado em 1,6 g/cm³, flutuado em 2,2 g/cm³ e o afundado em 2,2 g/cm³.

Aqui importa referir que foi considerado o concentrado o carvão mineral flutuado na densidade de 1,6 g/cm³ e estratificado na gaveta **A** para cada uma das camadas em estudo.

Por outro lado há que destacar que ainda nesta fase foi realizado o cálculo do percentual da recuperação mássica para os três leitos obtidos em cada um dos cortes densimétricos.

♦ **Sexta fase:** Uma vez terminada a fase de ensaios de afunda-flutua, foi realizado o quarteamento das frações contidas em cada gaveta (**A**, **B** e **C**). No processo de quarteamento, foi usado o quarteador de bancada.

♦ **Sétima fase:** Segundo as normas NBR de (1993) para as análises imediatas e elementares, as amostras para as análises imediatas devem estar na granulometria (-0,25 mm). Assim, as mesmas, foram moídas no moinho vibratório de rolo e peneiradas em peneira de 60 mesh.

Em seguida, foram realizadas as respectivas análises imediatas (Umidade, Teor de cinzas e Materiais voláteis) e obtenção dos resultados.

3.9 Análise petrográfica

A análise petrográfica é a ciência que estuda macerais e seus respectivos grupos permitindo compreender as componentes essenciais como Vitrinita, Liptinita e Exinita assim como os componentes de grupo mineral contidos em amostras dos carvões.

O objetivo fundamental de agregar esta análise no presente estudo foi para confirmar a principal composição mineralógica das amostras de carvão de Moatize (Matéria mineral) e orgânica (Macerais e grupos de Macerais).

Pretende-se definir o tipo de carvões quanto ao seu *rank* (diagênese e metamorfismo). No caso em particular, para este trabalho de Tese foram analisadas as mesmas camadas referenciadas nos ensaios para a caracterização densimétrica e de ensaios de jigagem, isto é, amostras de carvão *ROM* das subcamadas da série produtiva UCT, UCB, MLCU e LC 45/6.

3.9.1 Preparação das amostras

As amostras foram catalogadas e identificadas segundo o sistema do Lacapetro como consta na tabela 13. Foi feito plug, lixado e polido para análises óticas de acordo com procedimentos padronizados (BUSTIN, *et al.*, 1989).

Tabela 10: Identificação laboratorial das amostras para análise petrográfica

Identificação de origem/ Tipo	Nº Lab
Moatize UCT - Carvão <i>ROM</i>	16-119
Moatize UCB- Carvão <i>ROM</i>	16-059
Moatize MLCU- Carvão <i>ROM</i>	16-118
Moatize LC45/6- Carvão <i>ROM</i>	16-060

Fonte: O Pesquisador

3.9.2 Determinação do Poder refletor da vitrinita

O grau de evolução (*rank*) do carvão foi determinado pelo índice de refletância da vitrinita (100 medidas) de acordo com o padrão ISO 7405/5-1984.

A média, o desvio padrão e outros parâmetros estatísticos foram calculados. Existe uma nítida relação entre o poder refletor de um maceral e seu teor de carbono e/ou matéria volátil, significando que o grau de evolução de um carvão pode ser determinado medindo-se sua reflectância numa superfície polida (STACH *et al.*, 1992).

O equipamento e o software utilizado para determinação do poder refletor da vitrinite é descrito no ponto 3.9.3. O método utilizado para determinação do poder refletor de uma amostra de carvão consistiu na medição de 100 medidas após a calibração do equipamento com padrões de reflectância conhecidos.

3.9.3 Análises de Macerais/ grupos de macerais

O conteúdo em grupos de macerais individuais e minerais foi determinado pela análise de macerais por uso do sistema de classificação estabelecido pelo ICCP (1963, 1998, 2000).

Os resultados serão expressos em volume por cento. A análise maceral baseiou-se na identificação e quantificação (contagem de 500 pontos efetivos) dos diferentes grupos de macerais e matéria mineral contidos na amostra, de acordo com a norma ISO 7404-3 (2009).

Foi executado em luz branca refletida e em luz azul (que permitiu a observação em fluorescência), que facilitou a identificação dos macerais do grupo Liptinita, Inertinita e Vitrinita.

O equipamento utilizado é um Microscópio Leica DM-4000 de luz refletida, objetiva de 20X, em óleo de imersão Immersion Oil For Microscopy, com índice de refração de 1,518 e oculares de 20X com uma câmera digital acoplada a um monitor e conectado a um computador utilizando o programa Diskus Fossil.

As análises serão realizadas no Laboratório de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo. O Padrão utilizado foi de Yttrium – Aluminium – Garnet, com reflectância nominal de 0,895 R random % (ISO 7404/5, 1994).

No final foram gerados os histogramas que são ilustrados no capítulo de análise e discussão dos resultados. Para melhor compreensão, foi elaborado um fluxograma (Ver Figura 18), onde são descritas as principais etapas.

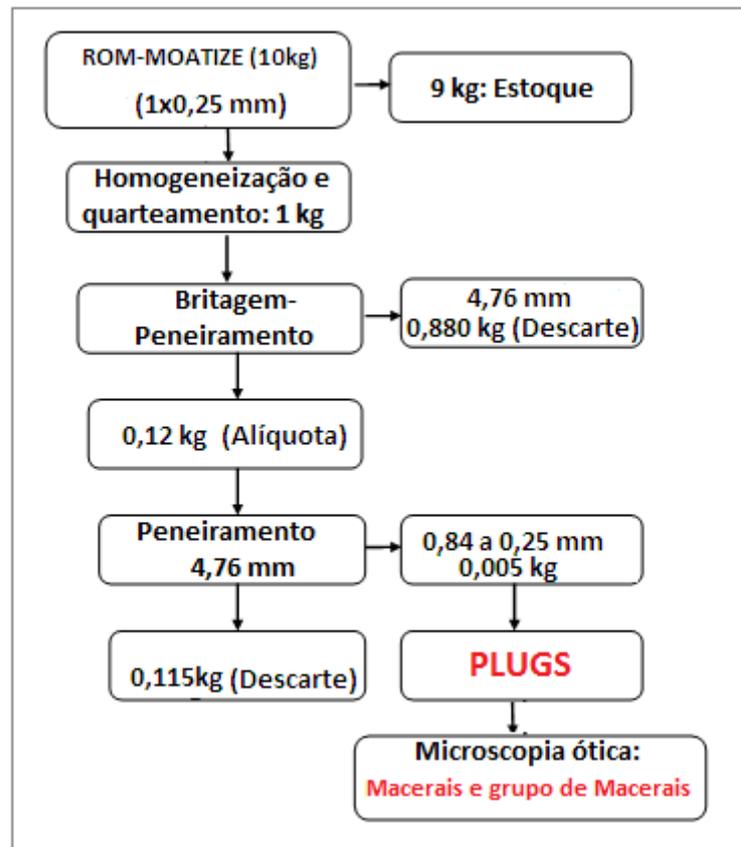


Figura 19: Fluxograma de descritivo de fases da análise petrográfica
Fonte: O Pesquisador

3.9.4 Descrição das Fases do fluxograma

◆ Primeira fase

Como primeiro passo, foram cuidadosamente e devidamente preparados 10 kg de carvão ROM na granulometria de 1x0,25 mm para cada uma das camadas anteriormente referenciadas.

As amostras foram colocadas em um plástico e catalogadas de acordo com o nome da camada e levadas ao Laboratório de “Análise de Carvão e Rochas geradoras de Petróleo” da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-Instituto de Geociências, Departamento de Geologia.

◆ Segunda fase

Seguidamente, efetuada a homogeneização e peneiramento na peneira de 4,76 mm (-4 mesh) e preparada uma alíquota de 0,12 kg para cada camada em

separado. As amostras foram britadas no britador de mandíbulas no intervalo de (0,84 a 0,25 mm).

◆ Terceira fase

Preparação dos (Plugs): Posteriormente, foram preparadas pastilhas (*plugs*) com aproximadamente 0,005 kg de carvão com granulometrias entre 0,84 e 0,25 mm misturadas com uma resina tipo epóxi (araldite resina CYD 248 e endurecedor HYD 951).

Depois de 24h de cura em uma forma plástica os *plugs* foram lixados e polidos com uma lixadeira/ politriz automática rotativa com uma velocidade variável (marca Buenler, modelo Ecomet4 com cabeçote de potência Automet2).

Procedimento do Lixamento e polimento: as amostras foram lixadas utilizando lixas de placas diamantadas de 45 μm e 9 μm , utilizando limpeza de ultrassom após cada passo para evitar contaminação de grãos abrasivos no passo subsequente.

Para o polimento foram utilizados pratos com panos de polimento *Pellon polishing cloth* e *silk cloth* com uma suspensão de alumina de 0,3 μm . O polimento final foi feito com uma suspensão de alumina de 0,05 μm , utilizando dois panos de seda sobre um pano *Pellon*. Finalmente as amostras foram lavadas em um banho de ultrassom por dois minutos para remover os contaminantes do polimento. Foram secas e armazenadas em um dissecador.

◆ Quarta fase

Nesta etapa, foram determinados os macerais e seus grupos;

Análise de refletância da vitrinita: É o maceral mais abundante em carvões húmicos, formada a partir de matérias ricas em lignina, como caules, raízes e folhas de plantas. O grau de evolução (*rank*) foi determinado pelo índice de refletância da vitrinita (100 medidas para carvões) de acordo com o padrão ISO 7405/5-1984.

A **refletância da vitrinita** é o percentual da intensidade de um feixe de luz incidente que é refletido de uma determinada área da superfície polida de um grão de vitrinita (ISO 7405/5-1984).

Esta análise é considerada mais confiável para determinação do *rank* de um determinado carvão mineral. O aumento de nível no *rank* provoca um aumento da aromatização da estrutura das moléculas na vitrinita, que correlaciona com um aumento da sua capacidade de reflexão.

Análise de macerais e grupos de macerais: são componentes microscópicos e são compostos de restos de plantas terrestres superiores assim como de restos de algas.

O tipo de carvão e as suas propriedades são dependentes das proporções e das associações dos mesmos e minerais presentes em uma amostra. (ISO 7404/3 1984).

O conteúdo em grupos de macerais individuais e minerais foi determinado pela análise de macerais por uso do sistema de classificação estabelecido pelo ICCP (1963, 1998 & 2000). Dentro do conteúdo mineral foram discriminados a argila, carbonato, quartzo e pirita. A análise foi baseada em 500 pontos (ISO 7404-3/1984).



Figura 20: Tipo de britador e peneiras usados para a britagem e peneiramento das amostras.

Fonte: O Pesquisador

◆ Quarta fase

Uma vez concluídas todas as fases anteriormente descritas, a última etapa foi a compilação dos resultados e a posterior a discussão dos mesmos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da análise granulométrica

No que concerne a análise granulométrica foram elaboradas tabelas e seus respectivos gráficos. As massas retidas e passantes em kg foram obtidas nas diferentes peneiras na medida em que se foi realizando o processo de peneiramento, isto é, são as massas retidas e passantes em cada uma das peneiras.

Os Percentuais das massas retidas foram calculados a partir das massas retidas em cada malha divididas pela massa total retida e multiplicado por 100%.

Enquanto que as massas retidas acumuladas foram calculadas a partir das massas retidas acumuladas na primeira peneira, somadas com as massas retidas na segunda peneira. Os seus respectivos percentuais foram calculados a partir das massas retidas acumuladas, divididas pela massa retida total e multiplicadas por 100%.

Por outro lado, as massas acumuladas passantes, foram calculadas a partir das massas retidas totais subtraídas pelas massas retidas acumuladas na primeira peneira. E os seus respectivos percentuais foram calculados a partir de (100 subtraindo o percentual das massas retidas acumuladas).

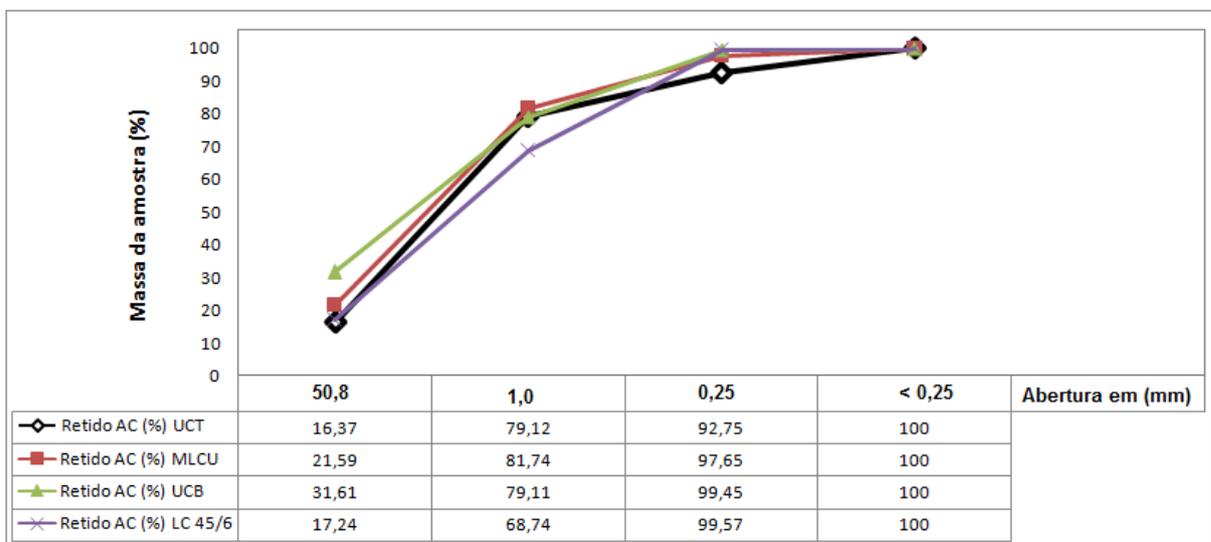


Figura 21: Gráfico de distribuição granulométrica das subcamadas

Fonte: O Pesquisador

Conforme ilustram a figura 21, representa as massas acumuladas retidas para todas as subcamadas da camada Chipanga em estudo. Para a subcamada UCT por

exemplo, uma massa de aproximadamente 20.684,80 kg de carvão mineral, na peneira com abertura de 50,8 mm se obteve uma recuperação mássica passante acumulada de 83,63%, e 16,37% de massa retida acumulada.

Enquanto que para o intervalo granulométrico de 50x1 mm se obteve uma massa retida acumulada correspondente a 79,12% e massa passante acumulada de 20,88%. Na granulometria de 1x0,25 mm, a massa acumulada passante foi de 7,25% e uma massa retida acumulada de 92,75%.

Com relação a subcamada UCB, num total de 30 kg de amostra, se obteve os seguintes resultados: a massa retida acumulada na peneira de +50,8mm correspondeu a 31,61% tendo portanto passado uma massa acumulada de 68,39%. Na peneira de 1 mm se obteve uma massa retida acumulada de 79,11%, tendo passado uma massa acumulada representada em 20,89%.

Na peneira com abertura de 0,25 mm, a massa retida acumulada foi de 99,45% tendo passado uma massa acumulada correspondente a 0,55%.

Enquanto que a subcamada MLCU, numa massa de aproximadamente 21,5 kg de carvão, uma vez submetida a sua distribuição granulométrica, obteve-se uma recuperação mássica acumulada passante em +50,8 mm de 78,41% e uma massa retida acumulada de 21,59%.

Já para a peneira de 1,0 mm, a massa retida acumulada foi de 81,74% e 18,26% da massa passante acumulada. Por sua vez, na peneira 0,25 mm foi onde se obteve maior massa retida acumulada na ordem de 97,65% e somente 2,35% de massa acumulada passante. De salientar que as frações menores de 0,25 mm, eram separadas e colocadas no estoque, uma vez que o nosso enfoque eram as frações 50x1 mm e 1x0,25 mm.

Finalmente, os resultados da distribuição granulométrica da camada LC 45/6 para uma quantidade de 30 kg de carvão ROM, 17,24% correspondeu a uma massa retida acumulada e 82,76% de massa passante acumulada.

Para o intervalo granulométrico de 50x1mm na peneira de 1,0 mm se obteve uma massa acumulada retida de 68,74% correspondente a 31,26% de massa acumulada passante. Enquanto que na peneira de 0,25 mm se obteve uma maior retenção da massa acumulada em 99,57% e 0,45% de massa acumulada passante.

4.2 Resultados da análise do estudo gravimétrico

Os resultados das análises de afunda-flutua de todas as subcamadas em estudo, estão detalhados nos apêndices 1, 2, 3 e 4 respectivamente, onde pode ser encontrada uma descrição completa.

Tabela 11: Resultados da análise densimétrica da subcamada UCT

Camada-granulometria (mm)	Corte densimétrico (g/cm ³)	Recuperação Mássica (%)	NGM (%)	Cinzas Ac (%)	Exfore Total (%)
UCT (50x1 mm)	1,4	10,32		9,50	0,87
	1,5	18,53	16,75	14,57	0,99
	1,6	27,07	13,29	19,89	0,91
	1,7	31,81	10,85	22,79	0,72
	1,8	37,92	15,12	26,63	0,80
	1,9	46,93	14,34	31,04	0,50
	2,0	52,26	14,99	33,68	0,52
	-2,2	61,92		38,35	0,90
	+2,2	100,00		54,93	0,83

Fonte: O Pesquisador

Os resultados da análise densimétrica da subcamada UCT na fração 50x1 mm é corroborada na tabela 11. Foram realizados nove cortes densimétricos durante o processo de afunda-fluta. A densidade de 1,6 g/cm³ foi considerada a densidade de separação do processo.

Nesse corte densimétrico, pode-se depreender que o teor de cinzas acumulada foi de 19,89% com uma recuperação mássica de 27,07% de um total de 12 kg de carvão ROM submetido a ensaios de afunda-flutua. Por outro lado, pode se constatar que a subcamada UCT apresenta uma maior facilidade de beneficiamento no corte densimétrico de 1,7 g/cm³, onde o valor de NGM é inferior em todo o processo correspondendo a 10,85%. Quanto ao elemento enxofre, pode se apurar que este, está abaixo de 1%.

Uma vez que o valor de NGM em toda a subcamada está abaixo de 25%, podendo ser considerada moderadamente difícil de beneficiá-lo BIRD *apud* SAMPAIO & TAVARES (2005). O rejeito da alimentação da granulometria 50x1 mm desta subcamada foi 54,94% de teor de cinzas.

Como se referiu no primeiro objetivo específico deste trabalho e de acordo com o fluxograma, importa sublinhar que foram realizados ensaios de afunda-flutua e plotadas as respectivas curvas de **Henry Reinhardt** de todas as subcamadas em estudo nas granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm.

OBS: Importa destacar ainda que para a granulometria de 1x0,25 mm, não foi realizada a análise de enxofre total uma vez que os resultados obtidos deste na granulometria de 50x1 mm foram constatados muito baixos da média. Nesse contexto, testificou-se que o enxofre total para o carvão de Moatize não constitui uma preocupação relevante (DA SILVA, 2018).

A continuação são discutidas os principais resultados da análise densitária de carvão ROM na granulometria 1x0,25 mm da subcamada UCT, como pode-se verificar na tabela 12.

Tabela 12: Resultados da análise densimétrica da subcamada UCT

Camada-Granulometria (mm)	Corte densimétrico (g/cm ³)	Recuperação Mássica (%)	NGM (%)	Cinzas Ac (%)	Exofre Total (%)
UCT (1x0,25 mm)	1,4	43,95		4,99	
	1,5	57,34	20,20	6,68	
	1,6	64,15	10,88	8,87	
	1,7	68,21	7,41	10,46	
	1,8	71,56	6,92	12,05	
	1,9	75,13	5,76	13,97	
	2,0	77,32	7,76	15,23	
	-2,2	82,90		18,80	
	+2,2	100,00		29,95	

Fonte: O Pesquisador

Como se pode evidenciar na tabela 12, a densidade de 1,6 g/cm³ se auferiu uma recuperação mássica de 64,15% com um teor de cinzas de 8,87%.

Comparativamente com a fração 50x1 mm, constatou-se que a granulometria 1x0,25 mm apresentou uma maior recuperação mássica e um menor teor de cinzas.

Com relação ao valor de NGM para a fração mais liberada pode-se asseverar que ela é a mais fácil de ser beneficiada na densidade de corte de 1,9 g/cm³.

Igualmente, a fração em análise, pode se certificar que para a fração 1x0,25 mm os valores de *NGM* encontram-se a baixo de 25%. Nessa perspectiva, se atesta que de forma geral que a subcamada UCT é de beneficiamento viável, BIRD *Apud* SAMPAIO &TAVARES (2005).

A faixa granulométrica de 1x0,25 mm não sendo de alimentação, o rejeito do processo foi considerado o carvão afundado no corte densimétrico +2,2 g/cm³.

Nesse corte densimétrico, o teor de cinzas foi de 29,95%. Portanto pode-se certificar que o carvão mais liberado apresentou uma maior recuperação mássica e menor teor de cinzas na densidade de corte 1,6 g/cm³ comparativamente com a granulometria mais grosseira (50x1 mm).

Tabela 13: Resultados da análise densimétrica da subcamada UCB

Camada-granulometria (mm)	Corte densimétrico (g/cm ³)	Recuperação Mássica (%)	<i>NGM</i> (%)	Cinzas Ac (%)	Exofre Total (%)
UCB (50x1 mm)	1,4	16,23		8,72	0,85
	1,5	27,73	21,35	14,44	0,79
	1,6	37,58	17,51	18,72	0,68
	1,7	45,24	14,60	22,43	0,57
	1,8	52,18	12,94	25,45	0,61
	1,9	58,18	13,60	28,20	0,61
	2,0	65,78	17,42	31,80	0,33
	-2,2	75,60		36,26	0,30
	+2,2	100,00		46,46	0,60

Fonte: O Pesquisador

Os resultados da análise densimétrica para a subcamada UCB na granulometria de 50x1 mm são realçados na tabela 13. Igual que a subcamada UCT, foram realizados nove cortes densimétricos durante o processo de afunda-fluta.

Na densidade 1,6 g/cm³ pode-se atestar que o teor de cinzas acumuladas foi de 18,72% com uma recuperação mássica dos flutuados de 37,58% numa massa total de 12 kg submetida a ensaios de afunda-flutua. Por outro lado, pode se testificar que a subcamada UCB apresenta um beneficiamento viável na densidade 1,8 g/cm³, onde o valor de *NGM* é inferior em todo o processo correspondendo a 12,94%.

De forma geral e de acordo com os resultados, pode-se constatar que o valor de *NGM* está a baixo de 25%, podendo-se assegurar que o carvão desta subcamada é

viável de beneficiá-lo na densidade 1,8 g/cm³, BIRD *apud* SAMPAIO &TAVARES (2005).

Para a subcamada UCB, o teor de cinzas acumulado se registrou em 46,46%. Com relação ao elemento enxofre total, pode se comprovar que este, está abaixo de 1%; sendo o menor valor de 0,30% e maior de 0,85%.

Tabela 14: Resultados da análise densimétrica da subcamada UCB

Camada-granulometria (mm)	Corte densimétrico (g/cm ³)	Recuperação Mássica (%)	NGM (%)	Cinzas Ac (%)	Exofre Total (%)
UCB (1x0,25 mm)	1,4	13,09		9,75	
	1,5	25,35	28,81	15,23	
	1,6	41,90	22,05	21,67	
	1,7	47,39	13,18	23,86	
	1,8	55,08	13,74	26,59	
	1,9	61,13	20,38	29,31	
	2,0	75,46	27,40	35,33	
	-2,2	88,53		40,02	
	2,2	100,00		44,48	

Fonte: O Pesquisador

Na tabela 14, são atestados os resultados dos principais resultados da análise densimétrica da subcamada UCB na granulometria de 1x0,25 mm.

Como se pode certificar na tabela 14, na densidade 1,6 g/cm³ pode-se apurar uma recuperação mássica de 41,90% com um teor de cinzas acumulado de 21,67%.

Com relação ao valor de *NGM* e de acordo com o menor valor obtido foi de 13,18%, portanto, pode-se afirmar então que a faixa granulométrica de 1x0,25 mm da subcamada UCB, é mais viável de beneficiá-la na densidade 1,7 g/cm³.

Comparativamente com a granulometria 50x1 mm, na densidade 1,6 g/cm³ apurou-se que para a faixa granulométrica de 1x0,25 mm apresentou uma maior recuperação mássica dos fluídos de 41,90% e maior teor de cinzas acumuladas de 21,67%; enquanto que a na faixa granulométrica de 50x1 mm, a recuperação mássica dos fluídos foi de 37,58% com um teor de cinzas acumuladas de 18,72%.

Comparativamente entre as duas faixas da subcamada UCB, pode-se verificar que o carvão mais liberado, isto é, o da granulometria 1x0,25 mm, apresentou uma maior recuperação mássica dos flutuados e um maior teor de cinzas acumuladas.

Tabela 15: Resultados da análise densimétrica da subcamada MLCU

Camada-granulometria (mm)	Corte densimétrico (g/cm ³)	Recuperação Mássica (%)	NGM (%)	Cinzas Ac (%)	Exofre Total (%)
MLCU (50x1 mm)	1,4	15,54		8,77	0,70
	1,5	30,38	25,73	13,92	0,60
	1,6	41,27	15,78	17,32	0,50
	1,7	46,16	12,70	19,66	0,60
	1,8	53,96	15,44	23,30	0,50
	1,9	61,60	12,21	27,12	0,50
	2,0	66,17	13,66	29,31	0,50
	-2,2	75,26		33,76	0,50
	2,2	100,00		45,10	0,80

Fonte: O Pesquisador

A subcamada MLCU na granulometria 50x1 mm, os resultados da análise densimétrica podem ser comprovados na tabela 15. Como se pode observar na tabela anteriormente referenciada, na densidade 1,6 g/cm³, verifica-se uma recuperação mássica da massa flutuada de 41,27% correspondente a um teor acumulado de cinzas em 17,32%.

Relativamente ao valor de *NGM* foi de 12,21%, assim, podendo-se depreender que na granulometria de 50x1 mm da subcamada MLCU, o carvão pode ser mais viável de beneficiá-lo na densidade 1,9 g/cm³. No que diz respeito ao comportamento do elemento enxofre total presente nas amostras da subcamada MLCU, pode se afirmar que o seu valor está a baixo de 1% como se constatou nas subcamadas anteriormente discutidas.

Tabela 16: Resultados da análise densimétrica da subcamada MLCU

Camada-granulometria (mm)	Corte densimétrico (g/cm ³)	Recuperação Mássica (%)	NGM (%)	Cinzas Ac (%)	Exofre Total (%)
MLCU (1x0,25 mm)	1,4	53,74		9,50	
	1,5	69,24	22,73	10,06	
	1,6	76,47	11,71	11,13	
	1,7	80,96	7,01	12,24	
	1,8	83,48	5,89	13,08	
	1,9	86,85	5,45	14,25	
	2,0	88,93	5,82	15,24	
	-2,2	92,67		17,35	
	2,2	100,00		21,81	

Fonte: O Pesquisador

Os resultados da análise densimétrica da subcamada MLCU na fração granulométrica 1x0,25 mm, podem ser constatados na tabela 16. Como se pode corroborar, na densidade 1,6 g/cm³ o teor de cinzas acumuladas foi de 11,13% com uma recuperação mássica dos flutuados de 76,47% numa massa total de 12 kg de carvão ROM submetida a ensaios de afunda-flutua.

De forma geral e de acordo com os resultados da tabela 16, pode-se asseverar que o valor de NGM está muito a baixo de 25%, podendo-se atestar então que o carvão desta camada pode ser fácil de beneficiá-lo. BIRD *apud* SAMPAIO &TAVARES (2005). No caso da subcamada MLCU, na granulometria 1x0,25 mm, o percentual de teores de cinzas acumuladas registrou-se em 21,81%.

Tabela 17: Resultados da análise densimétrica da subcamada LC 45/6

Camada-granulometria (mm)	Corte densimétrico (g/cm ³)	Recuperação Mássica (%)	NGM (%)	Cinzas Ac (%)	Enxofre Total (%)
LC 45/6 (50x1 mm)	1,4	23,55		7,89	0,48
	1,5	39,60	24,90	13,14	0,64
	1,6	48,45	12,94	16,22	0,55
	1,7	52,54	7,81	17,95	0,48
	1,8	56,26	7,85	19,86	0,56
	1,9	60,39	8,43	22,13	0,37
	2,0	64,70	10,48	24,62	0,48
	-2,2	70,87		28,20	1,09
	2,2	100,00		43,62	0,46

Fonte: O Pesquisador

Os resultados da análise densimétrica da subcamada da subcamada LC 45/6 na granulometria 50x1mm é apresentada na tabela 17. Como se destacou no início da discussão deste capítulo da análise densimétrica, importa enfatizar que igual que todas as subcamadas em estudo os ensaios de afunda-flutua foram definidos em até nove cortes densimétricos.

Na densidade 1,6 g/cm³, pode-se constatar que a recuperação mássica dos flutuados foi de 48,45% com um teor de cinzas acumuladas de 16,22%.

De igual modo pode-se constatar que os valores de *NGM* de forma geral se encontram abaixo dos 25%, podendo-se sustentar então que a subcamada LC 45/6 nesta faixa granulométrica, apresentou uma maior facilidade de beneficiamento na densidade 1,7 g/cm³, correspondendo a 7,81%. BIRD *Apud* SAMPAIO & TAVARES (2005).

De acordo com a tabela 17, pode-se testemunhar que enxofre total teve seu maior ponto percentual na densidade - 2,2 g/cm³, tendo sido registrado 1,09%.

Tabela 18: Resultados da análise densimétrica da subcamada LC 45/6

Camada-granulometria (mm)	Corte densimétrico (g/cm ³)	Recuperação Mássica (%)	<i>NGM</i> (%)	Cinzas Ac (%)	Enxofre Total (%)
LC 45/6 (1x0,25 mm)	1,4	21,68		9,60	
	1,5	30,82	15,64	13,05	
	1,6	37,32	11,34	16,11	
	1,7	42,17	8,29	18,86	
	1,8	45,62	5,54	21,01	
	1,9	47,71	3,52	22,51	
	2,0	49,13	7,63	23,70	
	-2,2	55,34		28,77	
	2,2	100,00		51,46	

Fonte: O Pesquisador

Os resultados da análise densimétrica visando o beneficiamento gravimétrico dos carvões são importantes na avaliação das condições tecnológicas dos mesmos. Com relação aos resultados correspondentes a subcamada LC 45/6 na faixa granulométrica 1x0,25 mm podem ser verificados na tabela 17.

No caso da subcamada LC 45/6 na densidade 1,6 g/cm³, segundo os dados plasmados na tabela 18, pode-se apurar que a recuperação mássica dos flutuados foi de 37,32%, com um teor de cinzas acumuladas de 16,11%.

Por outro lado, a recuperação mássica total dos flutuados foi de 55,34% com um teor de cinzas acumuladas de 51,46%. Com os dados obtidos em ambas granulometrias, pode-se afirmar que na medida em que a densidade se aumentava, o percentual do teor de cinzas também se ia incrementando.

Comparativamente nas duas faixas granulométricas, a 50x1 mm na densidade 1,6 g/cm³ apresentou uma menor recuperação mássica e um teor de cinzas respectivamente. De igual modo pode-se constatar que os valores de *NGM* de forma geral em ambas faixas granulométricas encontram-se abaixo dos 25%.

Segundo BIRD *Apud* SAMPAIO & TAVARES (2005), e de acordo com os resultados da tabela 25, pode-se certificar que o carvão da camada LC 45/6 é fácil de ser beneficiado.

4.3 Resultados da análise imediata e elementar da alimentação

Quanto aos resultados da análise elementar da alimentação e sua discussão, pode-se depreender que os carvões da Mina da Vale-Moatize geralmente possuem baixo teor de enxofre pirítico, isto é, em forma de sulfeto. Essa baixa manifestação desse elemento no carvão de Moatize reduz em grande medida o problema de contaminação ambiental nas áreas de deposição dos produtos da mineração e tratamento (DA SILVA, 2018). Importa frisar que neste trabalho, também foi analisado o comportamento do enxofre forma total na granulometria 50x1 mm². Enquanto que as análises imediatas (Umidade, Cinzas e Materiais Voláteis), foram realizadas nas duas faixas granulometrias, isto é, 50x1 mm³ e 1x0,25 mm⁴.

² Informações adicionais dos resultados de análise de enxofre total (50x1 mm)- UCT: Apêndice 19; UCB: Apêndice 20; MLCU: Apêndice 21 e LC 45/6 : Apêndice 22.

³ Informações adicionais dos resultados dos teores de Umidade, Material Volátil e Teores de Cinzas das camadas na granulometria (50x1 mm)- Apêndices: 5, 6 e 7 respectivamente.

⁴ Informações adicionais dos resultados de Umidade, Material Volátil e Teores de Cinzas das camadas na granulometria (1x0,25 mm)-: Apêndices:12, 13 e 14 respectivamente.

As apêncides 5, 6 e 7 expõem os resultados de teores de Cinzas, Material Volátil e Umidade (análise imediata) e o teor de Enxofre Total (análise elementar) na granulometria 50x1 mm.

Comparativamente nas duas faixas granulométricas e de acordo com os resultados exibidos na apêndice 12,13 e 14, pode-se atestar uma diminuição de teor de cinzas na granulometria 1x0,25 mm em comparação com a granulometria 50x1 mm.

Foram realizadas análises imediatas para a granulometria 1x0,25 mm com intuito de comparar as características com a granulometria 50x1 mm.

Os teores percentuais de umidade e materias voláteis entre as duas granulometrias pode-se testemunhar que não houve muita grande variação. Na granulometria 50x1 mm, os teores de cinzas acumuladas foram de 54,93%; enquanto que para a granulometria 1x0,25 mm de 29,95%. Por outro lado, os teores de materiais voláteis variaram de 14% a 26,87% para as amostras na granulometria 50x1 mm.

As amostras na granulometria 1x0,25 mm registraram uma variação entre 11,90% a 28,17% de matérias voláteis. Em ambas as granulometrias, pode-se afirmar que os teores de umidade não mostraram uma grande variação. Com relação ao teor de enxofre total, pode se confirmar que os valores oscilam entre 0,50% e 0,99%.

Como se pode certificar, nas apêndice 5, 6, 7 e 12, 13 e 14, são ilustrados os resultados das análises imediatas e elementar das subcamadas. Segundo os valores elucidados, pode-se admitir que os teores de umidade, cinzas e materiais voláteis não tiveram muita variação tanto na granulometria 50x1 mm, assim como na 1x0,25 mm.

Com relação à análise elementar, como se referiu no início da discussão só foi realizado o teste de elemento (enxofre), na sua forma total. Auxiliando-se com a pêndices 19, 20, 21 e 22 pode-se escorar que a presença deste elemento é muito baixo em todas as subcamadas, podendo variando de 0,30% a 0,85%, isto é, muito a baixo de 1%.

Procedendo a uma comparação entre os teores percentuais de umidade, cinzas, materiais voláteis entre as granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm nas subcamadas como se depreende nas apêndices 5, 6,7 e 12, 13 e 14 constata-se que os teores de cinzas para a granulometria 1x0,25 mm foram inferiores que os da 50x1 mm.

Sem embargo, quanto à umidade não houve uma grande variação percentual deste parâmetro. A mesma situação se testifica para os teores de materias voláteis que não se apresentaram grandes variações. Com isso, significa que a pesar de tamanhos diferentes, as características essenciais se mativeram mais ou menos aproximadas.

O carvão de Moatize, quando liberado, em alguns casos mostra uma concentração de matéria orgânica comparado com o carvão de granulometria grosseira. Com relação ao teor de enxofre total, pode-se sustentar que este não constitui nenhuma preocupação para questões de geração de drenagem ácida de Minas-DAM (DA SILVA, 2018). Com os dados das apêndices 19, 20, 21 e 22, pode se sustiver que o elemento enxofre total nas amostras de carvão da subcamada MLCU está a baixo de 1% variando entre 0,50% a 0,80%.

Corroborando uma comparação entre os teores de umidade, cinzas, materiais voláteis entre as granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm da camada em análise, não se verifica uma grande variação. Por exemplo, nas três primeiras densidades na granulometria 50x1 mm a variação de teores de cinzas acumuladas foi de 7,89% a 16,22%; enquanto que para a granulometria 1x0,25 mm, o teor de cinzas acumuladas variou de 9,60% a 16,11%.

Todavia, quanto à umidade não houve também uma diferença percentual como tinha se verificado nas camadas anteriormente discutidas. A mesma situação se constata para os teores de materias voláteis que não se verificou grandes variações.

A diferença de teores de cinzas acumuladas entre a granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm significa que a medida em que foi sendo liberada a matéria orgânica, houve um incremento de matéria mineral o que se supõe que na medida em que se diminuía o tamanho da partícula, aumentava ligeiramente os teores de cinzas acumuladas.

Com relação ao teor de enxofre total, pode-se comprovar que este teve o seu ponto mais alto na densidade - 2,2 g/cm³ com um percentual de 1,09%.

4.4 Curvas de lavabilidade de HENRY –REINHARDT

A concentração gravimétrica compreende uma das mais antigas e importantes formas de tratamento mineral, sendo utilizada para beneficiar uma grande variedade de minérios. Com tudo, a melhor maneira de investigar e prever resultados satisfatórios através desses processos é com auxílio as curvas de lavabilidade.

As curvas de lavabilidade demonstram a distribuição de partículas de um determinado material (curvas de flutuados-massa flutuada, afundados-massa afundada e curva elementar esta última para partículas que se encontram na intermediária), baseando-se nas suas respectivas densidades. Estas curvas, são construídas a partir de resultados experimentais usando líquidos de diferentes densidades sub ensaios ou experimentos denominados de afunda-flutua.

As curvas de lavabilidade de **Henry-Reinhardt**: curva dos flutuados, curva dos afundados, curva densimétrica e de *NGM* foram elaboradas para todas as camadas em estudo nas granulometrias de 50x1 mm e 1x0,25 mm respectivamente.

Os ensaios de afunda- flutua foram realizados a partir na densidade 1,4 g/cm³ a 2,2 g/cm³. Segundo a definição, as curvas de *NGM* foram plotadas a partir da densidade 1,5 g/cm³ até na densidade 2,0 g/cm³. As curvas correspondentes a subcamada UCT, nas granulometrias de 50x1 mm e 1x0,25 mm podem ser conferidas nas figuras 19 e 20. Informações detalhadas sobre dados dos resultados dos ensaios de afunda-flutua nas duas faixas granulométricas⁵.

⁵ Apêndices 8, e 15: Resultados de ensaio de afunda flutua da Alimentação da camada UCT, granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm.

Apêndices 9 e 16: Resultados de ensaio de afundaflutua da Alimentação da camada UCB, granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm.

Apêndices 10 e 17: Resultados de ensaio de afundaflutua da Alimentação da camada MLCU, granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm.

Apêndices 11 e 18: Resultados de ensaio de afundaflutua da Alimentação da camada LC 45/6, granulometrias 50x1 mm e 1x0,25 mm.

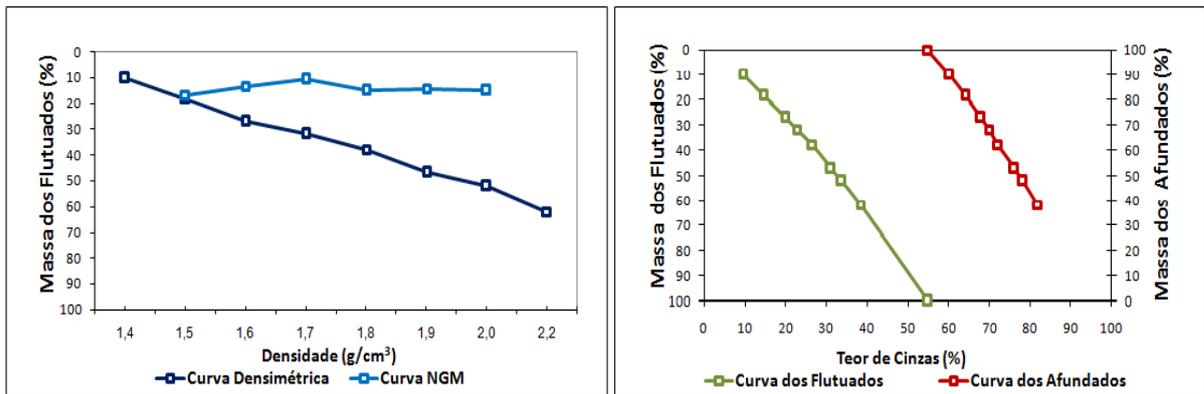


Figura 22: Curvas de Lavabilidade da subcamada UCT: 50x1 mm
Fonte: O Pesquisador

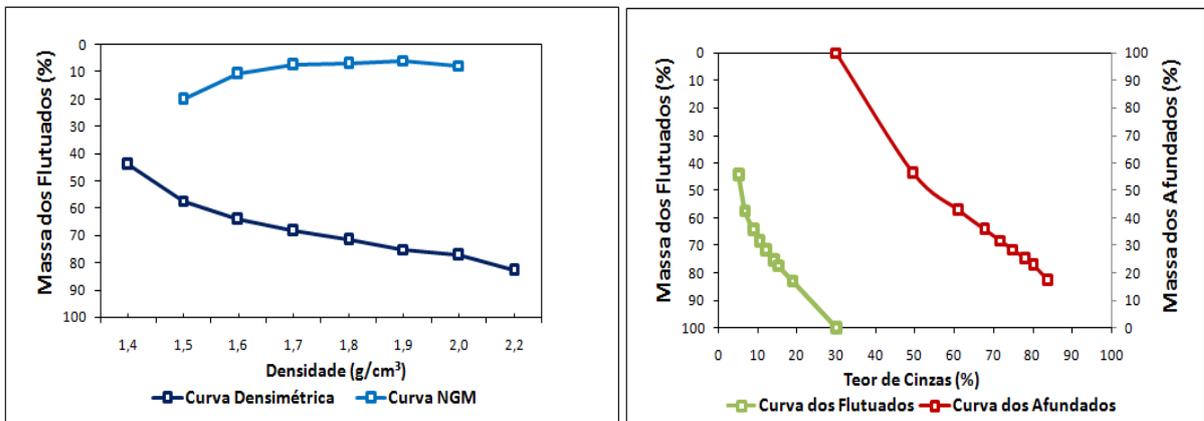


Figura 23: Curvas de Lavabilidade da subcamada UCT: 1x0,25 mm
Fonte: O Pesquisador

Os resultados e comportamento das curvas dos flutuados, afundados, densimétrica e de *NGM* da subcamada UCT nas granulometrias de 50x1 mm e 1x0,25 mm podem ser atestadas nas figuras 18 e 19 respectivamente. Quanto aos teores de cinzas nas duas granulometrias, nota-se uma distribuição direta e proporcional com aumento da densidade, isto é, à medida que a densidade aumentava o teor de cinzas ia-se incrementando.

Na granulometria 50x1 mm correlacionado com a densidade 1,5 g/cm³ apurou-se um teor de cinzas acumuladas de 14,57%; enquanto que para a mesmo corte e na granulometria 1x0,25 mm, o teor de cinzas acumuladas foi registrado em 6,68%. Com relação à curva de *NGM* e de acordo com os valores apurados e representados nas figuras 32 e 33, pode-se confirmar que de forma geral o carvão desta camada é

fácil de beneficiá-lo visto que os valores de NGM estão a baixo de 25% (BIRD *Apud* SAMPAIO & TAVARES (2005)).

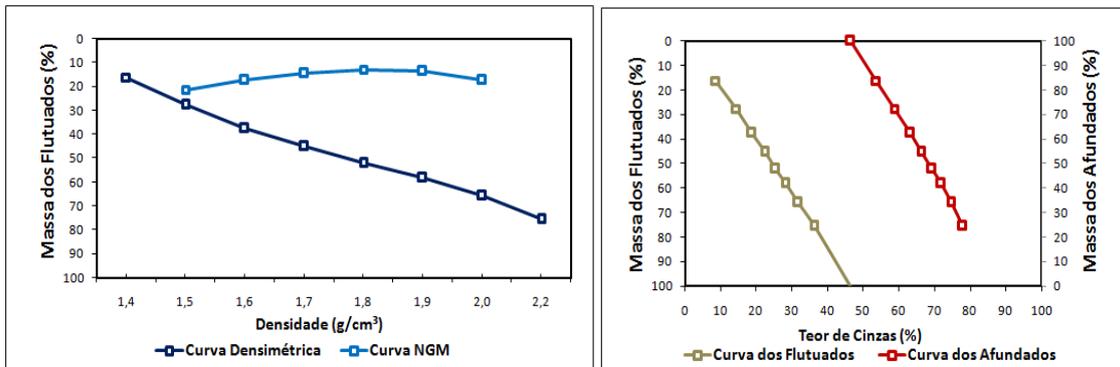


Figura 24: Curvas de Lavabilidade da subcamada UCB: 50x1 mm

Fonte: O Pesquisador

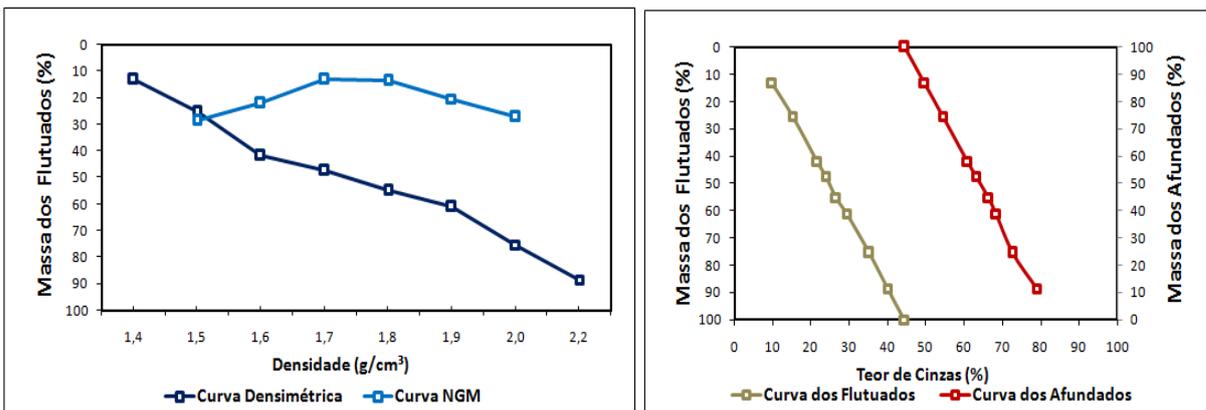


Figura 25: Curvas de Lavabilidade da subcamada UCB: 1x0,25 mm

Fonte: O Pesquisador

As curvas de Henry Reinhardt da subcamada UCB nas duas granulometrias são certificadas nas figura 24 e 25. Nelas nota-se uma distribuição direta e proporcional, isto é, com o aumento da densidade, aumentava o teor de cinzas. As curvas dos flutuados e afundados nas duas faixas granulometrias apresentam certa similaridade. Quanto à curva de NGM e os respectivos valores apresentados nas figuras 20 e 21, pode-se assegurar que de forma geral o carvão desta subcamada é ligeiramente benéfico visto que os valores de NGM estão a baixo de 25%, segundo BIRD *Apud* SAMPAIO & TAVARES (2005). Nas duas faixas granulométricas, o carvão na densidade 1,8 g/cm³ apresenta teores de cinzas acumuladas correspondentes a 12,94% e 13,74% respectivamente. De acordo com as curvas densimétricas verificou-se uma baixa recuperação mássica nas primeiras três densidades.

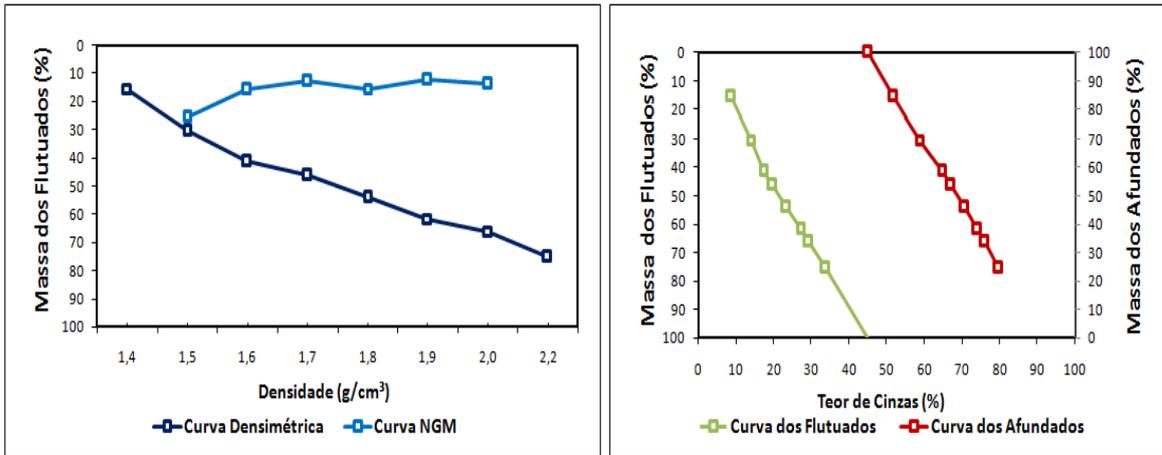


Figura 26: Curvas de Lavabilidade da subcamada MLCU: 50x1 mm
Fonte: O Pesquisador

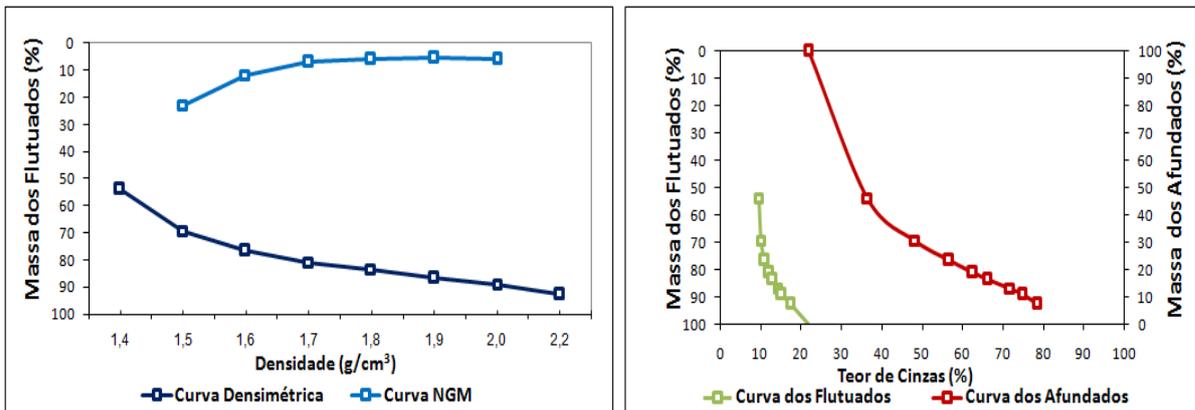


Figura 27: Curvas de Lavabilidade da subcamada MLCU: 1x0,25 mm
Fonte: O Pesquisador

Os resultados da análise densitária da subcamada MLCU nas duas faixas granulométricas são comprovados nas figuras 26 e 27 respectivamente. De forma comparativa entre as duas faixas, pode-se assegurar que a faixa mais liberada se obteve uma maior recuperação mássica acumulada acima de 90% e por conseguinte menor porcentual de teores de cinzas acumuladas.

Todavia, o valor de *NGM* não teve uma grande variação em comparação com as duas primeiras subcamadas analisadas anteriormente uma vez que este está a baixo dos 25%. Dos resultados obtidos comparando - os com os das duas subcamadas anteriormente discutidas (UCT e UCB) a pesar da facilidade de beneficiamento, pode-se depreender que a subcamada MLCU, apresenta ainda uma

maior facilidade no processo de beneficiamento comparativamente com as subcamadas UCT e UCB respectivamente.

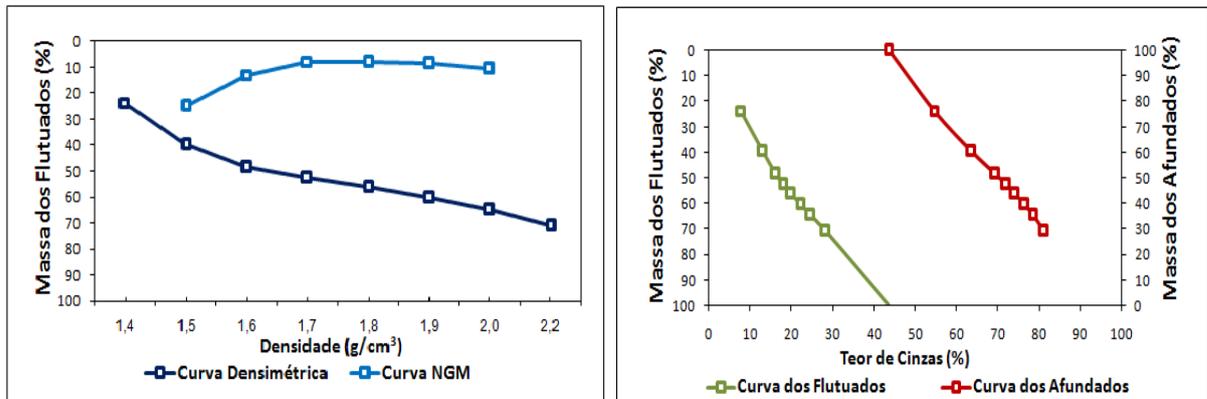


Figura 28: Curvas de Lavabilidade da Camada LC 45/6: 50x1 mm
Fonte: O Pesquisador

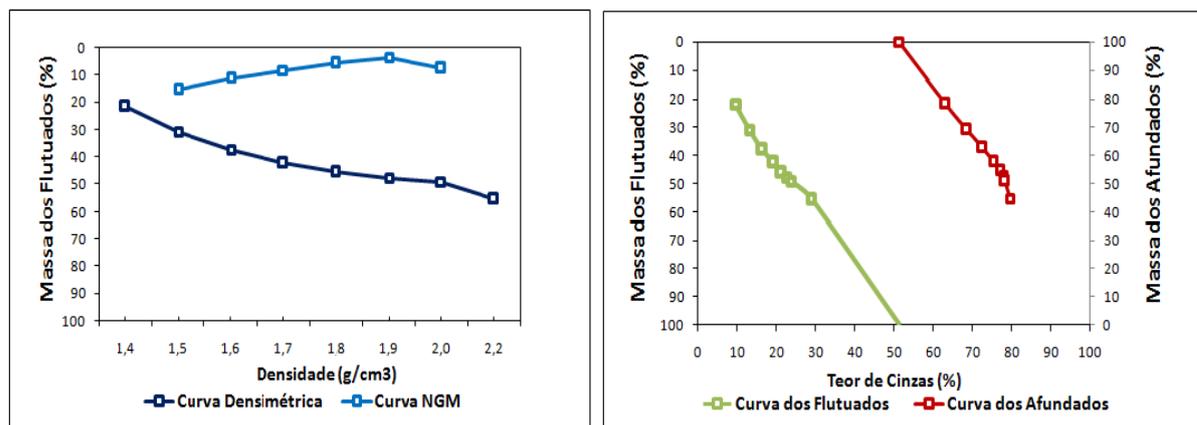


Figura 29: Curvas de Lavabilidade da subcamada LC 45/6: 1x0,25 mm
Fonte: O Pesquisador

Como se pode verificar, nas curvas densimétricas da subcamada LC 45/6, a recuperação mássica na granulometria de 50x1 mm esteve a baixo dos 50% nas primeiras três densidades (1,4 g/cm³, 1,5 g/cm³ e 1,6 g/cm³), tendo-se registrada uma recuperação mássica dos flutuados em 23,55%; 39,60% e 48,45% respectivamente.

Na granulometria de 1x0,25mm de acordo com as curvas densimétricas, apurou-se uma recuperação mássica também inferior a 50% nos três primeiros cortes densimétricos, isto é, 21,68% para 1,4 g/cm³; 30,82% para 1,5 g/cm³ e 37,32% para 1,6 g/cm³. Quanto ao teor de cinzas no corte de 1,6 g/cm³ comparativamente com as duas faixas granulometricas, constatou-se que a faixa

granulométrica 50x1 mm apresentou um teor de 16,22%; enquanto que na granulometria 1x0,25 mm foi apurado um teor de 16,11% na densidade de 1,6 g/cm³.

De acordo com BIRD *apud* SAMPAIO e TAVARES (2005), e em concordância com os resultados exibidos nas curvas de NGM pode-se afirmar que este carvão é ligeiramente beneficiável, pois estão a baixo dos 25%. Por exemplo, na granulometria 50x1 mm o menor valor correspondeu a 7,81% no corte densimétrico 1,7 g/cm³; enquanto que para a granulometria 1x0,25 mm o menor valor correspondeu para o corte densimétrico 1,9 g/cm³ com 3,25%.

Assim, de acordo com os resultados alcançados da análise densimétrica para a subcamada LC 45/6 nas faixas granulométricas 50x1 mm e 1x0,25 mm e em concordância com outros estudos publicados por VASCONCELOS (2005) sobre os carvões de Moatize pode-se corroborar que a subcamada LC 45/6 apresenta o menor teor de cinzas nas duas faixas granulométricas em estudo.

Segundo VASCONCELOS (2005) a subcamada LC 45/6, estratificamente, é a última camada de cima para baixo na ordem cronológica da série produtiva de Moatize. Portanto em conformidade com os resultados corroborados anteriormente, pode se comprovar que esta subcamada apresenta melhores condições tecnológicas visando ao seu beneficiamento gravimétrico, seguida de MLCU, UCB e finalmente a UCT.

4.5 Resultados da análise de enxofre total

No carvão mineral encontram-se inseridos vários componentes elementais como o caso de enxofre total. Este elemento, por exemplo, pode se encontrar em diferentes formas nomeadamente: orgânica, elementar e sulfato.

Esta última forma é a mais comum de todas, podendo ocorrer em forma de pirita (FeS₂). Para este trabalho de Tese em particular, este elemento foi analisado na sua forma total. É importante ressaltar que este elemento a sua presença em grandes proporções no carvão mineral, pode afetar em grande medida o processo de beneficiamento, seja pela qualidade do produto final, tanto no gasto de equipamentos.

Por outro lado, pode criar grandes impactos negativos gerando Drenagem Ácida de Minas (DAM) nos lugares de exploração e deposição afetando negativamente as fontes de captação de água (aquíferos).

Tabela 11: Percentual do Enxofre Total por faixa densimétrica das subcamadas

Faixa densimétrica (g/cm ³)	SUBCAMADAS			
	UCT	UCB	MLCU	LC 45/6
	ENXOFRE TOTAL (%)			
-1,4	0,87	0,85	0,70	0,48
-1,4+1,5	0,99	0,79	0,60	0,64
-1,5+1,6	0,91	0,68	0,50	0,55
-1,6+1,7	0,72	0,57	0,60	0,48
-1,7+1,8	0,80	0,61	0,50	0,56
-1,8,1,9	0,50	0,61	0,50	0,37
-1,9+2,0	0,52	0,33	0,50	0,48
-2,0+2,2	0,90	0,30	0,50	1,09
-2,2+2,2	0,83	0,60	0,80	0,46

Fonte: O Pesquisador

De forma geral, o enxofre total nas amostras das subcamadas de carvão de Moatize se apresenta a baixo de 1%. Correlacionando estes resultados com os publicados por DA SILVA (2018), pode-se constatar que o carvão da Mina da Vale não constitui preocupação com relação a DAM, pois este não a gera em proporções relevantes.

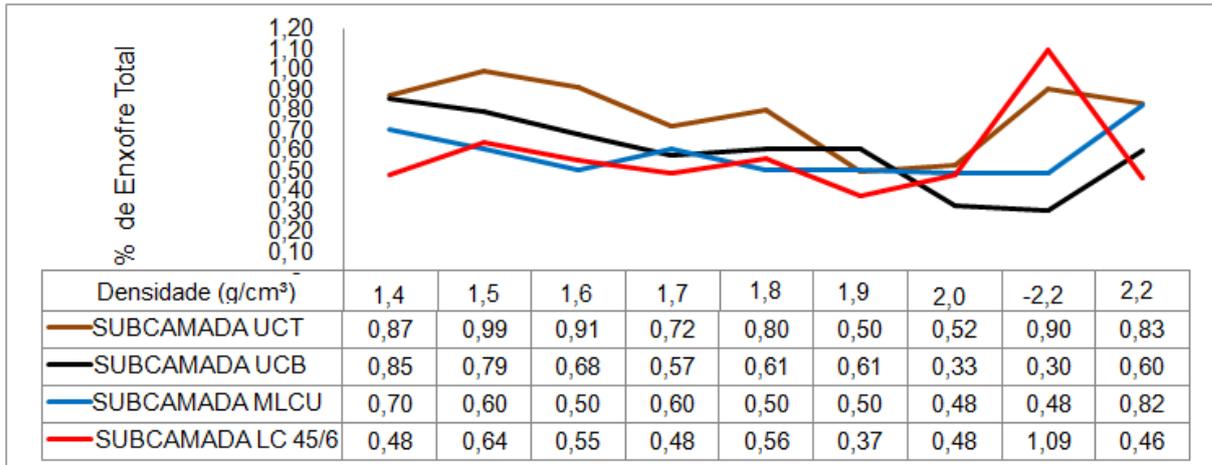


Figura 30: Gráfico em função de Enxofre Total das subcamadas
Fonte: O Pesquisador

De acordo com a figura 30, o enxofre total presente nas subcamadas por exemplo na UCT, variou entre 0,50 a 0,99%. Na densidade 1,5 g/cm³ obteve-se o maior pico percentual (0,99%), isso significa que o teor aumentou, isto é, na amostra da subcamada UCT houve um aumento da matéria orgânica.

Todavia, o menor pico foi registrado na densidade 1,9 g/cm³ com 0,50%, significando que o teor de enxofre total diminuiu neste corte devido à diminuição da matéria orgânica onde o enxofre orgânico se encontra.

Nessas fases, provavelmente o enxofre pirítico seja constante e de forma framboidal. Na densidade 1,9 g/cm³, o enxofre orgânico continua diminuindo (menos matéria orgânica), no entanto o seu valor total aumenta devido a concentração de grãos de pirita (densidades maiores).

Com os resultados anexados (Ver figura 30), pode-se arrimar que o aumento do teor de enxofre total nas densidades 1,5 g/cm³, 1,6 g/cm³ e 2,2 g/cm³ se pressupõe a existência ou a presença de enxofre pirítico na amostra.

O enxofre total para as amostras da subcamada UCB, teve uma tendência ainda menor comparativamente com a subcamada UCT. O maior pico foi registrado na densidade de 1,4 g/cm³ correspondente a 0,85%

Para a subcamada UCB na densidade 1,4 g/cm³ indica-nos que a amostra teve um pequeno percentual de enxofre pirítico. Nos restantes pontos, pode-se constatar

que houve uma diminuição do enxofre total conseqüentemente a diminuição da massa de orgânico.

O resultado de enxofre total da subcamada MLCU comparativamente com os resultados das amostras das subcamadas UCT e UCB, pode-se destacar que para a subcamada MLCU os picos mais significativos foram catalogados nas densidades 2,2 g/cm³ e 1,4 g/cm³. Como foi exarado, constata-se que nas amostra há evidências da presença de enxofre pirítico em pequenas proporções.

Nos restantes pontos, existe uma diminuição significativa do enxofre total. A diminuição nesses pontos é devido à diminuição da matéria orgânica contida neles.

Na forma elementar o enxofre no carvão mineral, pode ocorrer em diferentes formas como se referiu anteriormente. No carvão *ROM* de Moatize de forma geral, este elemento ocorre na sua forma de sulfeto de ferro (FeS₂- Pirita).

No que se refere à subcamada LC 45/6, os resultados do enxofre total de forma geral, a subcamada LC 45/6 apresentaram um menor teor deste elemento apesar de ter sido registrado o maior pico (1,09%) dentre todas as subcamadas em estudo, na densidade 2,2 g/cm³ (flutuado).

Com os dados obtidos pode- se averbar que na amostra flutuada na densidade de 2,2 g/cm³, existem evidências da presença de enxofre pirítico. Nas restantes densidades, as amostras mostraram pouca evidência na existência de enxofre pirítico.

4.6 Resultados de ensaios após a jigagem

O resultado do processo de jigagem é a estratificação do leito, que corresponde à separação das partículas em camadas ou estratos de densidades crescentes desde o topo até a base. Como se expôs na metodologia importa destacar que no caso em particular, foram submetidos testes de jigagem o carvão *ROM* da Mina de Moatize, na granulometria 50x1 mm das subcamadas.

4.6.1 Recuperação mássica da alimentação após a jigagem

Foram realizados vários ensaios para cada uma das camadas em estudo, tendo sido selecionados um resultado mais promissor para cada uma, isto é, aqueles que apresentaram melhores resultados. Por questões metodológicas adotadas pelo pesquisador e para uma melhor compreensão do leitor, foi atribuída uma designação de gavetas, isto é, gaveta **A** para designar o carvão estratificado no topo do jigue

(primeira gaveta do topo); gaveta **B** para referir o carvão estratificado na intermediária (Médio- segunda gaveta) e gaveta **C** para referenciar o carvão estratificado na base ou no fundo do jigge (última gaveta).

Como forma de diminuir a quantidade de material desnecessário a ser alimentado os jigues no circuito dos grossos (Moatize-I), sugere-se a colocação do jigge antes dos ciclones. Com a proposta, da instalação de um jigge pneumático (num processo de pré-lavagem), foi possível quantificar material desnecessário que provavelmente pode ser alimentado aos ciclones de meio denso.

Com base do antes referenciado e para alcançar objetivo essencial que é da retirada do rejeito antes de alimentar a planta de processamento (os ciclones de meio denso), e garantir a redução de teores de cinzas nos produtos finais, foram realizados vários ensaios no jigge.

Após a jigagem, foi considerado o concentrado o carvão estratificado no na gaveta **A** e flutuado na densidade $1,6 \text{ g/cm}^3$ para as quatro subcamadas em estudo.

Porém, foi considerado como rejeito todo o carvão com densidade maior que $1,6 \text{ g/cm}^3$ para a gaveta **A**, e todo o carvão estratificado nas gavetas **B** e **C**. Na figura 28, pode-se constatar resumidamente o processo.

CONCENTRADO (Produto)	Carvão estratificado na gaveta (A) e flutuado na densidade $1,6 \text{ g/cm}^3$. (+ de 40% massa com teores de cinzas abaixo de 10%)	DESTONING (Rejeito)
	Carvão estratificado na gaveta (A). O Flutuado e afundado em $2,2 \text{ g/cm}^3$ e todo o carvão estratificado nas gavetas (B) e (C).	

Figura 31: Quadro resumo do concentrado e rejeito após a jigagem
Fonte: O Pesquisador

Tabela 12: Recuperação mássica após a jigagem

SUBCAMADAS	UCT	UCB	MLCU	LC 45/6
Granulometria (mm)	50x1	50x1	50x1	50x1
Massa alimentada no jigue em (Kg)	51,6	51,6	51,6	51,6
RECUPERAÇÃO MÁSSICA APÓS A JIGAGEM (g)				
GAVETA (A): TOPO	25.300	22.150	19.600	19.900
GAVETA (B): MÉDIO	11.850	17.150	17.350	17.000
GAVETA (C): FUNDO	13.650	11.600	14.550	13.950
PERDAS (g)	0.800	0.700	0.100	0.750
TOTAL (kg)	51,6	51,6	51,6	51,6

Fonte: O Pesquisador

Após a jigagem, a recuperação mássica de cada subcamada foi variando de acordo com as suas características como se pode confirmar na tabela 12. Como os ensaios de jigagem foram realizados com amostras na faixa granulométrica de 50x1 mm o tamanho pode ter influenciado na maior recuperação mássica na gaveta **A** comparativamente com as gavetas subseqüentes. Pode ser também que algumas partículas não tenham atingido uma amplitude ideal que lhes permitissem a sua estratificação na devida gaveta. O fator tamanho das partículas também pode ter influenciado por outro lado o insignificante registro de perdas de material após a jigagem, tendo variado de 0,100 g a 0,800 g como se ilustra na tabela 12.

4.6.2 Recuperação mássica (%) após testes de afunda-flutua e a sua respectiva análise imediata

Após a jigagem de todas as amostras das quatro subcamadas separadamente por cada gaveta, foram quarteadas até a obtenção de uma amostra representativa de três quilos (alíquota).

O quarteamento foi realizado com auxílio do quarteador Jones. Importa sublinhar que da análise imediata das camadas após a jigagem, foi incorporado o teor de cinzas obtido no ensaio de afunda flutua da alimentação só para questões de comparação, para se ter uma idéia do teor de cinzas antes e após a jigagem.

Uma vez obtida a mostra representativa de cada uma das gavetas de cada subcamada, foram realizados os ensaios de afunda-flutua em duas densidades com

o propósito de obter-se três amostras em cada gaveta: Flutuadas em 1,6 g/cm³ e 2,2 g/cm³ e o afundada em +2,2 g/cm³.

Como foi enfatizado anteriormente, para o presente estudo, foi considerado como o concentrado todo o carvão estratificado na gaveta **A** e flutuado na densidade 1,6 g/cm³ para cada subcamada.

Após a realização dos ensaios de afunda-flutua, foram calculadas as respectivas recuperações mássicas percentuais para todas as gavetas e seguidamente a realização de testes de análise imediata para todas as subcamadas e gavetas como se podem corroborar os resultados nas tabelas 13, 14, 15 e 16 respectivamente.

Tabela 13: Resultados de recuperação mássica (%) e análise imediata da subcamada UCT

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Massa (1) (g)	Massa (2) (%)	Rec. Mássica (%)	Umidade (%)	Cinzas após a jigagem (%)	Cinzas Ac Alimentação (%)
-1,5+1,6	552.40	18,44	60,06	0,53	21,45	
+2,0-2,2	2069.10	69,07	48,59	1,07	43,85	
+2,2	374.10	12,49	9,78	0,83	54,01	
TOTAL	2995.6	100				
GAVETA (A): TOPO						
-1,5+1,6	367.30	12,23	39,94	0,49	23,40	
+2,0-2,2	968.80	32,26	22,75	0,55	50,76	
+2,2	1667.30	55,51	43,60	2,66	76,76	
TOTAL	3003.40	100				
GAVETA (B): MÉDIO						
-1,5+1,6	0	0	0	0	0	
+2,0-2,2	1220.20	40,631	28,66	1,12	83,97	
+2,2	1782.90	59,369	46,62	0,61	88,61	
TOTAL	3003.10	100				
GAVETA (C): FUNDO						

Fonte: O Pesquisador

De acordo com a tabela 13, pode-se testemunhar que a recuperação mássica da subcamada UCT após a jigagem foi de 60,06% na densidade 1,6 g/cm³ com um teor de cinzas de 21,45% da massa total de aproximadamente três quilos submetidos a ensaios de afunda-flutua.

Comparativamente com as outras gavetas na mesma densidade (1,6 g/cm³), observa-se que a recuperação foi-se diminuindo. Na gaveta **C**, por exemplo, não se

obteve nenhuma recuperação para a subcamada UCT, porque todo o carvão teve uma maior densidade que 1,6 g/cm³.

Paralelamente a análise imediata da subcamada UCT, pode-se comprovar que a medida que a densidade aumentava em cada uma das gavetas, o teor de cinzas ia-se incrementando.

Sendo o objetivo fundamental da pré-lavagem é a remoção ou a retirada de material desnecessário (rejeito), num processo antes de alimentar os ciclones de meio denso, por exemplo, para o presente trabalho de Tese, foi definida a densidade 1,6 g/cm³ (flutuado) para o carvão estratificado na gaveta **A** (topo) como se referiu no início da discussão.

Tabela 14: Resultados da recuperação mássica (%) e análise imediata da subcamada UCB

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Massa (1) (g)	Massa (2) (%)	Rec. Mássica (%)	Umidade (%)	Cinzas após a jigagem (%)	Cinzas Ac Alimentação (%)
-1,5+1,6	1600.40	53,24	63,84	0,96	17,28	46,46
+2,0-2,2	1272.60	42,33	27,83	1,18	39,95	
+2,2	133.20	4,43	6,85	1,22	51,65	
TOTAL	3006.20	100				
GAVETA (A): TOPO						
-1,5+1,6	672.30	22,33	26,82	0,92	20,76	
+2,0-2,2	2000.10	66,43	43,73	0,77	64,74	
+2,2	338.40	11,24	17,40	2,65	76,00	
TOTAL	3010.80	100				
GAVETA (B): MÉDIO						
-1,5+1,6	234.10	7,78	9,34	1,00	22,06	
+2,0-2,2	1300.80	43,24	28,44	1,12	83,77	
+2,2	1473.40	48,98	75,75	1,29	84,77	
TOTAL	3008.30	100				
GAVETA (C): FUNDO						

Fonte: O Pesquisador

Como se pode ver na tabela 14, constata-se que a subcamada UCB na densidade de 1,6 g/cm³ na gaveta **A** (concentrado), se obteve uma recuperação mássica de 63,84% com um teor de cinzas de 17,28%.

Comparativamente com a subcamada UCT, na mesma densidade (1,6 g/cm³), a subcamada UCB teve uma maior recuperação mássica em 3,78% e uma diminuição de teor de cinzas em 3,17%.

Após a jigagem para a subcamada UCB, de 100% de massa alimentada no jigge na densidade 1,6 g/cm³, seria possível retirar 36,16% de material desnecessário. Portanto, numa perspectiva de alimentar a planta com a subcamada UCB, seria possível alimentar o primeiro ciclone com 63,84% de massa com 17,28% de teor de cinzas na densidade de 1,6 g/cm³.

Tabela 15: Resultados da recuperação mássica (%) e análise imediata da subcamada MLCU

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Massa (1) (g)	Massa (2) (%)	Rec. Mássica (%)	Umidade (%)	Cinzas após a jigagem (%)	Cinzas Ac Alimentação (%)
-1,5+1,6	195.60	64,86	62,70	1,12	13,95	
+2,0-2,2	1000.60	33,30	22,87	1,30	39,08	
+2,2	56.30	1,90	3,66	0,55	50,76	
TOTAL	3007.50	100				
GAVETA (A): TOPO						
-1,5+1,6	798.80	26,56	25,67	0,87	18,08	
+2,0-2,2	1753.00	58,29	40,06	1,17	41,42	
+2,2	455.60	15,15	29,62	0,87	73,42	
TOTAL	3007.40	100				
GAVETA (B): MÉDIO						
-1,5+1,6	361.80	12,02	11,63	1,23	19,88	
+2,0-2,2	16.22	53,88	37,07	1,00	80,57	
+2,2	1026.50	34,10	66,73	1,12	83,97	
TOTAL	3010.30	100				
GAVETA (C): FUNDO						

Fonte: O Pesquisador

A tabela 15 elucida os resultados da recuperação mássica e de análise imediata após a jigagem da subcamada MLCU. Nela, constata-se que densidade 1,6 g/cm³, se obteve uma recuperação mássica de 62,70% com um teor de cinzas de 13,95%. Comparativamente com a subcamada UCB na mesma densidade, a subcamada MLCU teve uma ligeira diminuição da recuperação mássica um em 1,14% e uma diminuição de teor de cinzas em 3,33%.

De acordo com os resultados obtidos para a subcamada MLCU, e fazendo-se uma comparação com os resultados obtidos para as subcamadas UCT e UCB, pode-se inferir que a MLCU apresenta melhores condições tecnológicas visando para seu beneficiamento gravimétrico.

Tabela 16: Resultados da recuperação mássica (%) e análise imediata da subcamada LC 45/6

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Massa (1) (g)	Massa (2) (%)	Rec. Mássica (%)	Umidade (%)	Cinzas após a jigagem (%)	Cinzas Ac Alimentação (%)
-1,6	860.70	85,37	68,91	1,56	9,29	43,62
+2,0-2,2	147.50	14,63	15,45	1,10	38,46	
+2,2	0	0	0	0	0	
TOTAL	1008.20	100				
GAVETA (A): TOPO						
-1,6	298.00	29,71	23,86	1,02	15,97	
+2,0-2,2	556.00	55,46	58,26	1,09	40,46	
+2,2	149.10	14,86	18,26	0,84	61,00	
TOTAL	1003.10	100				
GAVETA (B): MÉDIO						
-1,6	90.40	8,96	7,24	0,97	16,18	
+2,0-2,2	250.90	24,87	26,29	1,41	76,85	
+2,2	667.50	66,17	81,74	1,15	83,49	
TOTAL	1008.80	100				
GAVETA (C): FUNDO						

Fonte: O Pesquisador

Os resultados da tabela 16, correspondem para a subcamada LC 45/6. Os mesmos asseveram que ela na densidade 1,6 g/cm³ para a gaveta **A**, se obteve uma recuperação mássica de 68,91%, com um teor de cinzas de 9,29%.

Comparativamente com a subcamada MLCU, na mesma densidade a camada LC 45/6 teve um aumento de recuperação mássica em 6,21% e uma diminuição de teor de cinzas em 4,66%.

Considerando um processo de pré-lavagem (**destoning**) e comparando os resultados obtidos com os das três primeiras camadas anteriormente discutidas, a subcamada LC 45/6 apresentou menor percentual de material a ser removido (rejeito), isto é, ela teve maior recuperação mássica na densidade 1,6 g/cm³ considerado como o concentrado. Dessarte, os resultados apurados e comparados com os das três subcamadas discutidas anteriormente, pode-se atestar que a LC 45/6 apresentou excelentes condições tecnológicas visando para seu beneficiamento.

4.6.3 Resultados de Recuperação mássica por camada

As figuras 32, 33, 34, e 35, ilustram os resultados obtidos na recuperação mássica das subcamadas em estudo na granulometria 50x1 mm após os testes de jigagem. Enquanto que as figura 33, 34, 35 e 36, confirmam os resultados dos teores de cinzas com relação às recuperações mássicas das mesmas.

Os resultados foram obtidos após os ensaios no jigge a escala piloto e posteriormente executados os ensaios de afunda-flutua das amostras de cada leito em duas densidades como se pode ver na figura 32. De evocar que após a jigagem, foram quarteadas as amostras para a obtenção de uma alíquota de três quilos para cada uma das quatro subcamadas em cada uma das três gavetas e posteriormente submetidas ao ensaio de afunda-flutua em duas densidades 1,6 g/cm³ e 2,2 g/cm³.

O objetivo de realizar dois cortes densimétricos, foi com o intuito de obterem-se três produtos: flutuado em 1,6 g/cm³, flutuado e afundado em 2,2 g/cm³.

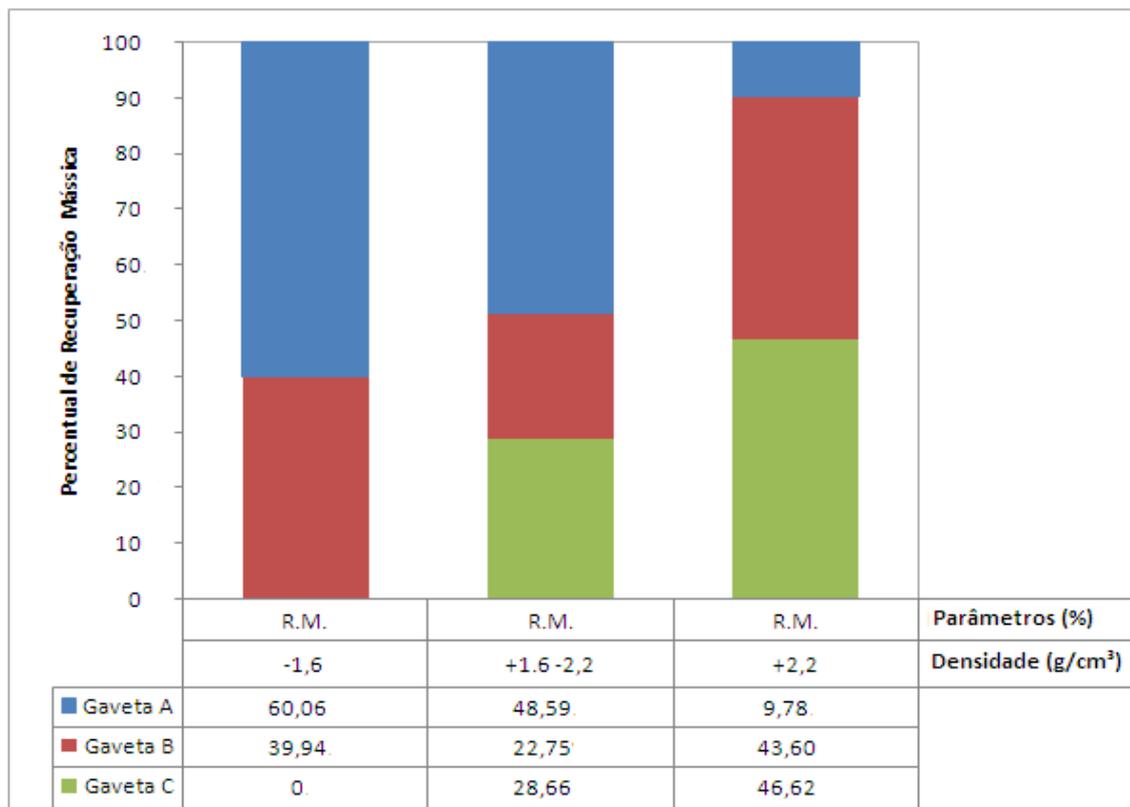


Figura 32: Gráfico de Recuperação Mássica da subcamada UCT
Fonte: O Pesquisador

A figura 32 testifica os resultados da recuperação mássica da subcamada UCT. De destacar que estes resultados foram obtidos após a realização dos ensaios de

afunda-flutua como se fez referência anteriormente. Assim, densidade 1,6 g/cm³ para as gavetas **A**, **B** e **C** se obtiveram as seguintes recuperações mássicas: 60,06%; 39,94% e 0% respectivamente. Na gaveta **C** na densidade de 1,6 g/cm³ não se obteve nenhuma recuperação, pois o material foi mais denso que 1,6 g/cm³. Isto é, o zero por cento significa que o carvão da subcamada UCT na densidade 1,6 g/cm³ na gaveta **C** apresentou uma densidade maior a que ela foi submetida por isso não flutuou, tendo afundado todo o carvão na densidade em análise.

No processo de pré-lavagem para a subcamada UCT, seria possível retirar 39,94% da massa alimentada no jigge (**rejeito**), isto é, seria possível alimentar o circuito dos grossos com uma massa em torno de 60,06% de carvão com uma densidade de 1,6 g/cm³.

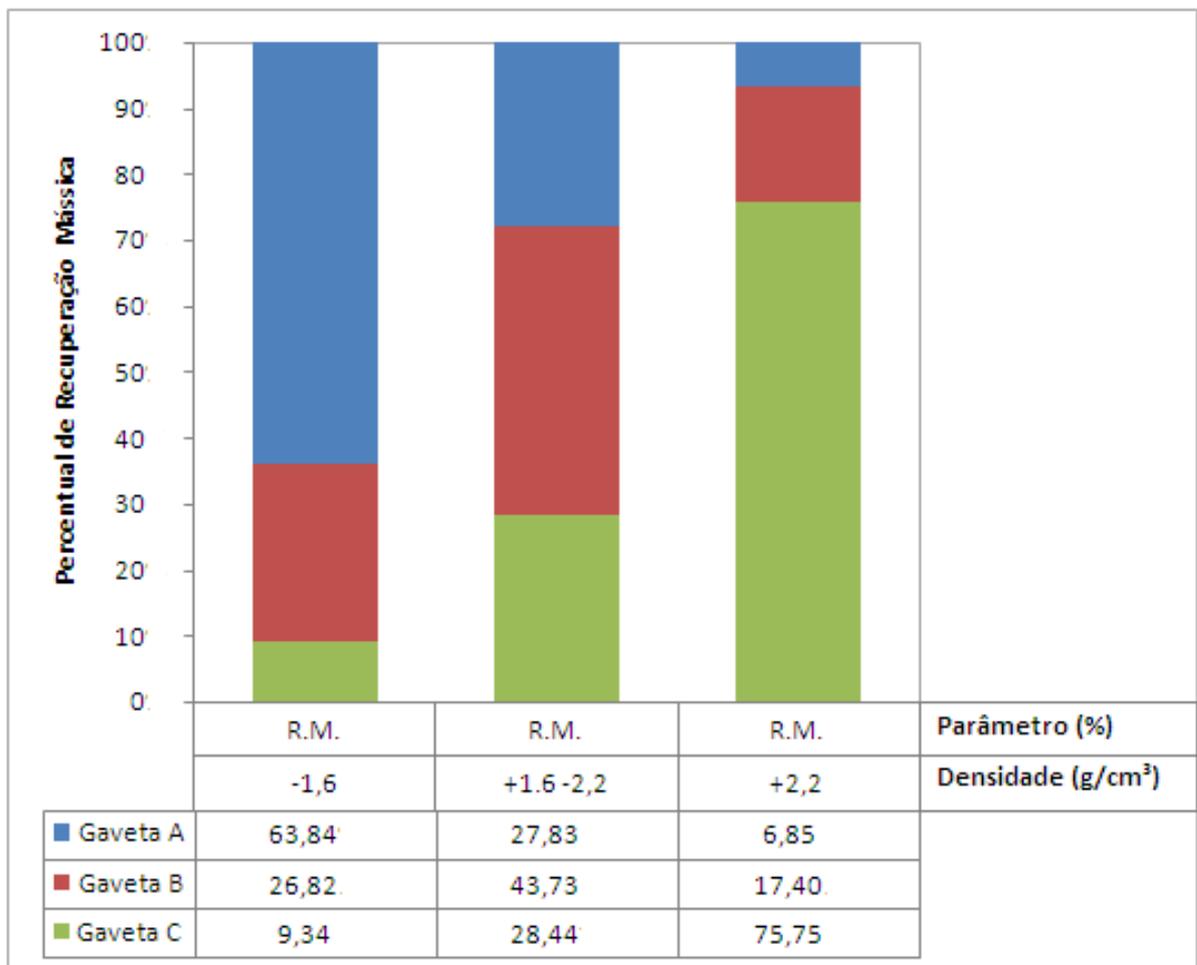


Figura 33: Gráfico de Recuperação Mássica da subcamada UCB
Fonte: O Pesquisador

A figura 33 ilustra o resultado do percentual de recuperação mássica da subcamada UCB. É de salientar que a medida que se aumentava a densidade para

o carvão estratificado na gaveta **A**, a recuperação ia-se diminuindo. Como se pode apurar, na densidade de 1,6 g/cm³ se obteve 63,84% de recuperação mássica, e na densidade 2,2 g/cm³ (flutuado) apurou-se uma recuperação mássica de 27,83% e finalmente o afundado representou uma recuperação de 6,85% de recuperação mássica. Por tanto num processo de pré-lavagem para a subcamada UCB, na densidade 1,6 g/cm³, é possível retirar 36,16% de material desnecessário.

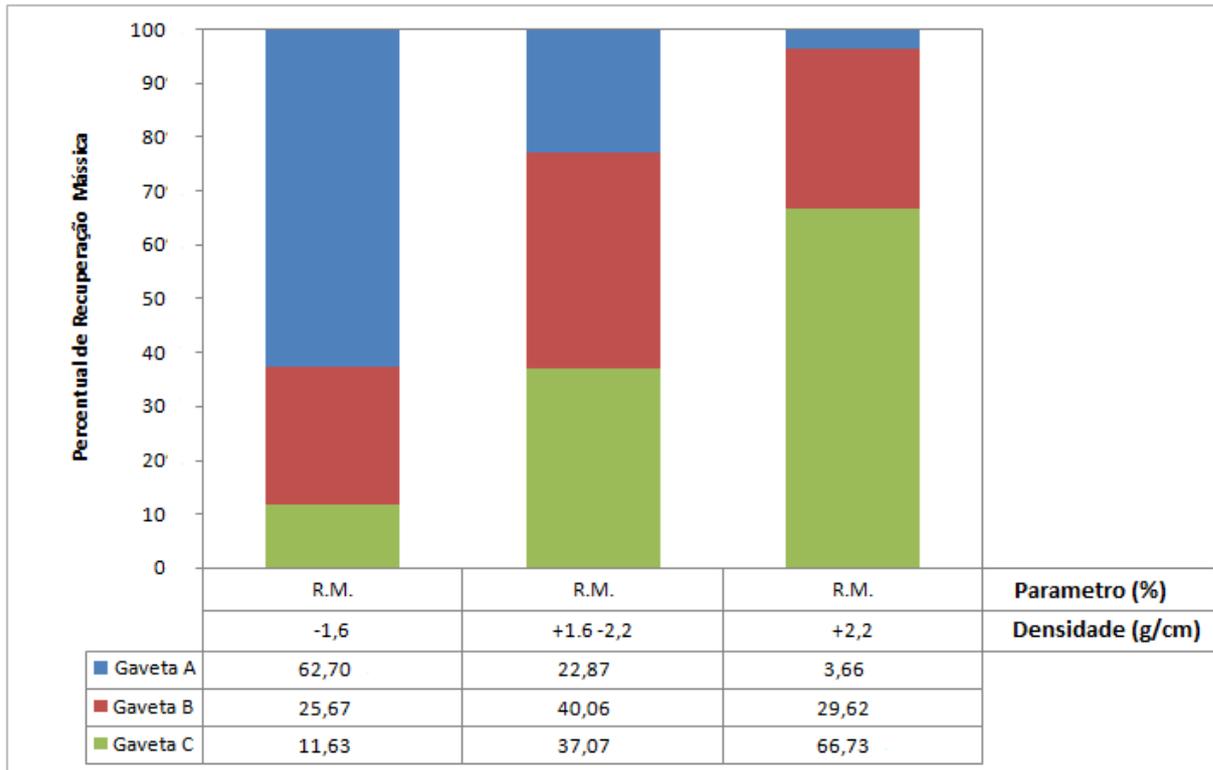


Figura 34: Gráfico de Recuperação Mássica da subcamada MLCU
Fonte: O Pesquisador

O resultado da recuperação mássica após a jigagem da subcamada MLCU é exibido na figura 34. Para o material estratificado na gaveta **A**, pode-se testificar que na medida em que se aumentava a densidade (no processo de afunda - flutua), o percentual da recuperação mássica se diminuía.

No processo de pré-lavagem para a subcamada MLCU, os resultados são bem aproximados com os da subcamada UCB. Nesta subcamada, seria possível a retirada de 37,30% da massa, enquanto que para a UCB seria possível retirar um total de 36,16% na densidade 1,6 g/cm³.

Em outra análise, pode se sustentar que estas duas subcamadas possuem condições tecnológicas para o beneficiamento semelhantes. Todavia, pode se sustentar com a hipótese de terem sofrido o mesmo evento geológico no tempo da formação do carvão das subcamadas da bacia carbonífera de Moatize (REAL, 1978), ratificado por VASCONCELOS (2005).

Porém, existem várias razões que justificam a sua semelhança como tais: condições estruturais, tectônicas e operacionais (escavação, amostragem, armazenamento, manuseamento), entre outras.

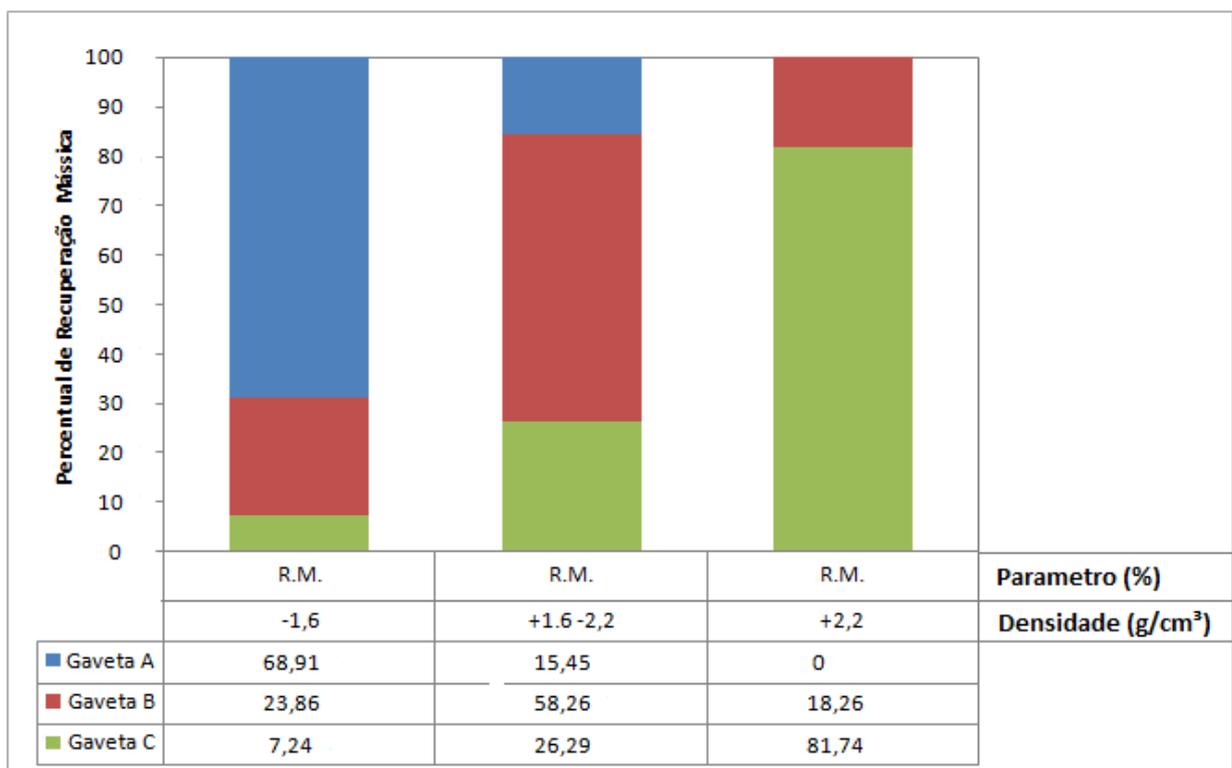


Figura 35: Gráfico de Recuperação Mássica da subcamada LC 45/6
Fonte: O Pesquisador

Na figura 35 são ilustrados os resultados da camada LC 45/6. A camada LC 45/6 de acordo com os resultados apurados e sustentando-se com outros estudos publicados, ela apresenta excelentes condições tecnológicas para o beneficiamento.

A LC 45/6 é a última subcamada na seqüência estratigráfica da bacia de Moatize. Uma vez realizado o processo de jigagem e feita a análise densimétrica das amostras obtidas nos três leitos estratificados, foi possível obter 68,91% de massa flutuada na densidade de 1,6 g/cm³ para o carvão estratificado na gaveta **A**.

Baseando-se na teoria dos principais fatores de formação dos carvões (profundidade, temperaturas e pressões), pode-se sustentar que esses fatores contribuíram para que a LC 45/6 tivesse estas condições favoráveis de formação e conseqüentemente excelentes parâmetros de avaliação para carvões de Moatize. A título de exemplo, pode-se certificar que até na densidade $+2,2 \text{ g/cm}^3$ todo o carvão flutuou, razão pela qual não se registrou uma recuperação nessa densidade (carvão menos denso).

Num processo de pré-lavagem, para a subcamada em análise, seria possível retirar cerca de 31% de carvão desnecessário para o beneficiamento, sendo os restantes 69% alimentado o circuito de beneficiamento dos grossos.

4.6.4 Recuperações mássicas e seus teores de cinzas por gaveta para cada subcamada

De igual modo, foram plotados gráficos referentes às recuperações mássicas com relação aos seus respectivos teores de cinzas para cada subcamada como se pode testemunhar nas figuras 36, 37, 38 e 39, correspondentes as subcamadas em estudo.

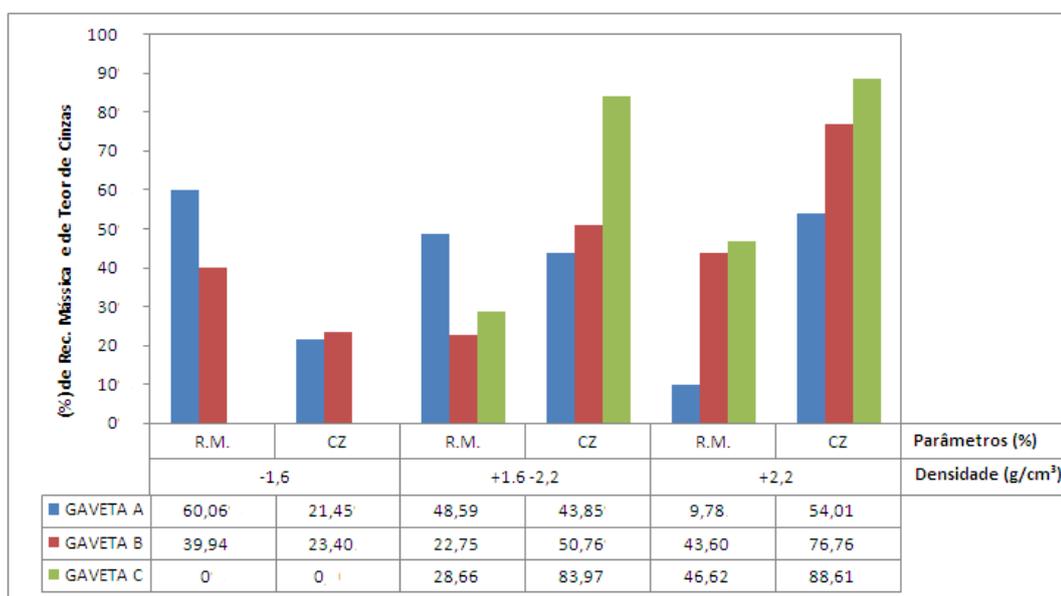


Figura 36: Gráfico de Recuperação Mássica e teor de cinzas da subcamada UCT
Fonte: O Pesquisador

A figura 36 elucida o percentual de recuperações mássicas e respectivos teores de cinzas de carvão estratificado nas gavetas **A**, **B** e **C** após a realização do teste de jigagem e análise imediata (cinzas) para as amostras da subcamada UCT. Como se

pode corroborar, à medida que a densidade se aumentava para a gaveta **A**, a recuperação mássica foi se diminuindo. Por outro lado, com relação ao teor de cinzas, pode se afirmar que enquanto o percentual de recuperação mássica ia-se diminuindo, o percentual do teor de cinzas se incrementava em todas as gavetas.

Uma vez tendo sido considerado o concentrado todo o carvão estratificado na gaveta **A** e flutuado na densidade 1,6 g/cm³ (processo de pré-lavagem), garante-se que para a subcamada UCT, seria possível retirar cerca de 39,94% de material desnecessário (rejeito) e alimentar os ciclones com 60,06% de massa (concentrado), com um teor de cinzas de 21,45%.

Importante destacar que este processo de pré-lavagem pode proporcionar a redução de gasto de energia (*índice*), podendo assim evitar o desgaste excessivo dos equipamentos, possibilitando maior vida útil da planta de beneficiamento, assim como evitando a geração de resíduos desnecessários que podem posteriormente causar problemas ao meio ambiente.

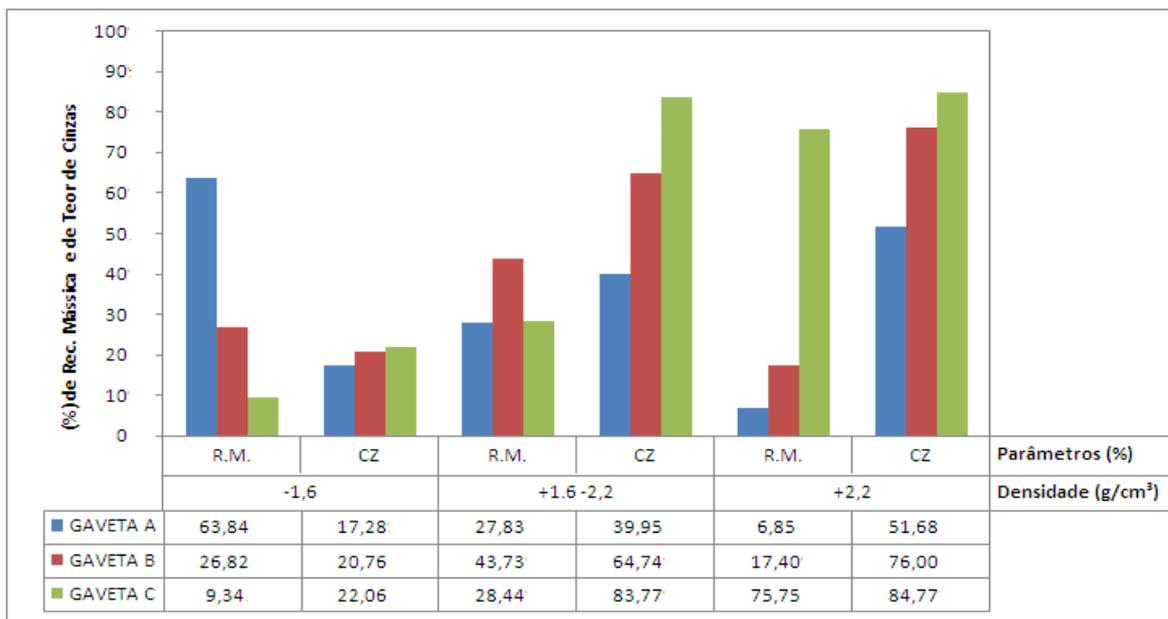


Figura 37: Gráfico de Recuperação Mássica e de teor de cinzas da subcamada UCB
 Fonte: O Pesquisador

O gráfico de recuperação mássica e os respectivos teores de cinzas do carvão estratificado nas gavetas **A**, **B** e **C** da subcamada UCB é exposto na figura 37. Os resultados obtidos na gaveta **A** para a subcamada UCB comparativamente com os da subcamada UCT, na mesma gaveta, pode-se constatar que ambas as

subcamadas apresentaram um comportamento similar com relação às recuperações mássicas e os respectivos teores de cinzas. À medida que aumentava a densidade de corte em g/cm^3 , a recuperação mássica ia-se diminuindo e os teores de cinzas iam-se aumentando.

Os teores de cinzas foram diretamente proporcionais a seqüência da estratificação dos leitos no processo da jigagem. Com os resultados ilustrados na figura 33, e de acordo com o objetivo do presente estudo como já foi referido anteriormente, foi considerado como o rejeito todo o carvão flutuado e afundado na densidade $2,2 \text{ g/cm}^3$ mais todo o carvão estratificado nas gavetas **B** e **C** para cada uma das quatro camadas em estudo.

Perante o exposto, significa que foi considerado o concentrado todo o carvão estratificado na gaveta **A** e flutuado na densidade $1,6 \text{ g/cm}^3$. Com esta base de análise e com a proposta sugerida de uma rota de beneficiamento, para a camada UCB, se garante que seria possível retirar cerca de 36,06% de material desnecessário (**rejeito**) e alimentar os ciclones com cerca de 63,84% de massa (**concentrado**), com um teor de cinzas de 17,28%.

Com quanto, pode-se assegurar que os leitos de carvão menos denso se estratificaram no topo e o carvão mais denso foi estratificado no fundo do jigge, conseqüentemente os seus teores de cinzas forão aumentando nessa ordem.

Relativamente ao carvão a ser retirado neste processo de jigagem, para cada camada apresenta percentuais diferentes já que cada uma apresenta distintas particularidades, podendo ser influenciado por questões operacionais, de formação ou mesmo de manuseamento durante a amostragem e na hora de realização das análises laboratoriais.

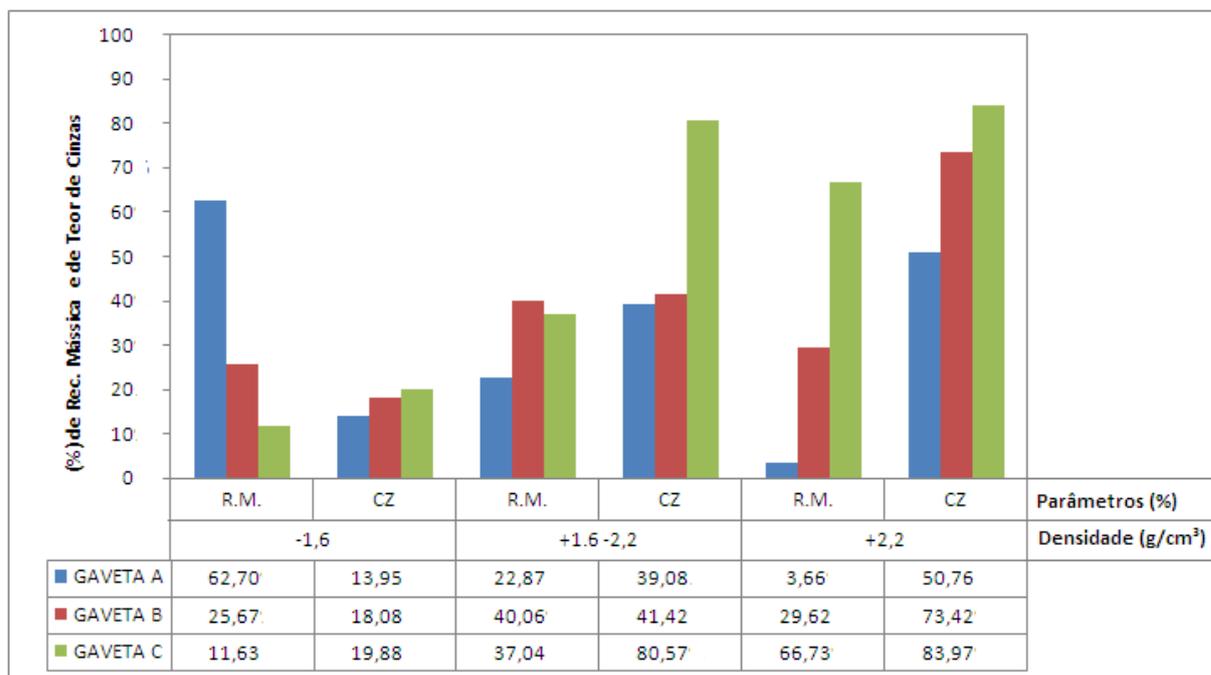


Figura 38: Gráfico de Recuperação Mássica e teor de cinzas da subcamada MLCU
Fonte: O Pesquisador

Os resultados da camada MLCU referentes à recuperação mássica e os seus respectivos teores de cinzas são apresentados na figura 38.

Em conformidade com a figura 38, pode-se constatar que os teores de cinzas das amostras da camada MLCU, foram-se incrementando à medida que aumentava a densidade, isto é, o carvão estratificado no topo (gaveta- **A**), apresentou menores teores de cinzas comparativamente com o carvão estratificado nos leitos subsequentes, quer dizer, nas gavetas **B** e **C** respectivamente.

A camada MLCU quanto a recuperação mássica de carvão estratificado na gaveta **A** e flutuado na densidade de corte de 1,6 g/cm³, apresentou um percentual mássico similar a da camada UCB nas mesmas condições. Com relação aos seus teores de cinzas no corte de 1,6 g/cm³, elas variaram um pouco. Para a amostra da camada UCB no corte anteriormente referido, foi registrado um teor de cinzas de 17,28%; enquanto que para a camada MLCU apresentou um teor de cinzas de 13,95%.

Para uma possível rota de beneficiamento projetada para a subcamada MLCU, de 100% de carvão alimentado no circuito, seria possível retirar cerca de 37,30% de

material desnecessário no corte densimétrico de 1,6 g/cm³ (rejeito) e alimentar os ciclones de meio denso com cerca de 62,70% de massa (**concentrado**), e 13,95% de teor de cinzas.

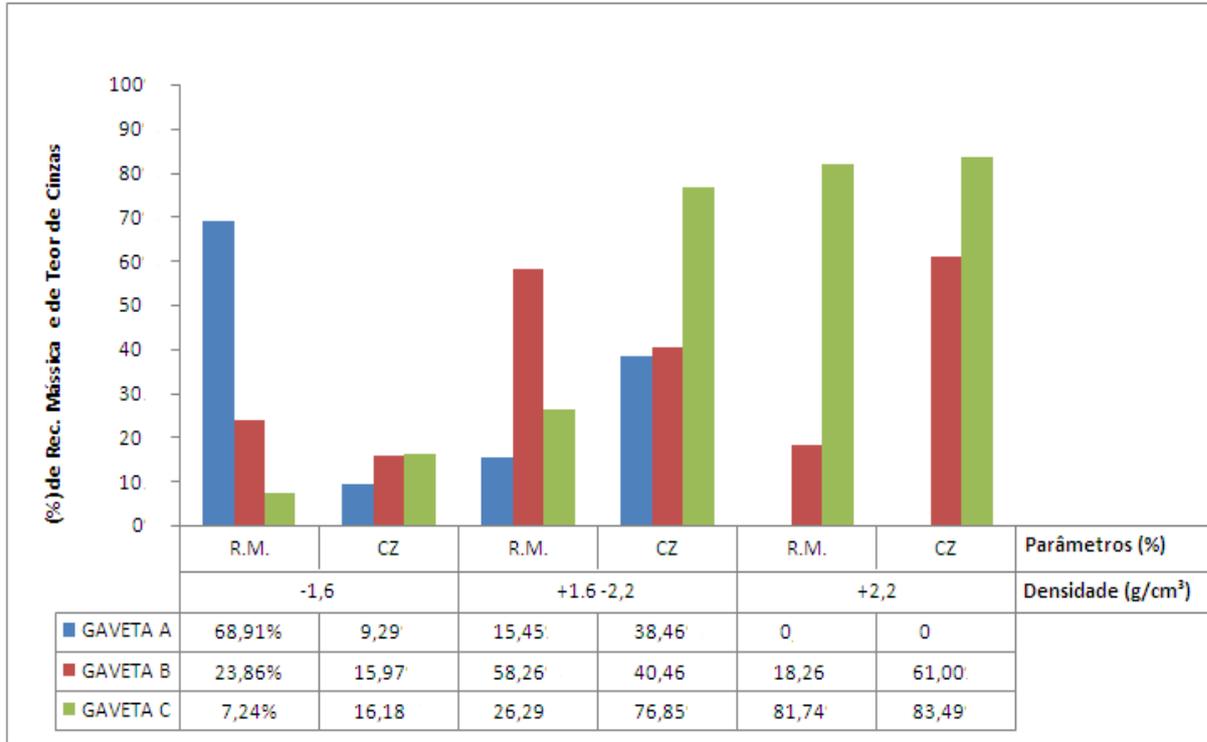


Figura 39: Gráfico de Recuperação Mássica e Teor de Cinzas da subcamada LC 45/6
 Fonte: O Pesquisador

Os resultados de recuperação mássica e seus respectivos teores de cinzas após a jigagem da subcamada LC 45/6 são apresentados na figura 39. Comparativamente com as três amostras das camadas anteriormente discutidas, pode-se assegurar que a LC 45/6 apresenta melhores condições tecnológicas. Ora vejamos: apresentou uma recuperação mássica no corte densimétrico de 1,6 g/cm³ para a gaveta **A**, de 68,91% com 9,29% de teor de cinzas.

Num processo de pré-lavagem (**destoning**) para a subcamada LC 45/6, pode-se depreender que a mesma pode alimentar a planta de beneficiamento no circuito dos grossos (ciclones) com 68,91% de massa. Por outro lado, se estima a retirada de uma massa de rejeito de 32,09% no corte de 1,6 g/cm³. Como se pode confirmar no gráfico 35, no corte densimétrico de 2,2 g/cm³, todo o material flutuou. Isto nos remete afirmar que todo o carvão estratificado na gaveta **A** teve menor densidade que 2,2 g/cm³.

De forma geral, de acordo com os resultados apurados relativamente às subcamadas UCT, UCB e MLCU, pode-se afirmar que das três camadas anteriormente discutidas neste estudo, a LC 45/6 é a que apresentou melhores resultados no que tange a recuperação mássica assim como no teor de cinzas na faixa densimétrica de 1,6 g/cm³. De forma global para toda a gaveta **A**, considerando os três cortes densimétricos definidos para esta análise, a camada LC 45/6 se registrou um teor de cinzas promédio de 24%; enquanto que para as subcamadas UCT, UCB e MLCU foram registrados promédios de 40%, 36% e 35% respectivamente.

4.6.5 Recuperações mássicas das subcamadas estratificadas em cada gaveta

Numa massa total de 51,6 kg de carvão **ROM** de cada camada separadamente, na granulometria de 50x1 mm, foi alimentada ao jig. Após a jigagem, para cada camada foi retirado o carvão e separado de acordo com a sua gaveta de estratificação. Nesse processo, foram conformados três produtos um do topo, outro da intermediária e finalmente o do fundo. Para cada um dos produtos, para melhor avaliação tecnológica de cada componente, foram elaborados gráficos ilustrativos com a finalidade de exemplificar por gaveta as recuperações mássicas de todas as subcamadas. Nesse âmbito, as figuras 40, 41 e 42 ilustram as recuperações mássicas das camadas em separado para cada gaveta.

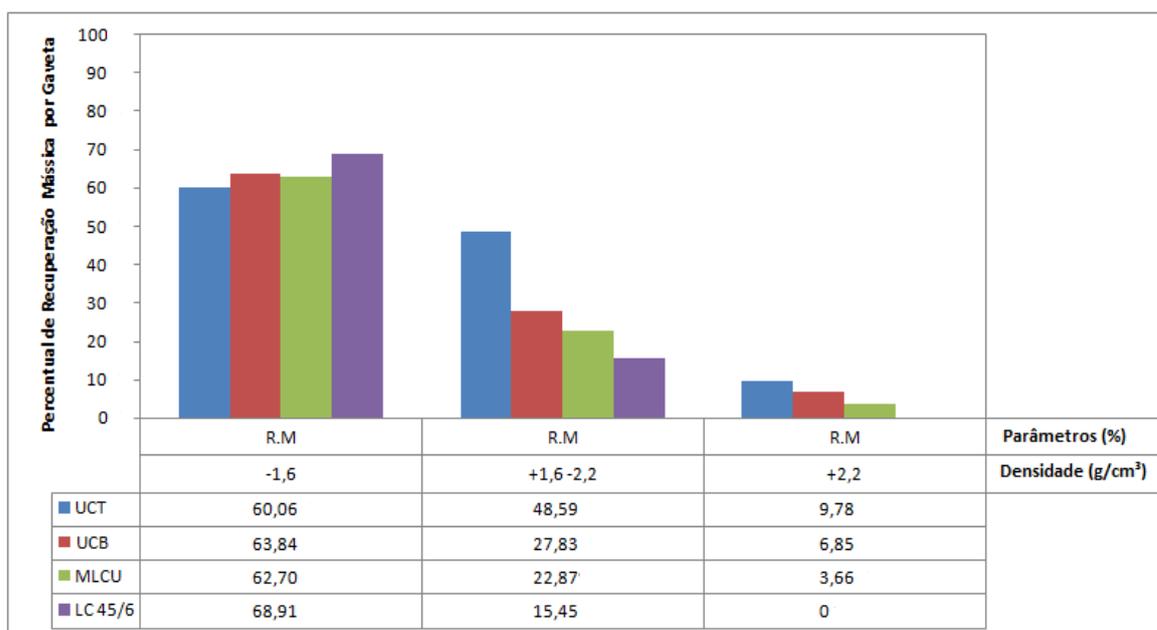


Figura 40: Gráfico de Recuperação Mássica da gaveta A
Fonte: O Pesquisador

Diante disso, a figura 40 apresenta a recuperação mássica das subcamadas do carvão estratificado na gaveta **A**. De acordo com os resultados nota-se que todas as subcamadas no corte densimétrico de 1,6 g/cm³, elas tiveram uma recuperação mássica acima de 60% de concentrado, isto é, 60,06% de massa para a subcamada UCT, 63,84% de massa recuperada para a subcamada UCB, 62,70% de massa para a MLCU e finalmente 68,91% de massa para a subcamada LC 45/6 respectivamente

Com tudo, é notável que a subcamada LC 45/6 apresentou uma maior recuperação mássica com relação às outras subcamadas. Portanto, analisando de forma geral e pelas características de toda a camada Chipanga, pode-se inferir que elas apresentam características semelhantes.

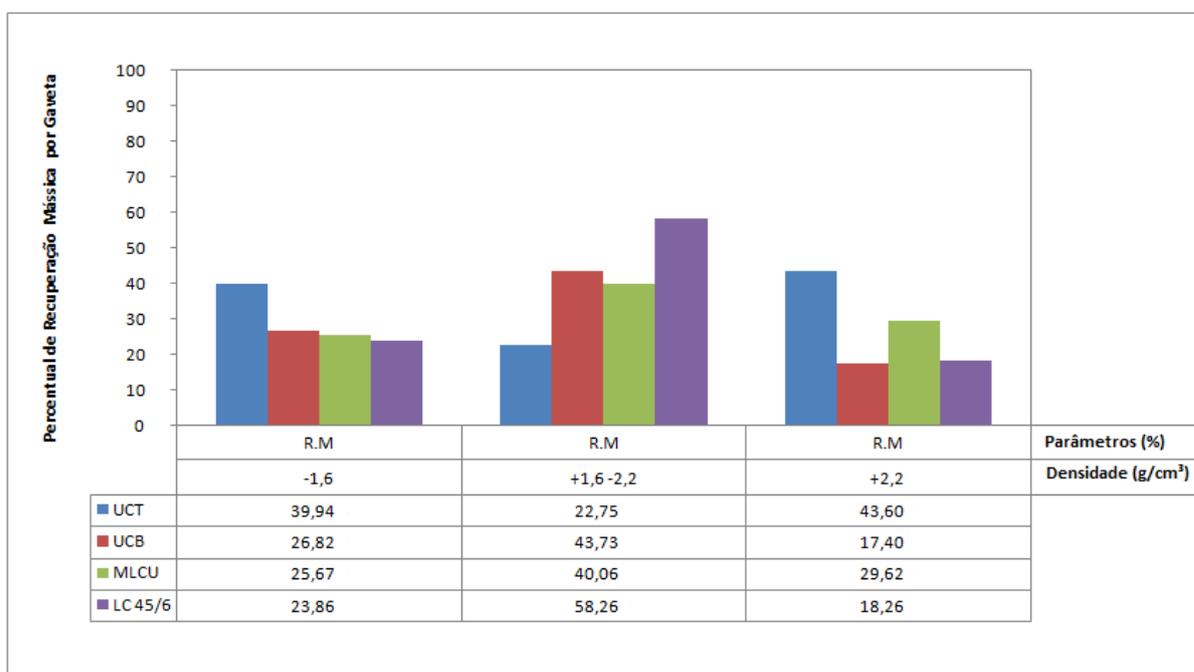


Figura 41: Gráfico de Recuperação Mássica da gaveta B
Fonte: O Pesquisador

Os resultados das recuperações mássicas das subcamadas para a gaveta **B** são elucidados na figura 41. Todo o carvão estratificado nesta gaveta e de acordo com a proposta em abordagem, foi considerado como estéril/rejeito. Num processo de pré-lavagem, proposto para este presente trabalho, todo este carvão poder-se á ser removido mesmo àquele que flutuou no corte densimétrico de 1,6 g/cm³. Dá para perceber então que para o carvão estratificado na gaveta **B**, as recuperações mássicas foram bem distintas nos três cortes densimétricos estabelecidos neste presente trabalho.

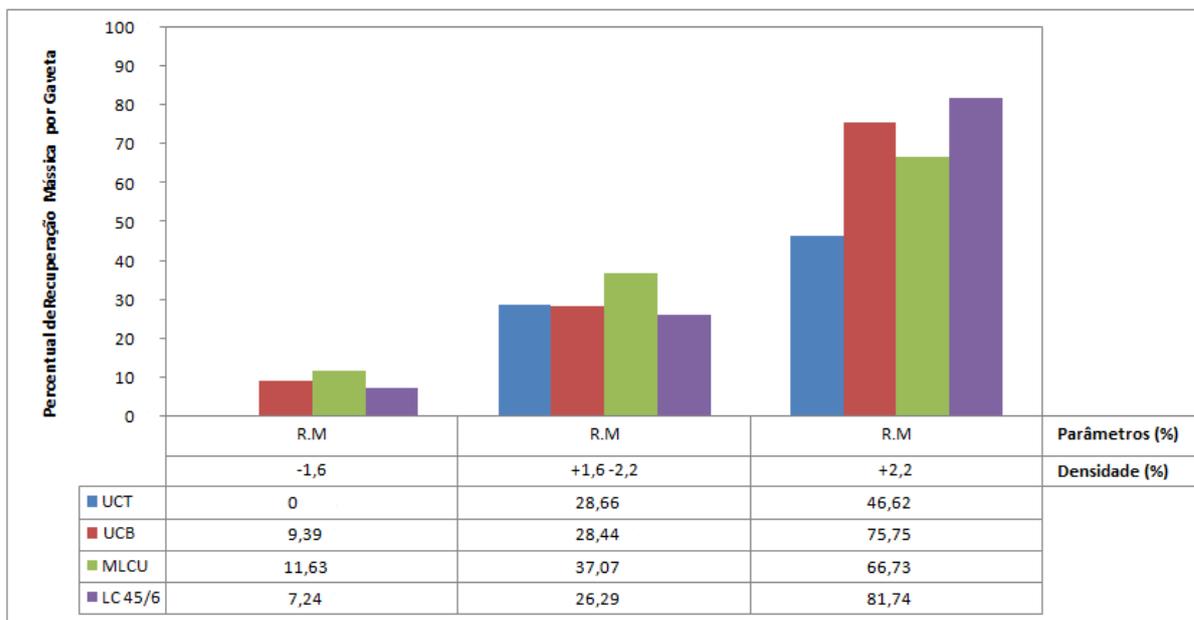


Figura 42: Gráfico de Recuperação Mássica da gaveta C
Fonte: O Pesquisador

A figura 42 exhibe o carvão estratificado no fundo do jigge designado por gaveta **C**. De acordo com os resultados pode-se certificar que a subcamada UCT, no corte densimétrico de 1,6 g/cm³ todo o material afundou, isso significa que o carvão estratificado nesta gaveta, teve maior densidade que 1,6 g/cm³. Comparando todas as camadas, para a gaveta em análise, nota-se que a camada que apresentou maior percentual de recuperação mássica no corte de 1,6 g/cm foi a MLCU com 11,63%, seguida de UCB com 9,39% e finalmente a subcamada LC 45/6 com 7,24%.

Estes resultados nos remetem em afirmar que o carvão estratificado na gaveta **C** foi mais denso comparativamente com o estratificado nas gavetas anteriormente discutidas.

De acordo com os resultados anteriormente apresentados, pode-se certificar que todo o carvão estratificado nesta gaveta, para um processo de pré-lavagem, seria totalmente descartado.

4.6.6 Recuperação mássica das subcamadas estratificadas em cada gaveta e seus respectivos teores de cinzas

Dando seguimento na fundamentação dos dados de recuperação das massas contidas nas gavetas para cada subcamada e seus respectivos teores de cinzas, foram elaboradas gráficas os quais estão representados nas figuras 43, 44 e 45 correspondendo as gavetas **A**, **B** e **C** respectivamente.

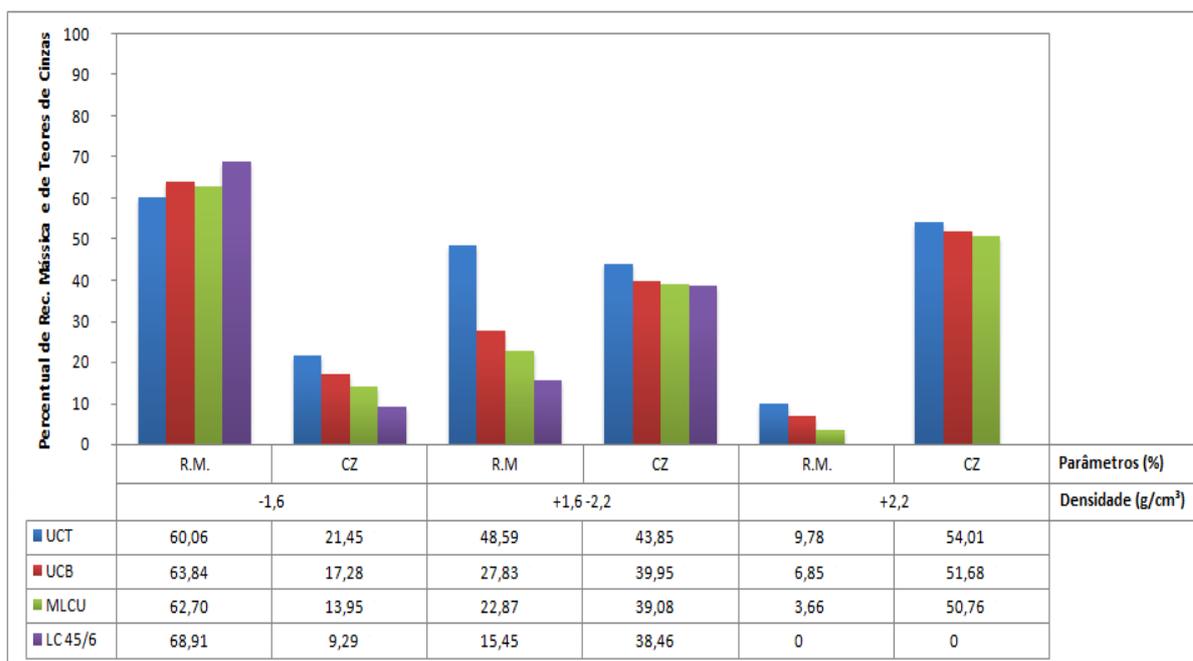


Figura 43: Gráfico de recuperação mássica e teores de cinzas (Gaveta A).
Fonte: O Pesquisador

A figura 43 revela os resultados da recuperação mássica com relação ao teor de cinzas no leito estratificado na gaveta **A** para todas as subcamadas. De referir que o teor de cinzas é um dos parâmetros fundamentais para avaliação tecnológica de um determinado carvão mineral visando seu beneficiamento, inclusive na avaliação do seu potencial futura da sua aplicabilidade.

No caso em discussão e considerando um processo de pré-lavagem no corte densimétrico de 1,6 g/cm³, estima-se que na gaveta **A** podem ser retiradas as seguintes massas por subcamada (rejeito): para a subcamada UCT, uma massa de aproximadamente 40%; enquanto que para a subcamada UCB uma massa de 36,3%; para a subcamada MLCU, uma massa aproximadamente de 34,6 % e finalmente para a subcamada LC 45/6, pode ser retirada uma massa de 32,09%.

De acordo com os resultados obtidos verificou-se que para todas as subcamadas a medida que se aumentava a densidade de corte, as recuperações mássicas iam- se diminuindo e o percentual do teor das cinzas ia- se incrementado. Por exemplo: para a subcamada UCT nos cortes densimétricos de 1,6 g/cm³; -2,2 g/cm³ e +2,2 g/cm³ se registraram as seguintes recuperações mássicas e seus teores de cinzas: 60,06% de massa para 21,45% de teores de cinzas; 48,59% de

massa para 43,85% de teores de cinzas e 9,78% de massa para 51,01% de teores de cinzas respectivamente.

De ressaltar que para a subcamada LC 45/6 na densidade +2,2 g/cm³ não se obteve nenhuma recuperação mássica visto que nesse corte densimétrico todo o material flutuou. Todavia, importa destacar que foram calculados os teores médios de cinzas do carvão estratificado na gaveta **A** para cada subcamada em estudo tendo-se corroborado os seguintes resultados: para a subcamada UCT foi obtido um teor de cinzas de **42,15%**; UCB um teor de cinzas de **35,93%**; MLCU um teor de cinzas de **29,68%** e LC 45/6 um teor médio de **14,63%** respectivamente.

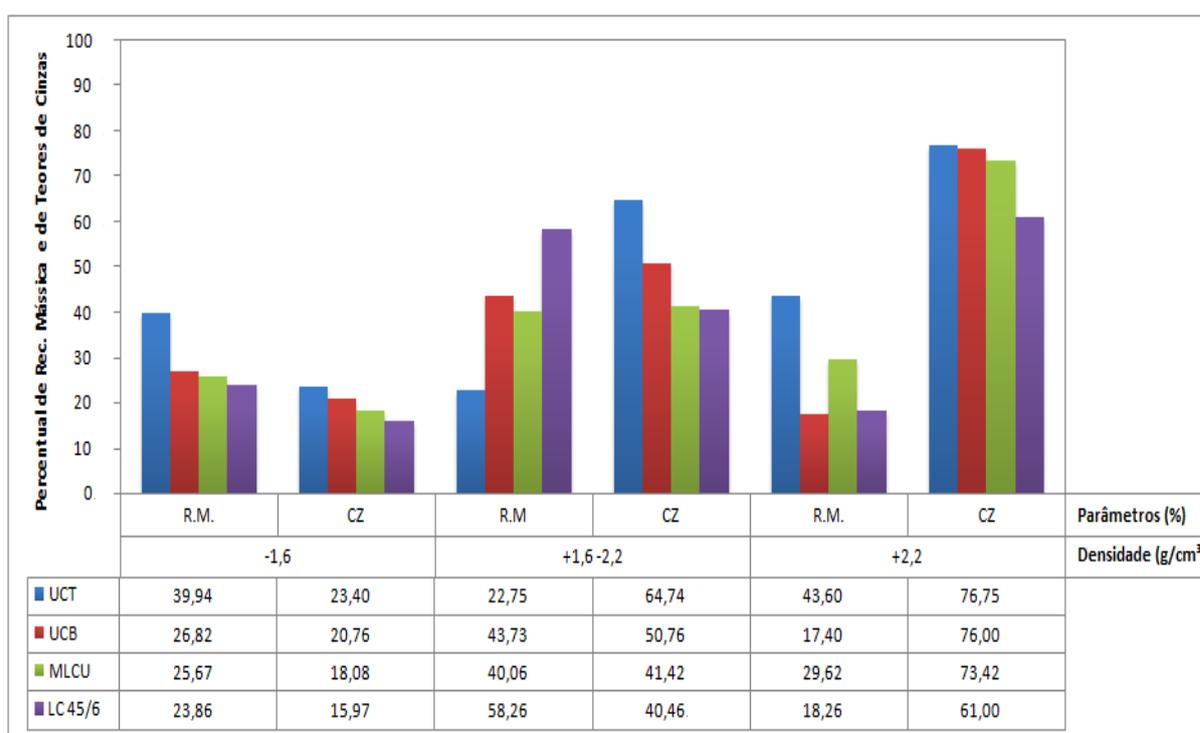


Figura 44: Gráfico de recuperação mássica e de teores de cinzas (Gaveta B).

Fonte: O Pesquisador

Os resultados das recuperações mássicas e seus teores de cinzas do carvão estratificado na gaveta **B** (Médio) são apresentados na figura 44. Comparativamente aos teores da gaveta **A**, com os da gaveta **B**, pode-se respaldar que os valores correspondentes a gaveta **B**, foram relativamente altos como se documenta na figura 44.

Diferentemente com as recuperações mássicas registradas na gaveta **A**, no caso da gaveta **B**, elas foram variando à medida que se aumentava a densidade. Com relação aos teores de cinzas também foram se incrementando à medida que a

densidade aumentava como se mostra na gaveta **A**. Como forma de verificar-se a possibilidade de beneficiamento do carvão estratificado na gaveta **B** mesmo não sendo o foco do presente trabalho de Tese, foram calculadas as recuperações mássicas e seus respectivos teores de cinza. Ainda para dar mais suporte a essa abordagem, foram calculados os teores médios de cinzas para a gaveta **B**, tendo-se obtido os seguintes resultados: para a subcamada UCT um teor de cinzas de **54,13%**; UCB **46,60%**; MLCU **45,08%** e LC 45/6 **38,37%** respectivamente.

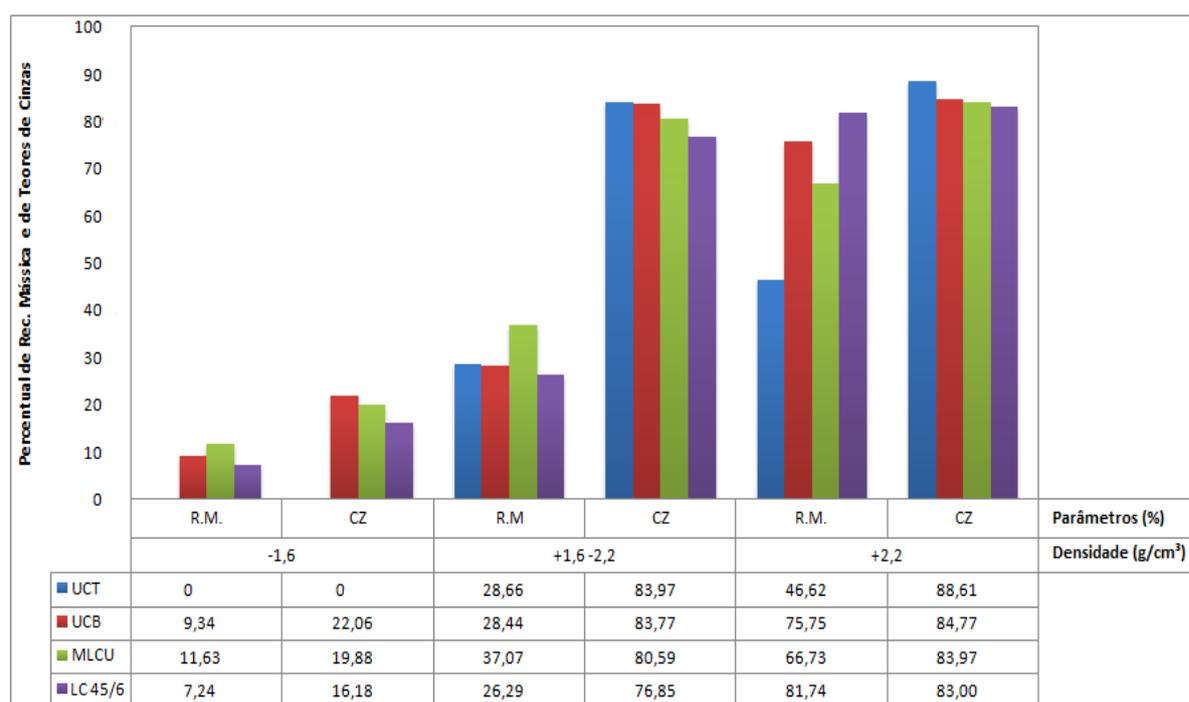


Figura 45: Gráfico de recuperação mássica e de teores de cinzas (Gaveta C).
Fonte: O Pesquisador

Observando os resultados do carvão estratificado no fundo do jig, isto é, na gaveta **C** e comparando os com os obtidos nas gavetas **A** e **B** pode-se deduzir que na gaveta **C** foi estratificado o carvão mais denso. Essa dedução foi feita depois da realização dos ensaios de afunda-flutua e feito o (cálculo de recuperação mássica) e realizadas análises imediatas das amostras (cinzas) como se pode conferir na figura 45.

Os dados expostos na figura 43, conjugados com os das figuras 44 e 45, pode-se depreender que todo o carvão estratificado nas gavetas **B** e **C** incluindo o carvão estratificado na gaveta **A** e flutuado na densidade 2, 2 g/cm³ e o seu afundado, pode ser descartado num processo de pré-lavagem.

Numa abordagem da eficiência do funcionamento do jigue a escala piloto, mesmo não tido feito a curva de *tromp*, mas pelos resultados obtidos, pode-se afirmar que o equipamento teve um bom desempenho já que estes foram congruentes como se esperava.

Esperava-se que o carvão do topo fosse menos denso e com menor teor de cinzas e o do fundo fosse mais denso e por conseqüente com maior teor de cinzas. Este fato foi comprovado com os resultados das gavetas **A**, **B** e **C** respectivamente.

Porém, foi comprovado que o carvão da camada UCT estratificado na gaveta **C** foi mais denso, razão de recuperação nula (zero) no corte densimétrico de 1,6 g/cm³ enquanto que o carvão da subcamada LC 45/6 na mesma gaveta flutuou todo ele, mas corte de 2,2 g/cm³.

A recuperação mássica com relação aos teores de cinzas do carvão estratificado na gaveta **C** para todas as camadas verificou-se que à medida que se aumentava a densidade, as recuperações mássicas foram-se aumentando e os respectivos teores de cinzas também foram-se incrementando, isto é, as recuperações mássicas foram directamente proporcionais aos teores de cinzas.

No entanto, importa destacar que foram calculados os teores médios de cinzas dos das amostras estratificadas na gaveta **C** para cada camada tendo-se granjeados os seguintes resultados: para a subcamada UCT, foi obtido um teor de cinzas de **86,84%**; UCB **48,35%**; MLCU **76,43%** e LC 45/6 um teor médio de cinzas de **55,29%**.

enquanto que o carvão com a granulometria menos que 0,25 mm é destinado para o módulo de flotação.

4.6.8 Proposta de definição de circuito de beneficiamento

Na preparação de carvão, a pré-concentração consiste na remoção do rejeito de alta densidade do carvão bruto. O objetivo é de reduzir os teores de cinza do carvão no início do beneficiamento e evitar a alimentação da planta com material desnecessário, aumentando assim a recuperação geral e (possivelmente) a qualidade do carvão beneficiado.

Além disso, a pré-lavagem de *ROM* permite o processamento de diferentes capacidade de lidar com partículas grossas e altas tonelagens a custos relativamente baixos, os métodos de separação por gravidade constituem a principal opção para os estágios de pré-lavagem.

Por acima exposto, clarifica-se que as propostas de definição da rota de beneficiamento das subcamadas que a continuação serão apresentadas (sem blendagem), foram definidas na base do circuito dos grossos da Mina de Moatize (Moatize –I).

Neste caso incluindo no circuito o jigue a ar como a proposta para a remoção do rejeito antes do material ser enviado para o passo subsequente (ciclones de meio densos I e II) respectivamente. Essas propostas e os seus resultados são apresentados nas figuras 46, 47, 48 e 49. Como se fez menção anteriormente, estas propostas foram concebidas tendo em conta ao circuito dos grossos da planta da Vale (Moatize-I), após a introdução como proposta no circuito o jigue pneumático.

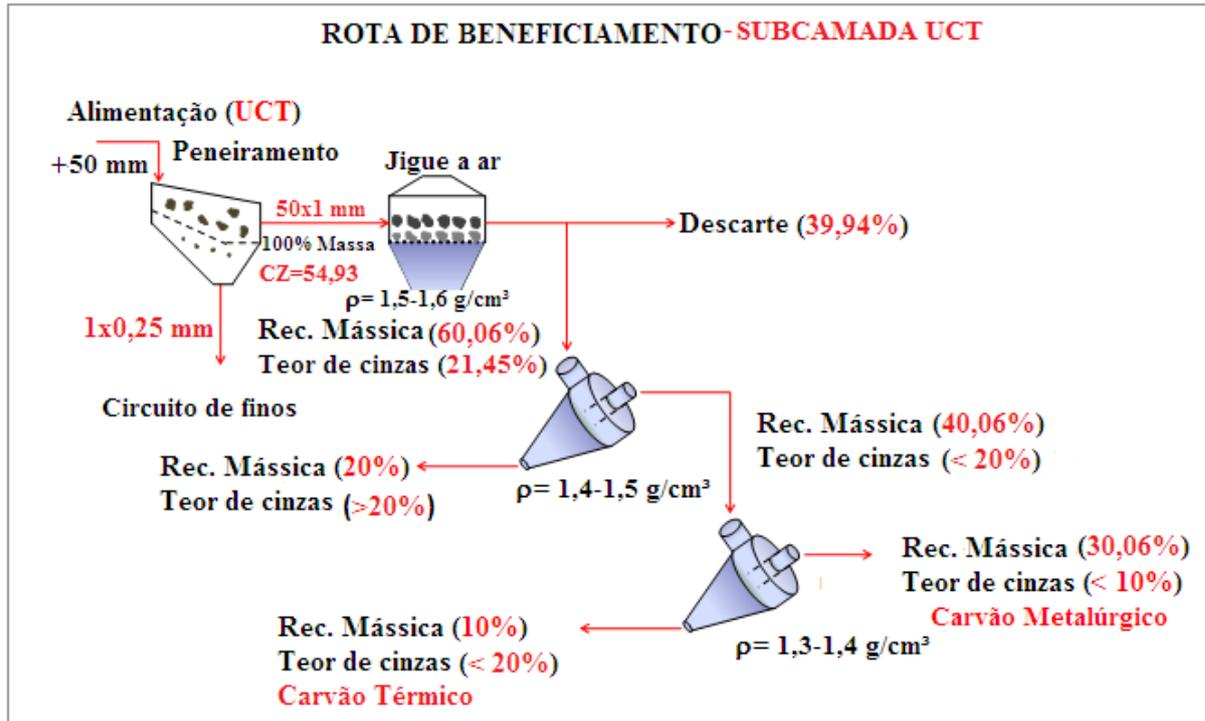


Figura 47: Rota de beneficiamento da subcamada UCT
Fonte: O Pesquisador

A figura 47 pormenoriza a proposta do circuito de beneficiamento do módulo dos grossos para a subcamada UCT. Onde o carvão com a granulometria maior que 50 mm é britado em seguida peneirado. A massa alimentada ao jigue apresenta um teor de cinzas de 54,93% e uma densidade entre 1,5-1,6 g/cm³. Num processo de pré-lavagem (**destoning**) é possível descartar uma massa de 39,94%. E 60,06% de massa no corte densimétrico de -1,4+1,5 g/cm³, poderá ser alimentada ao ciclone I com um teor de cinzas de 21,45%. Dos 60,06% de massa alimentada ao ciclone I, 20% da mesma poderá ser considerada como rejeito com um teor maior de 20% de cinzas e 40,06%, como o concentrado com um teor menor de 20% de cinzas.

Dos 40,06% de massa poderá ser alimentada ao ciclone II, da qual 30,06% da mesma é possível ser recuperada como concentrado (Carvão Metalúrgico) no corte densimétrico -1,3+1,4 g/cm³, com teor menor que 10% de cinzas. E os restantes 10% de massa, possivelmente sejam rejeito (Carvão Térmico) com um teor menor de 20% de cinzas. O carvão na granulometria de 1x0,25 mm será direcionado para as espirais, enquanto que na granulometria menor que 0,25 mm será destinado para o módulo de flotação.

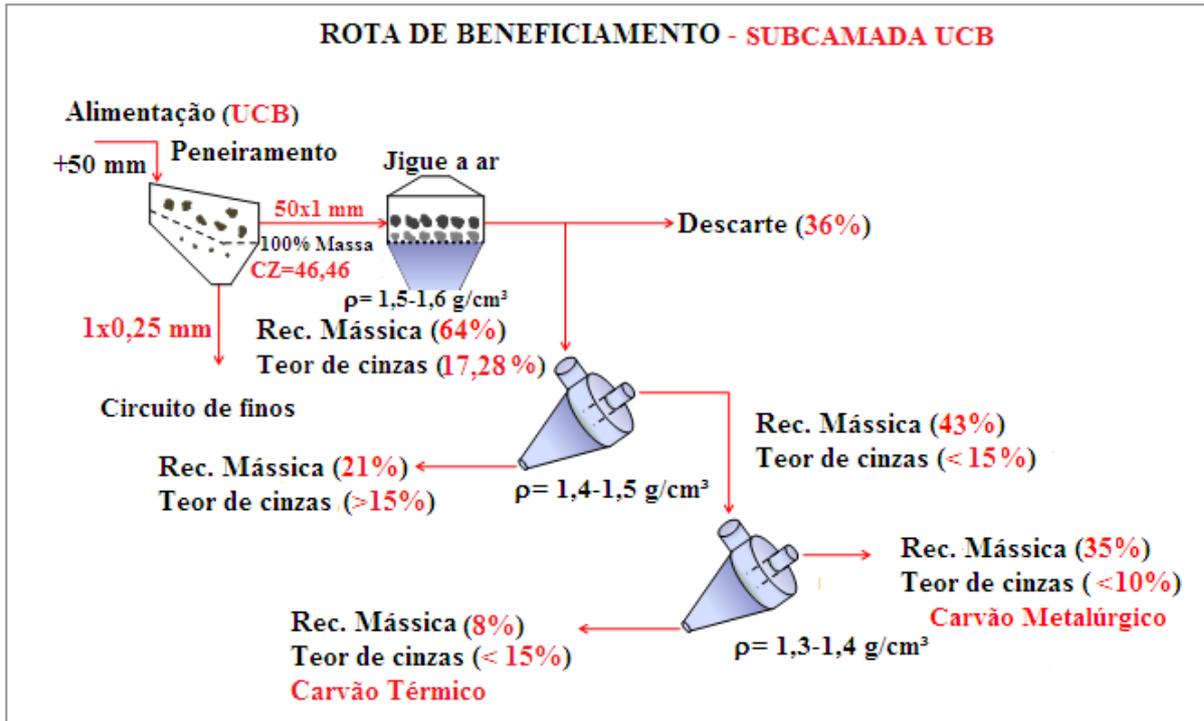


Figura 48: Rota de beneficiamento da subcamada UCB
 Fonte: O Pesquisador

A figura 48 elucida a proposta do circuito de beneficiamento do módulo dos grossos para a camada UCB, onde o carvão com a granulometria maior que 50 mm é britado em seguida peneirado. O jigue é alimentado com carvão ROM com um teor de cinzas de 46,46% e a densidade entre -1,5+1,6 g/cm³. Num processo de pré-lavagem, o 100% de massa alimentada ao jigue, 36% é possível ser descartada (rejeito). E 64% de massa ser alimentada para o ciclone I com um teor de cinzas 17,28% com uma densidade entre -1,4+1,5 g/cm³. Dos 64% de massa alimentada ao ciclone I, 21% da mesma com um teor de cinzas maior que 15%, é provável que seja descartada (rejeito do ciclone I) e 43% com um teor de cinzas maior que 15% poderá ser recuperada e alimentada ao ciclone II no corte densimétrico de -1,4+1,5 g/cm³

Dos 43% de massa a ser alimentada ao ciclone II, 35% da mesma poderá ser recuperada como o concentrado no corte densimétrico de -1,3+1,4 g/cm³ (Carvão Metalúrgico), com um teor menor de 10% de cinzas. E 8% de massa provavelmente seja recuperada como carvão térmico com teor menor de 15% de cinzas. O carvão na granulometria de 1x0,25 mm será direcionado para as espirais, enquanto que o na granulometria menor que 0,25 mm será destinado para o módulo de flotação.

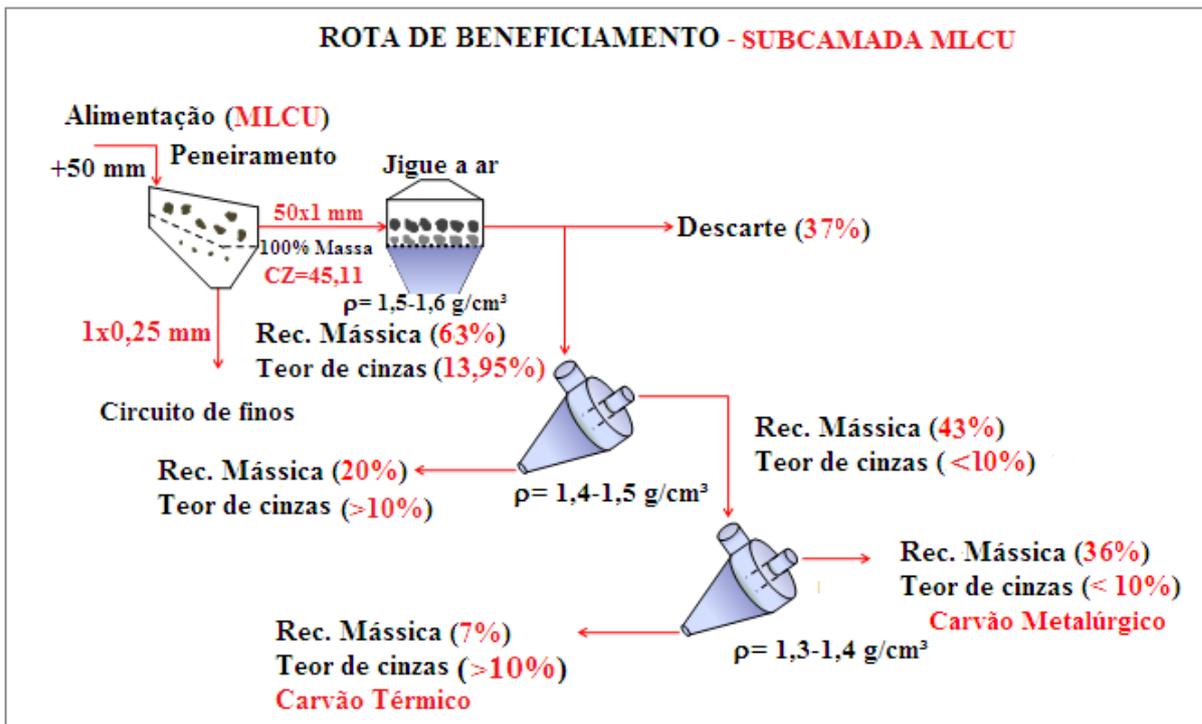


Figura 49: Rota de beneficiamento da subcamada MLCU
Fonte: O Pesquisador

O circuito de beneficiamento do módulo dos grossos para a camada MLCU é apresentado na figura 49. Nele, observa-se que o carvão com a granulometria maior que 50 mm é britado e em seguida peneirado. O jigue é alimentado com carvão ROM com um teor de cinzas de 45,11% na densidade entre -1,5+1,6 g/cm³. De 100% da massa alimentada ao jigue, 37% da mesma provavelmente seja descartada no processo de (*destoning*). E o 63% da mesma com 13,95% teor de cinzas e densidade de corte entre 1,5-1,6 g/cm³ é alimentada ao ciclone I.

Desses 63% de massa alimentada ao ciclone I, 20% da mesma possível ser descartada como o (rejeito do ciclone-I) com um teor de cinzas maior que 10% E 43% de massa, provávelmente será recuperada como o (produto do ciclone I) com um teor maior que 10% de cinzas no corte densimétrico de -1,4+1,5 g/cm³.

Dos 43% de massa a ser alimentada ao ciclone II, 36% é possível recupera-la como o concentrado no corte densimétrico de 1,3-1,4 g/cm³ como carvão metalúrgico com um teor de cinzas menores que 10%. E os restantes 7% da massa poderá ser recuperada como carvão térmico, com teores de cinzas maiores que 10%. Os finos seguirão os correspondentes procedimentos, isto é, o carvão na

granulometria de 1x0,25 mm será direcionado para as espirais; enquanto que menor que 0,25 mm será encaminhado para o módulo de flotação.

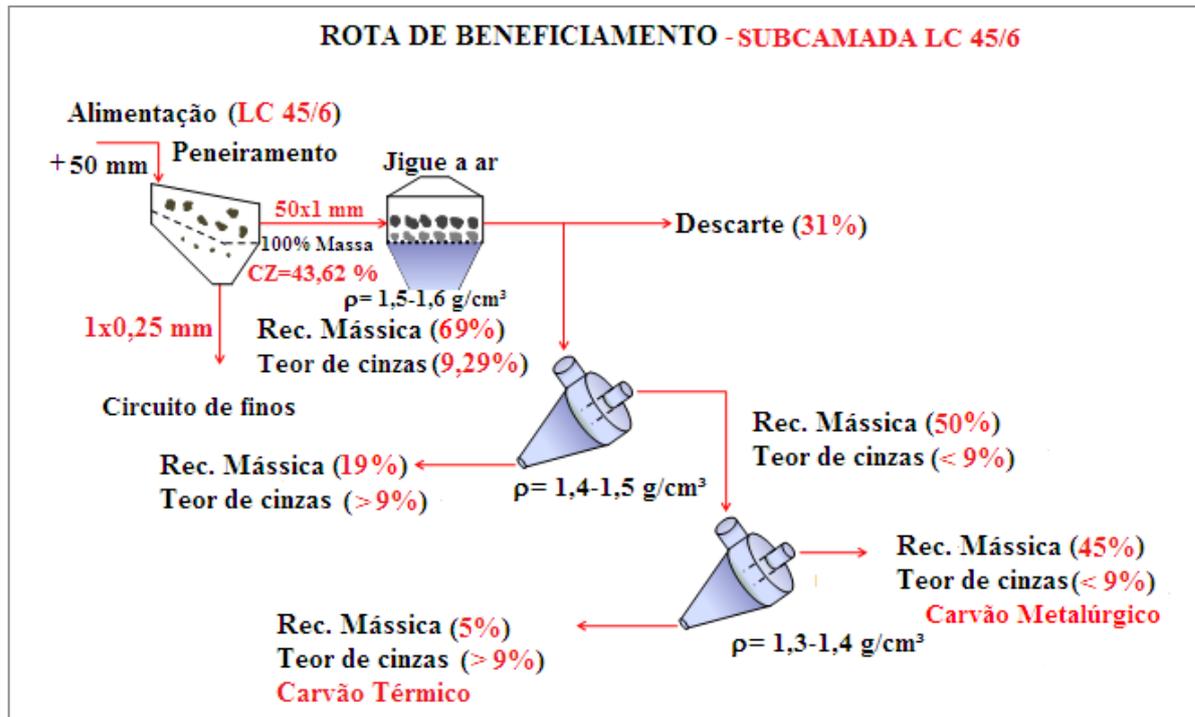


Figura 50: Rota de beneficiamento da subcamada LC 45/6

Fonte: O Pesquisador

A figura 50 descortina a proposta da rota de beneficiamento do módulo dos grossos para a subcamada LC 45/6. Nesta proposta é evidente observar que o carvão com a granulometria maior que 50 mm é britado em seguida peneirado. Antes dos ciclones, o jigue é alimentado com uma massa com a densidade entre 1,5-1,6 g/cm³ e um teor de cinzas de 43,62%.

De 100% de massa alimentada ao jigue, 31% da mesma poderá ser descartada num processo de pré-lavagem (**destoning**) e 69% de massa podendo ser alimentada para o ciclone I no corte densimétrico de 1,5-1,6 g/cm³ com um teor de cinzas 9,29%.

Dos 69% de massa alimentada ao ciclone I, 19% dela será descartada com mais de 10% de teor de cinzas. Os 50% de massa, poderá ser recuperada como o concentrado com um teor de cinzas maior que 10% e alimentada ao ciclone II no corte densimétrico de $-1,4+1,5 \text{ g/cm}^3$.

Dos 50% de massa alimentada ao ciclone II, 45% da mesma é possível ser recuperada como o concentrado no corte densimétrico de $1,3-1,4 \text{ g/cm}^3$ (Carvão Metalúrgico), com menos de 9% de teor de cinzas.

E 5% provavelmente sejam recuperadas como o rejeito (Carvão Térmico) com um pouco mais de 9% de teor de cinzas. Os circuitos de finos seguirão os seus procedimentos.

O carvão com a faixa granulométrica de $1 \times 0,25 \text{ mm}$ será direcionado para espirais, enquanto para o carvão com o tamanho menor que $0,25 \text{ mm}$ será destinado para o módulo de flotação.

Pela grande redução dos teores de cinzas após a jigagem para a camada LC 45/6, isto, nos leva na indução de que a massa obtida como produto do ciclone II (carvão térmico), pudesse ser considerado como carvão metalúrgico

Perante o antes discutido, foi elaborada a tabela 17. Nela, estão explícitos de forma resumida os parâmetros (recuperação mássica e teores de cinzas do antes e a pós a jigagem de *ROM*).

Tabela 17: Resultados dos parâmetros (CZ e R.M) das camadas antes e após a jigagem

Subcamadas	UCT	UCB	MLCU	LC 45/6
ROM- Alimentação				
Rec. Mássica (%)	81,47	72,28	69,62	60,41
Teor de cinzas (%)	31,40	30,76	26,80	29,98
Densidade (g/cm ³)	1,5-1,6	1,5-1,6	1,5-1,6	1,5-1,6
Após a jigagem				
Rec. Mássica (%)	60,06	63,84	62,70	68,91
Teor de cinzas (%)	21,45	17,28	13,95	9,29
Densidade (g/cm ³)	1,5-1,6	1,5-1,6	1,5-1,6	1,5-1,6
Ciclone-I				
Rec. Mássica (%)	40,00	43,00	43,00	50,00
Teor de cinzas (%)	20,00	< 15,00	< 10,00	< 9,00
Rec.-Ciclone I (Rejeito) (%)	20,00	21,00	20,00	19,00
Teor de cinzas (%)	>20,00	> 15,00	> 10,00	> 9,00
Densidade (g/cm ³)	1,4-1,5	1,4-1,5	1,4-1,5	1,4-1,5
Ciclone-II				
Carvão Térmico	10,00	8,00	7,00	5,00
Teor de cinzas (%)	< 20,00	< 15,00	> 10,00	> 9,00
Carvão Metalúrgico	30,06	35,00	36,00	45,00
Teor de cinzas (%)	< 10,00	< 10,00	< 10,00	< 9,00
Densidade (g/cm ³)	1,3-1,4	1,3-1,4	1,3-1,4	1,3-1,4

Fonte: O Pesquisador

4.7 Análise petrográfica

O conhecimento da Petrologia Orgânica é importante para a caracterização de bacias sedimentares com o objetivo de reconhecer os ambientes de deposição e os seus processos assim como identificar e quantificar os principais constituintes

orgânicos contidos nas amostras. (Como forma de complementar à caracterização tecnológica do carvão de Moatize, foi realizado um estudo petrográfico de amostras de carvão ROM das subcamadas UCT, UCB, MLCU e LC 45/6) respectivamente. Na tabela 18, são apresentados os resultados da análise petrográfica da subcamada UCT.

Tabela 18: Resultados da análise petrográfica da subcamada UCT
Min: valor mínimo da refletância da vitrinita; Max: valor máximo da refletância da vitrinita;
VM: valor médio; S: desvio padrão; N: número de medidas.

Número de Laboratório:		16-119
Origem e tipo de carvão:		Moatize- Moçambique- Carvão ROM-UCT
Refletância da Vitrinita		
V. Máx		1,204
V. Mín		0,791
V.M		0,981
S		0,09
N		100
Rank		HVB-A
Análise de Macerais		
Vitrinita total		22,2
Liptinita total		1,2
Inertinita total		22,6
Materia Mineral Total		54,0
Total		100

Fonte: O Pesquisador

O grau de evolução (*rank*) foi determinado pelo índice de refletância da vitrinita (100 medidas para carvões) de acordo com o padrão ISO 7405/5-1984. A média, o desvio padrão e outros parâmetros estatísticos das subcamadas, foram calculados e podem ser observados nos apêndices.⁶ Dentro do conteúdo mineral foram discriminados a argila, carbonato, quartzo e a pirita.

A análise foi baseada em 500 pontos (ISO 7403-3/1984) e os resultados foram expressos em volume por cento. A amostra 16-119 é dominada por matéria mineral, com 54%, com predominância de argila. Macerais do grupo da vitrinita compõe 22,2%, com predominância de colotenita. No grupo da liptinita, foi encontrado somente liptodetrinita, com 1,2% (Ver Apêndice 25).

Macerais do grupo da inertinita perfazem 22,6%, sendo comum a fusinita, inertodetrinita e semifusinita. O valor médio da refletância da vitrinita foi de 0,981

⁶ Apêndices 25, 26, 27 e 28: Desvio padrão e parâmetros estatísticos de UCT, UCB, MLCU e LC 45/6 respectivamente.

Ro% (Ver Figura 51), e segundo a classificação (ASTM- D388/1972) dos carvões pelo seu rank corresponde a **Betuminoso Alto Volátil (HVB-A)**.

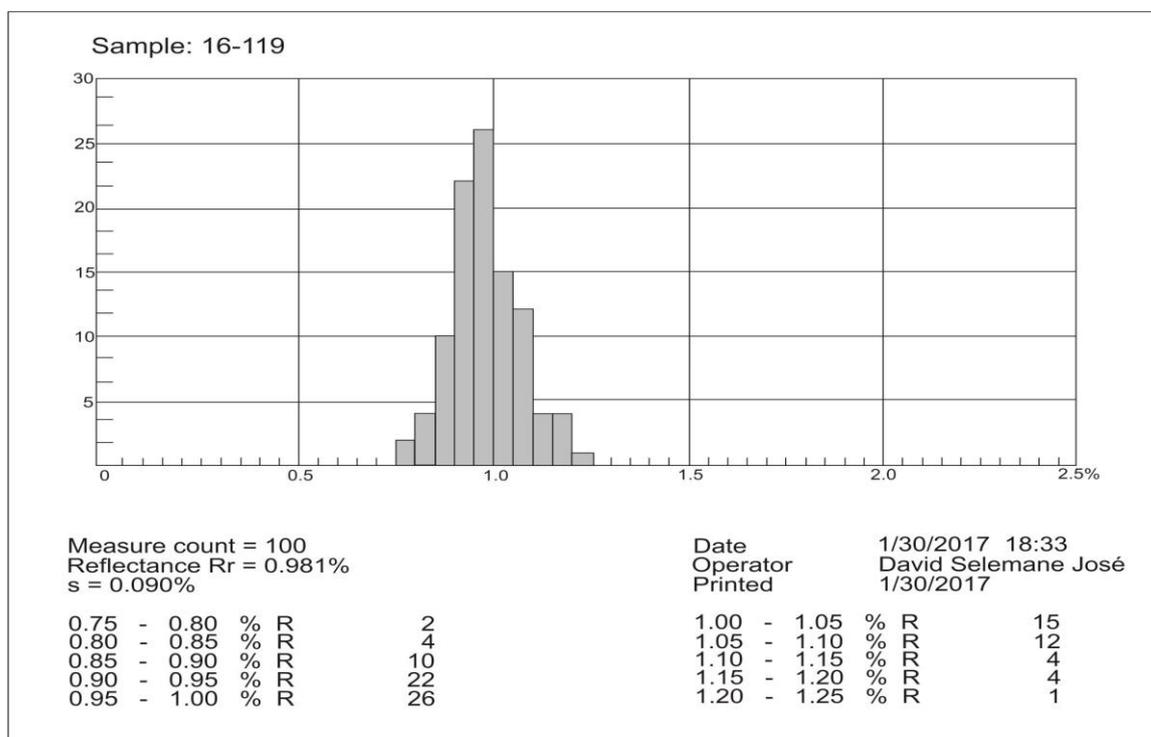


Figura 51: Histograma das classes da vitrinita da subcamada UCT (16-119)

Fonte: O Pesquisador

Tabela 19: Resultados da análise petrográfica da subcamada UCB

Min: valor mínimo da refletância da vitrinita; Max: valor máximo da refletância da vitrinita; VM: valor médio; S: desvio padrão; N: número de medidas.

Número de Laboratório:	16-059
Origem e tipo de carvão:	Moatize- Moçambique- Carvão ROM-UCB
Refletância da Vitrinita	
V. Máx	1,323
V. Min	0,972
V.M	1,125
S	0,083
N	100
Rank	MVB
Análise de Macerais	
Vitrinita total	34,6
Liptinita total	0
Inertitinita total	27,0
Materia Mineral Total	38,4
Total	100

Fonte: O Pesquisador

A amostra representada pelo número 16-059 é dominada por matéria mineral, com 38,4%, com predominância de argila (Ver Tabela 19). Macerais do grupo da vitrinita compõe 34,6%, com predominância de colotenita. Macerais do grupo

inertinita perfazem 27%, sendo comum a semifusinita, inertodetrinita e fusinita (Ver Apêndice 26). O valor médio da refletância da vitrinita foi de 1,125 Ro% (Ver Figura 51), e segundo a classificação da (ASTM- D388/1972) dos carvões pelo seu *rank* corresponde a **Betuminoso Médio Volátil –HVB**.

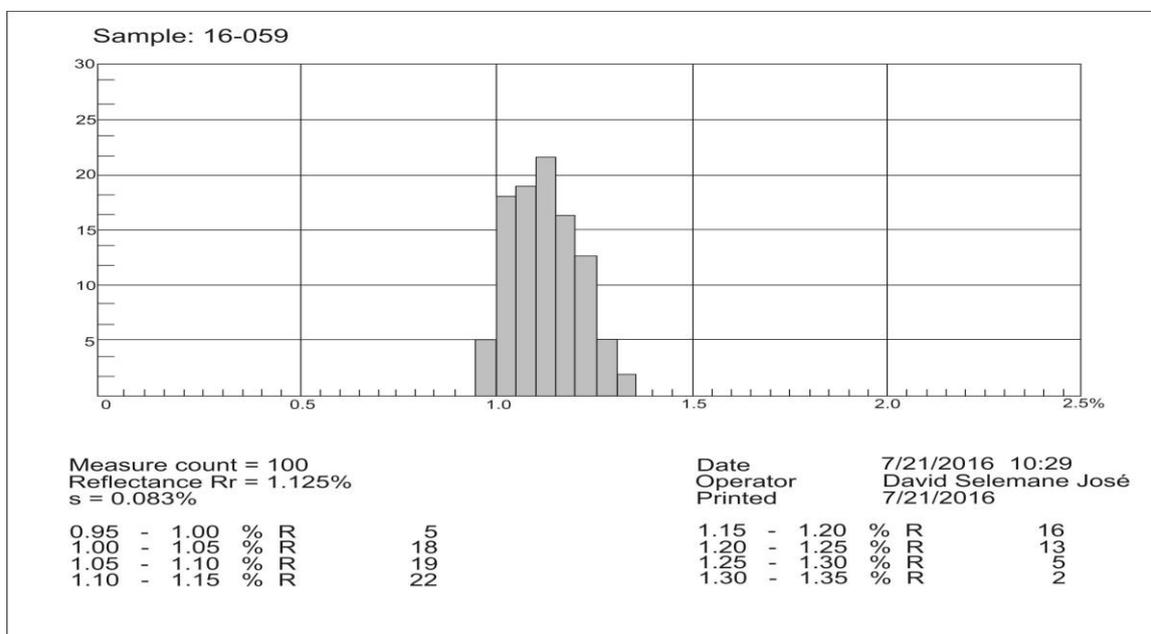


Figura 52: Histograma das classes da vitrinita da subcamada UCB (16-059)
Fonte: O Pesquisador

Tabela 20: Resultados da análise petrográfica da subcamada MLCU

Min: valor mínimo da refletância da vitrinita; Max: valor máximo da refletância da vitrinita;
VM: valor médio; S: desvio padrão; N: número de medidas.

Número de Laboratório:	16-118
Origem e tipo de carvão:	Moatize-Moçambique- Carvão ROM-MLCU
Refletância da Vitrinita	
V. Máx	1,214
V. Mín	0,821
V.M	1,036
S	0,074
N	100
Rank	HVB-A
Análise de Macerais	
Vitrinita total	36,6
Liptinita total	0,4
Inertinita total	22,4
Materia Mineral Total	40,6
Total	100

Fonte: O Pesquisador

A tabela 20 apresenta os resultados da análise petrográfica da amostra 16-118 correspondente a subcamada MLCU. Esta amostra é dominada por matéria mineral,

com 40,6%, com predominância de argila (Ver Tabela 20). Macerais do grupo da vitrinita compõe 36,6%, com predominância de colotenita (Ver Apêndice 27).

No grupo da Liptinita, foi encontrado somente liptodetrinita, com 0,4%. Macerais do grupo inertinita perfazem 22,4%, sendo comum a fusinita, inertodetrinita e semifusinita.

O valor médio da refletância da vitrinita foi de 1,036 Ro%, e segundo a classificação (ASTM- D388/972) dos carvões pelo seu *rank* corresponde a (HVB-A): **Betuminoso Alto Volátil.**

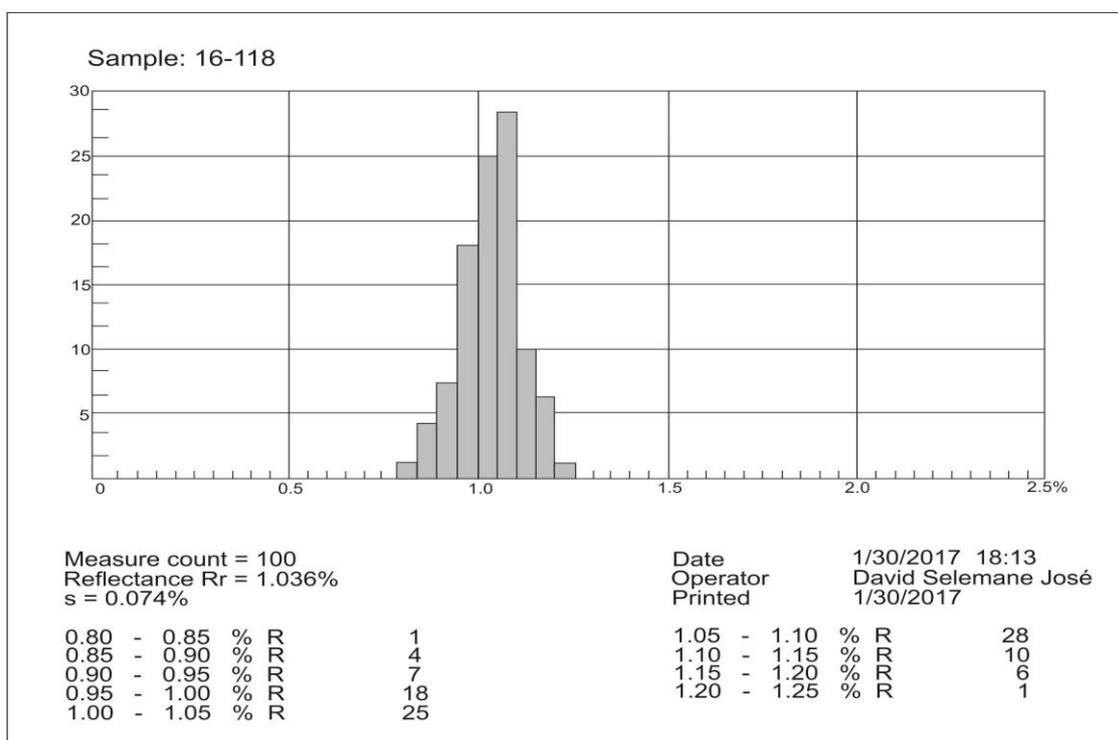


Figura 53: Histograma das classes da vitrinita da subcamada MLCU (Amostra 16-118).
 Fonte: O Pesquisador

Tabela 21: Resultados da análise petrográfica da subcamada LC 45/6

Min: valor mínimo da refletância da vitrinita; Max: valor máximo da refletância da vitrinita;
VM: valor médio; S: desvio padrão; N: número de medidas.

Número de Laboratório:		16-060
Origem e tipo de carvão:		Moatize- Moçambique- Carvão ROM-LC 45/6
Refletância da Vitrinita		
V. Máx		1,351
V. Min		1,029
V.M		1,152
S		0,063
N		100
Rank		HVB
Análise de Macerais		
Vitrinita total		50,8
Liptinita total		0
Inertinita total		14,8
Materia Mineral Total		34,4
Total		100

Fonte: O Pesquisador

A amostra 16-060 a matéria orgânica é dominada por macerais do grupo da vitrinita, com 50,8%, com predominância da colotenita (Ver Tabela 21). Macerais do grupo da liptinita não foram encontrados.

Macerais do grupo inertinita perfazem 14,8%, sendo comum a semifusinita, fusinita e inertodetrinita. A matéria mineral compõe 34,4%, com predominância de material argiloso. O valor médio da refletância da vitrinita foi de 1,152 Ro%, (Ver Figura 54), e segundo a classificação da (ASTM D388/1972) dos carvões pelo seu *rank* corresponde a **Betuminoso Médio Volátil-HVB**. Informações mais detalhadas ver apêndice 28.

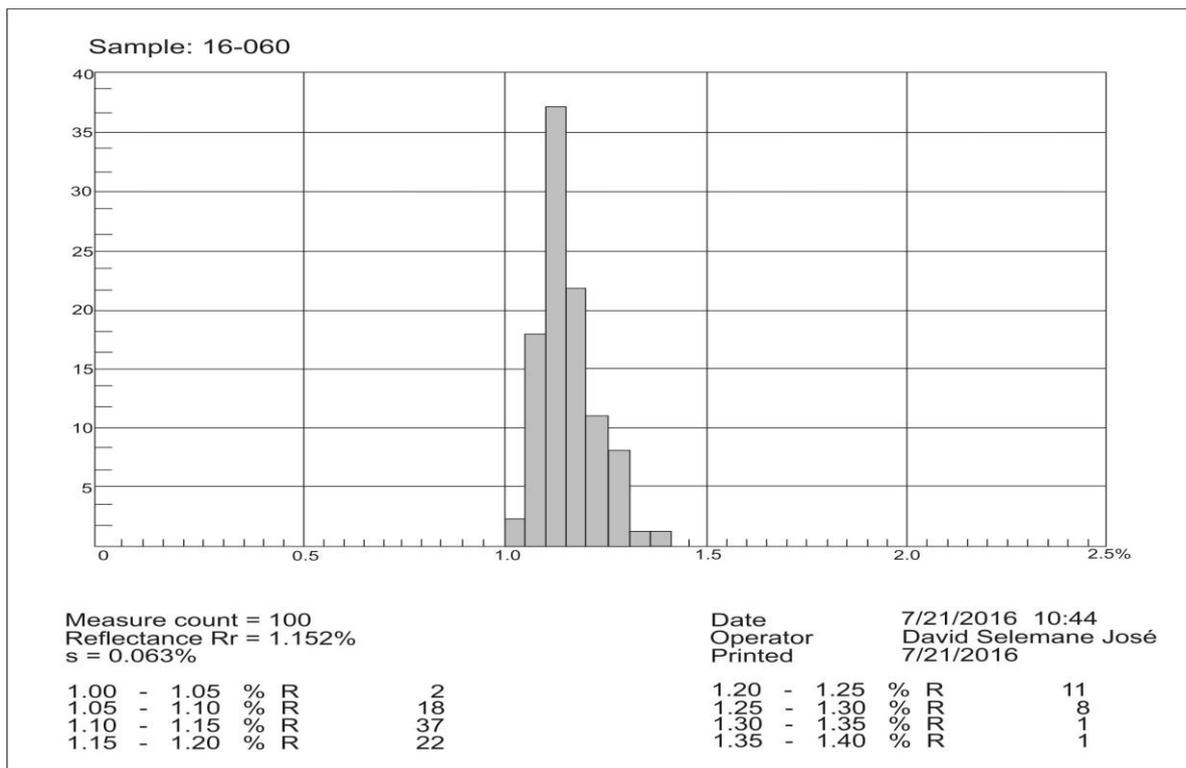


Figura 54: Histograma das classes da vitrinita da subcamada LC 45/6 (16-060).

Fonte: O Pesquisador

Tabela 22: Recálculo de grupos de Macerais / Análise imediata das amostras das subcamadas.

Número de identificação das amostras	16-119	16-059	16-118	16-060
Nome da subcamada	UCT	UCB	MLCU	LC45/6
Composição Petrográfica/ Análise imediata (%)				
R _O	0,981	1,125	1,036	1,152
Vitrinita	48,26	56,17	61,61	77,44
Liptinita	2,61	0,0	0,67	0,0
Inertinita	49,13	43,83	37,72	22,56
Total	100	100	100	100
Teores de cinzas (%)	31,40	30,76	29,98	26,80
Classificação pelo Rank	HVB-A	MVB	HVB-A	MVB

Fonte: O Pesquisador

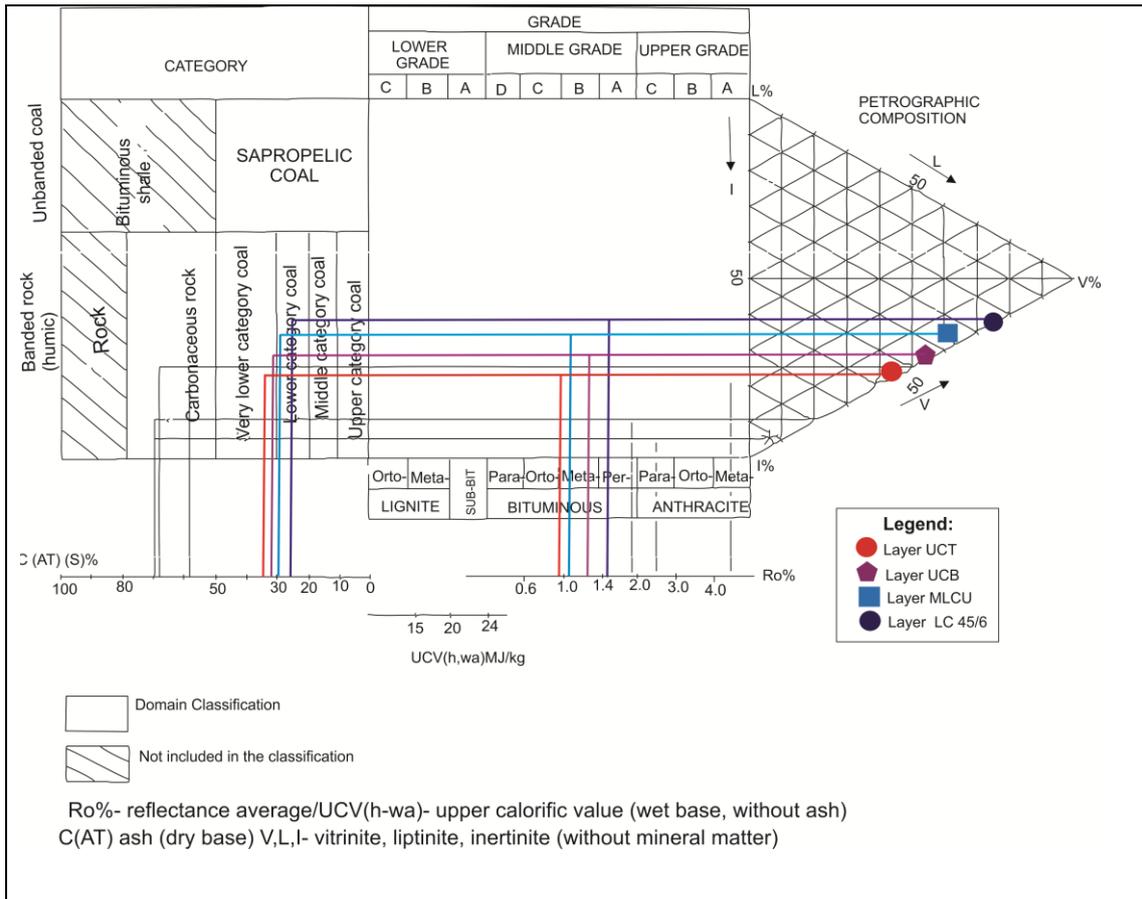


Figura 55: Composição Petrográfica das subcamadas após a redistribuição dos Macerais.
Fonte: O Pesquisador

De acordo com os resultados apurados na tabela 22 e na figura 55 pode-se destacar que a subcamada LC 45/6 apresentou maior percentual de vitrinite mesmo tendo sido feita a redistribuição dos percentuais dos macerais obtidos no processo da análise petrográfica. (Ver Tabela 22).

Assim, pode-se afirmar que o percentual da vitrinite foi maior em todas as camadas com relação a inertinite e liptinite. A subcamada LC 45/6 apresentou um percentual de vitrinite de 77,44%, seguida de MLCU com 61,61%, UCB com 56,17% e finalmente a UCT com 48,26%.

Os seus teores de cinzas foram variando de acordo com a profundidade, ou seja, a subcamada do topo (UCT), teve maior percentual de cinzas com relação as subcamadas UCB, MLCU e LC 45/6.

5. CONCLUSÕES

A Caracterização tecnológica dos carvões na atualidade é imperativo ter em conta todas as vertentes, fundamentalmente nos aspectos econômicos e ambientais. Na atualidade, se preconiza a redução de gastos desnecessários de recursos disponíveis. Aliado a beneficiamento gravimétrico de forma a reduzir a geração de rejeitos em plantas de beneficiamento, caso da Mina Moatize se destacam dentre muitas, algumas conclusões a destacar:

- Com relação à análise granulométrica pode concluir que em todas as camadas se obteve uma maior retenção de massa acumulada na peneira de 1 mm e menor retenção mássica acumulada na peneira de 50,8 mm.

- Para a caracterização tecnológica da alimentação do jigge (antes da jigagem) no meio denso, à medida que aumentava a densidade para todas as camadas, se obtinha maiores recuperações mássicas acumuladas nas duas frações em estudo (50x1 mm e 1x0,25 mm), onde foram registrados teores de cinzas abaixo de 20% nas três primeiras densidades;

- Com relação aos teores de Umidade, Materiais voláteis e Cinzas, medida que aumenta aprofundidade os teores de umidade aumentam; os teores de materiais voláteis variam e os de cinzas diminuem.

- Considerando os valores de *NGM* obtidos, conclui-se que as amostras de carvão *ROM* de Moatize apresentam uma facilidade de ser beneficiadas uma vez que os mesmos estão abaixo dos 25%;

- De todas as camadas em estudo, a que apresentou melhores qualidades tecnológicas visando seu beneficiamento gravimétrico foi a subcamada LC 45/6, seguida de MLCU, UCB e finalmente a UCT, respectivamente. Essa lógica seguiu a ordem cronológica da estratificação das mesmas sendo coerente com a seqüência estratigráfica da região de Moatize.

- Após a testagem das amostras no jigge, foi possível comprovar que a recuperação mássica da camada LC 45/6 foi bem significativa, em comparação com as demais subcamadas em estudo.

- O processo de jigagem mostrou mais eficiente para a subcamada UCT tendo em conta ao fator da estratificação assim como aos teores de cinzas da mesma, pois os resultados mostraram uma boa remoção de material desnecessário (**Destoning**). E o processo se mostrou menos eficiente para a subcamada LC 45/6. De entre vários fatores a presença de muitos finos assim como ao menor teor de cinzas que apresenta esta camada podem ter influenciado a essa baixa eficiência.

- Comparativamente com os resultados obtidos entre a amostra da alimentação do jigge antes e após a jigagem, observou-se que as amostras antes tiveram maiores teores de cinzas que após, isto é, após a jigagem os teores de cinzas foram muito inferiores.

- O equipamento (jigge pneumático), apresentou um bom desempenho mesmo não tendo sido feita a curva de *Tromp*. Com o processo de jigagem, foi possível remover uma boa parte de rejeito que podia ser alimentado aos ciclones principalmente para a subcamada UCT.

- Com os resultados até aqui obtidos, conclui-se que mesmo com uma blendagem entre camadas, a redução do material desnecessário não poderá apresentar uma grande diferença, tanto na recuperação mássica assim como nos teores de cinzas dos produtos finais.

- Com relação ao elemento enxofre (enxofre total), conclui-se então que em geral, as amostras das subcamadas de carvão de Moatize apresentam um percentual de enxofre total inferior a 1%. Portanto este elemento no carvão de Moatize não gera drenagem ácida de Minas.

A Petrologia orgânica auxilia na interpretação e avaliação dos carvões quanto ao seu grau evolutivo no processo de formação dos mesmos durante o período geológico de formação (carbonificação); e considerando os valores obtidos da refletância da vitrinita das amostras das subcamadas de carvão *ROM* pode-se concluir que:

- Quanto ao seu *rank*, os carvões da bacia de Moatize podem ser classificados em Betuminoso Alto Volátil (HVB-A) para as subcamadas UCT e MLCU e (HVB) Betuminoso Médio Volátil para as camadas UCB e LC 45/6.

- Quanto ao percentual da vitrinita presente nas amostras em estudo, a subcamada LC 45/6 apresentou 50,8%, seguida da amostra da MLCU com 36,6%, UCB 34,6% e finalmente a amostra da UCT com 22,2%.

- Com relação à matéria mineral total presente nas amostras, a subcamada UCT apresentou um total de 54%, seguida da MLCU com 40,6% a UCB com 38,4% e finalmente a LC 45/6 com 34,4%. E ela é constituída majoritariamente por minerais de argila, sulfuretos, óxidos e a pirita aparece em menores proporções.

6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como possíveis trabalhos futuros na continuidade a este trabalho de Tese intitulado: Caracterização tecnológica de carvão ROM de Moatize - Moçambique para o **Destoning**, visando seu beneficiamento, pode-se apontar:

- Realizar estudos similares usando uma granulometria de alimentação inferior a 50x1 mm. E que seja considerado como o concentrado todo o carvão estratificado nas gavetas do topo e da intermediária do jigge (Gavetas-A e B);

Que se faça um estudo no jigge fazendo-se uma blendagem das subcamadas para se avaliar os principais parâmetros como os teores de cinzas e não só;

- Realização de estudos de caracterização tecnológica usando outros equipamentos de separação para possíveis estudos comparativos da eficiência dos mesmos. Uma vez comprovado que o jigge pneumático pode ser usado num processo de pré-lavagem para o carvão de Moatize.

- Outros trabalhos futuros bastantes relevantes seriam a realização de um estudo de identificação de elementos raros associados ao carvão de Moatize; e

- Estudo métodos aplicando tecnologias modernas para a identificação e extração do metano contido nas camadas de carvão mineral.

- E por último em forma de apelo, ao governo de Moçambique e aos megaprojetos que operam na área dos carvões em Tete em particular em Moatize, dêem mais oportunidades aos moçambicanos concedendo bolsas de estudos como forma de incentivar a investigação na área de mineração.

Entendo que serão dessas futuras pesquisas que sairão trabalhos científicos acessíveis ao público em geral, às Universidades, visto que na maioria das vezes as informações á respeito da mineração em Moçambique em particular de processamento, lavra e planejamento de Minas, são de uso restrito das empresas detentoras das licenças de exploração.

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8289: Carvão Mineral.** Determinação do Teor de Cinzas. **4p. 1983.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR8290: Carvão Mineral.** Determinação de Materiais Voláteis. **1983.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8293: Carvão Mineral.** Determinação de Umidade. **1983.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8738: Carvão Mineral.** Ensaio densimétricos. **Rio de Janeiro, 1984b.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8299: Carvão Mineral.** Cálculo de carbono fixo **(CF).**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7166: Carvão Mineral.** Determinação de Enxofre Total **(S).**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8297:** Determinação de elementos: Carbono (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Oxigênio (O).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8628:** Determinação do Poder Calorífico **(PC).**
- ALLMINERAL (Germany) (Org.). **PRODUCTS.** 2018. Disponível em: <<http://www.allmineral.com/em/loesungen/produkte/>> Acesso em: 01 Setembro de 2018.
- AMBRÓS, W. M. **Novos aspectos da estratificação de partículas em jigues descontínuos.** Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materias. Porto Alegre. Brasil, 2017.
- AMBRÓS, W. M. **ALLAIR S-500-Modo de operação do jigue pneumático.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Laboratório de Processamento Mineral. Porto Alegre. Brasil, 2014
- ASTM D388. **American Society for Testing and Materials.**1972.
- CORREA E SILVA, S.C.; 1987a; **Jazidas de Carvão no Rio Grande do Sul.** Simpósio Sul brasileiro de geologia. Curitiba-PR. Brasil, V2, p. 677-687.
- BURT, R. O. **Gravity Concentration Technology.** Amsterdam: Elsevier, 1984.
- DA SILVA. C.A. **Caracterização ambiental em termos de geração ácida dos rejeitos de Carvão da Mina de Moatize- Moçambique.** Dissertação de Mestrado- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materias. Porto Alegre. Brasil, 2018.
- DINAGECA. **Direção Nacional de Geografia e Cadastro.** Maputo. Moçambique, 2014.
- DIESEL, C. F. **Coal bearing deposits systems springer.** Berlim, 1992.

DNPM. **Estados de carbonificação de carvões. Direção Nacional de produção mineral.** Brasil, 2017.

DNPM. NRM: Portaria N^o 237, de 18 de Outubro de 2001. **Aprova as Normas Reguladoras de Mineração.** (NRM 18.1.1 e 18.1.1) de que trata o Art. 97 do Decreto-Lei N^o 227, de 28 de Fevereiro de 1967.

GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing, McGraw-Hill Book Company Inc.** New York, 1939.

GOMES, A. J. P. **Carvão do Brasil /turfa agrícola-geologia Meio ambiente e participação estratégica na produção de eletricidade no sul do Brasil.** p.15-35. 2002.

GTK CONSORTIUM (a) 2006. **Noticia Explicativa Vol. 2. Folhas Mocumbura (1631), Chioco (1632), Tete (1633), Tambara (1634), Guro (1732, 1933), Chemba (1734), Manica (1832), Catandica (1833), Gorongosa (1834), Rotenda (1934), Chimoio (1933), Beira (1934).** Escala 1:250.000. Direção Nacional de Geologia-Maputo-Moçambique.

GTK CONSORTIUM (d). 2006.; **Noticia Explicativa Vol 4. Folhas Inhamambo (1430), Maluwerá (1431), Chifunde (1432), Zumbo (1530), Fíngué- Magoé (1531), Songo (1532), Cazula (1533), Zóbuè (1534).** Escala 1: 250.000. Ministério dos Recursos Minerais. Direção Nacional de Geologia, 411p.

HATTON, W, FARDELL, A. **International Journal of Coal Geology. New discoveries of coal in Mozambique - Development of the coal resource estimation.** Methodology for International Resource Reporting Standards. p.5-12. 2012.

HORSFALL, D. W. **Coal preparation for plant operators.** Cape and Transvaal Printers Ltd, Cape Town, 1980, 360 p.

ICCP SYSTEM. **Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite- Method of determination maceral group composition.** N^o3, 1994.

ICCP SYSTEM. International Committee for Coal and Organic Petrology. 1998. **The new vitrinite classification.** FUEL 77, p.349 – 358.

ICCP SYSTEM,; 2000; International Committee for Coal and Organic Petrology. 2000. **The new inertinite classification.** FUEL 80, p.459 – 471.

ICCP SYSTEM. **International Committee for Coal Petrology, 2nd Edition,** Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, France, 1963.

IMPORTANCIA, 2015. **Importância dos recursos minerais.** Disponível em [Http://www..mineropar.pr.gov.br/modules/contendo/contendo.php?contendo=28](http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/contendo/contendo.php?contendo=28)>acessado em 25 de Setembro de 2015.

INE; 2017; INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA. **Relatório parcial do IV Recenseamento Geral da População e Habitação (RGPH),** realizado de 1 a 15 de Agosto de 2017. Disponível em http://www.ine.gov.mz/operacoes-estatisticas/censos/censo_2017/censo-2017/divulgacao-os-resultados-preliminares-iv-rgph-2017/at_download/file, acessado em 18 de Abril de 2018.

ISO 7404/3. International Standard. **Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite** - Part 3: Method of determining maceral group composition. 1984.

ISO 7404/5. International Standard. **Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite** - Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite. 1984.

ISO 7404/3. International Standard. **Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite** - Part 3: Method of determining maceral group composition. 2009.

JOSÉ, D.S.; SAMPAIO, C.H.; **Estado da arte da mineração em Moçambique: Caso de carvões de Moatize, Tete**. In: III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. 2011, Gramado, Brasil, III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2011.v. A9. P. 1-20.

JOSÉ, D. S. **Estudo de liberação de Carvão Mineral de Candiota, visando o seu beneficiamento**. Dissertação de Mestrado acadêmico - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. Brasil, 2011.

LEONARD, J.W. **Coal preparation**. 4th Edition, American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York. 1979, Chapter 4, 1165p.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A.; **Tratamento de Minérios** – 5ª Edição, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MAE. **Perfil do Distrito de Moatize; Província de Tete**. Ministério da Administração Estatal. Série de Perfis distritais. Maputo. Moçambique, 2005.

MILLER, B.G e TILLMAN, D. A. **Coal characteristics**. In: MILLER, Bruce e TILLMAN, David A. **Combustion Engineering Issues for solid fuel systems**, academic Press, Burlington, 2008.

MÜLLER, A.A.; SANTOS, H.M. dos, SCMITT, J.C.C.; MACIEL, L.A.C.; BERTOL, M.A.; CESAR, S.B. **Perfil analítico do carvão**. DNPM, boletim nº 6, 2ª edição revisada e atualizada. Porto Alegre. Brasil, 1987, p.140.

OSÓRIO, EDUARDO e VILELA. Antônio César Faria. **Meio Ambiente e Carvão**. Fundação estadual de Proteção Ambiental- FEPAM: **Utilização de carvão na siderurgia siderurgia**. P.149. **Estudo de caso. Cadernos de planejamento e gestão ambiental**. 2da Edição. Fundação Estadual de Proteção Ambiental. FEPAM. Nº 2, p.149-157. 2002.

PACHECO, E. T. **Estudo do beneficiamento a seco do carvão da Mina de Candiota**. 2008. Tese de Doutorado- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2008.78p.

PEUKER, K., FAGUNDES, L. **Primeiro relatório brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**. Sindicato Nacional da Indústria de Extração de Carvão Mineral-SNIEC, 2006. Disponível em <http://>

homologia.ambiente.sp.gov.br/proclima/publicações/relatórios_referencias/setor_energético/4. Pdf> acessado em Setembro de 2017.

PCM. **Programa de carvão de Moçambique**. Ministério dos Recursos Minerais de Moçambique. MIREM, Maputo. Moçambique, 1983.

RUBIO, J. **Carvão Mineral. Caracterização e beneficiamento**. Porto Alegre, Brasil: Nova Linha Artes gráficas, v1. 1988. 240p.

RMR- Lda: **Relatório de estudo de Viabilidade da Mina Rovuboé Lda**. Estudo de Viabilidade de Minas de Rovúboè, Tete. 2012.

SAMPAIO, Carlos Hoffmann; TAVARES, Luis Marcelo Marques. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. 1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, RS-Brasil, 2005.

SAMPAIO, Carlos Hoffmann. **Beneficiamento**. Cadernos de planejamento e gestão ambiental, 2da edição. Fundação estadual de proteção ambiental, FEPAM. p.29-42; 2002.

SAMPAIO, C.H.; ALIAGA, W.; PACHECO, E.T.; PETTER, E.; WOTRUBA, H. **Coal beneficiation of Candiota mine by dry jigging. Fuel Processing Technology**, [s.l.], v. 89, n. 2, p.198-202, Fevereiro. 2008. Elsevier BV.

SANTANA, E. R. R. **Caracterização e reconstrução mineralógica de carvão, caulim, calcários e de cinzas sulfatadas geradas à temperatura de um leito fluidizado, visando a sua aplicação na indústria sementeira**. Tese de Doutorado- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós- graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materias. Porto Alegre. Brasil, 2002.

SOUZA, K. F. **Caracterização das camadas superiores e inferiores da jazida de Candiota para estudos futuros de beneficiamento gravimétrico, visando o uso energético**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. Brasil, 2012.

STUTZER, O. e NOÉ, A. **Geology of coal**. University of Chicago. Press Chicago, ILLINOIS, 1940, p. 461.

SRK. **Consulting independent geological review regarding Minas de Moatize Project**. Tete Province, Mozambique. Report N.414110/Final, 2010.

TAGGART, Arthur F.; Handbook of Mineral Dressing: **Ores and Industrial Minerals**; Austin: John Wiley & Sons, 1945.

VALE. **Relatórios anuais da empresa**. Rio de Janeiro. Brasil, 2006, 2012 e 2014.

VALE MOÇAMBIQUE (Cia). **Projeto de caracterização de carvão de Moatize**. Tete. Moçambique, 2015.

VASCONCELOS L. **Geologia do carvão**: Caracterização geológica da bacia de Moatize-Moçambique, 2005.

VASCONCELOS, L.S. International Journal of Coal Geology. **Maceral types in some Permian southern African coals**. p. 99-107. 2012.

VASCONCELOS, L.S. **Coal in Mozambique.** Disponível em http://www.pucrs.br/cepac/download/3SGC/Lopo_Vasconcelos_Coal_in_Mozambique.pdf. 2009. acessado 04.05. 2016.

VASCONCELOS, L.S. **Overview of the Moatize Coal Basin geology, Tete province, Republic of Mozambique.** Chronicles of Mineral Research and Exploration. 2000. p. 538, 25–36.

WILLS, B. **Mineral Processing Technology: An Introduction to Practical Aspects of ore Treatment and Mineral Recovery.** Amsterdam: Elsevier. 2006.

WILLS & ATKINSON. **Mineral Processing Technology: An Introduction to Practical Aspects of ore Treatment and Mineral Recovery.** Amsterdam: Elsevier. 1991.

www.arcil.org.mo/por/pcsMozambique.htm><http://www.portaldogoverno.gov.mz>
. acessado em 25.06.2016.

APÊNDICES

Apêndice 1: Distribuição granulométrica da subcamada UCT

Abertura		Retida		Retida Ac. (%)		Passante Ac. (%)	
mm		kg	%	kg	%	kg	%
+50,8	50	3.385,80	16,00	3.385,80	16,37	17.299,00	83,63
50x1	1,0	12.979,70	63,00	16.365,50	79,12	4.319,30	20,88
1x0,25	0,25	2.818,90	14,00	19.184,40	92,75	1.500,40	7,25
- 0,25	0	1.500,40	7,00	20.684,80	100	0	0
TOTAL		20.684,80	100				

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 2: Distribuição granulométrica da subcamada UCB

Abertura		Retida		Retida Ac. (%)		Passante Ac. (%)	
mm		kg	%	kg	%	kg	%
+50,8	60	9.484	31,61	9.484	31,61	20.516,00	68,39
50x1	1	14.250	47,50	23.734	79,11	6.266,00	20,89
1x0,25	0,25	6.100	20,33	29.834	99,45	0.166,00	0,55
- 0,25	0	0.166	0,55	30.00	100	0	0
TOTAL		30.00	100				

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 3: Distribuição granulométrica da subcamada MLCU

Abertura		Retida		Retida Ac. (%)		Passante Ac. (%)	
mm		kg	%	kg	%	kg	%
+50,8	50	4.640,8	22%	4.640,8	21,59	16.855,4	78,41
-50,8+1	1	12.930	60%	1.7570,8	81,74	39.25,4	18,26
-1+0,25	0,25	3.421,3	16%	2.0992,1	97,65	504,1	2,35
- 0,25	0	504,1	2%	21.496,2	100	0	0
TOTAL		21.496,2	100%				

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 4 : Distribuição granulométrica da subcamada LC 45/6

Abertura		Retida		Retida Ac. (%)		Passante Ac. (%)	
mm		g	%	g	%	g	%
+50,8	60	5.172	17,24	5.172	17,24	24.828	82,76
50x1	1	15.450	51,50	20.622	68,74	9.378	31,26
1x0,25	0,25	9.250	30,83	29.872	99,57	128	0,43
- 0,25	0	128	0,43	30.000	100	0	0
TOTAL		30.000	100				

Fonte: O Pesquisador

**Apêndice 5: Tabela de resultados da análise de Umidade das subcamadas
(50 x1 mm)**

Densidade (g/cm ³)	CAMADAS			
	UCT	UCB	MLCU	LC45/6
Amostra -1,4	1,04	1,23	1,21	2,08
Réplica -1,4				
Amostra -1,5	0,73	1,11	1,27	1,99
Réplica -1,5				
Amostra -1,6	1,02	1,05	1,31	2,41
Réplica -1,6				
Amostra -1,7	0,63	0,95	0,94	2,78
Réplica -1,7				
Amostra -1,8	1,58	1,08	1,24	2,31
Réplica -1,8				
Amostra -1,9	1,04	1,20	1,25	2,04
Réplica -1,9				
Amostra -2,0	0,91	1,10	1,29	2,08
Réplica -2,0				
Amostra -2,2 Fl.	1,01	1,13	1,11	2,37
Réplica -2,2 Fl.				
Amostra +2,2 Af.	0,95	1,25	1,40	1,37
Réplica +2,2 Af.				

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 6: Tabela de resultados da análise de Matéria Volátil das subcamadas (50 x1 mm)

Densidade (g/cm ³)	SUBCAMADAS			
	UCT	UCB	MLCU	LC 45/6
Amostra -1,4	9,50	8,72	8,77	7,89
Réplica -1,4				
Amostra -1,5	20,95	22,53	19,31	20,85
Réplica -1,5				
Amostra -1,6	31,40	30,76	26,80	29,98
Réplica -1,6				
Amostra -1,7	39,38	40,62	39,47	38,40
Réplica -1,7				
Amostra -1,8	46,63	45,14	44,81	46,96
Réplica -1,8				
Amostra -1,9	49,61	52,08	54,13	52,98
Réplica -1,9				
Amostra -2,0	56,94	59,39	58,84	59,60
Réplica -2,0				
Amostra -2,2 FI	63,62	66,15	66,16	65,69
Réplica -2,2 FI				
Amostra +2,2 Af.	81,89	78,04	76,59	81,13
Réplica +2,2 Af.				

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 7: Tabela de resultados da análise de teores de cinzas das subcamadas (50 x1 mm)

Densidade (g/cm³)	CAMADAS			
	UCT	UCB	MLCU	LC45/6
Amostra -1,4	9,50	8,72	8,77	7,89
Réplica -1,4				
Amostra -1,5	20,95	22,53	19,31	20,85
Réplica -1,5				
Amostra -1,6	31,40	30,76	26,80	29,98
Réplica -1,6				
Amostra -1,7	39,38	40,62	39,47	38,40
Réplica -1,7				
Amostra -1,8	46,63	45,14	44,81	46,96
Réplica -1,8				
Amostra -1,9	49,61	52,08	54,13	52,98
Réplica -1,9				
Amostra -2,0	56,94	59,39	58,84	59,60
Réplica -2,0				
Amostra -2,2 FI	63,62	66,15	66,16	65,69
Réplica -2,2 FI				
Amostra +2,2 Af.	81,89	78,04	76,59	81,13
Réplica +2,2 Af.				

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 8: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada UCT (50X1mm)

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Teor de		FLUTUADOS			AFUNDADOS		ELEMENTAR	
	Massa	Cinzas	Massa Acumulada 1	NGM	Teor de Cinzas Massa Acumulada (%)	Massa Acumulada 2	Teor de Cinzas Massa Acumulada (%)	Curva Elementar	
	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)		
-1.4	10,32	9,50	10,32		9,50	100	54,93	9,50	10,32
+1.4-1.5	8,21	20,95	18,53	16,75	14,57	89,68	60,16	20,95	14,42
+1.5-1.6	8,55	31,40	27,07	13,29	19,89	81,47	64,11	31,40	22,80
+1.6-1.7	4,74	39,38	31,81	10,85	22,79	72,92	67,94	39,38	29,44
+1.7-1.8	6,11	46,63	37,92	15,12	26,63	68,19	69,93	46,63	34,87
+1.8-1.9	9,01	49,61	46,93	14,34	31,04	62,07	72,22	49,61	42,43
+1.9-2.0	5,33	56,94	52,26	14,99	33,68	53,07	76,06	56,94	49,59
2.0-2.2	9,66	63,62	61,92		38,35	47,74	78,19	63,62	57,09
+2.2	38,07	81,89	100		54,93	38,07	81,89	81,89	80,96
TOTAL	100	54,93							

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 9: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada UCB (50X1mm)

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Teor de		FLUTUADOS			AFUNDADOS		ELEMENTAR	
	Massa	Cinzas	Massa Acumulada 1	NGM	Teor de Cinzas Massa Acumulada (%)	Massa Acumulada 2	Teor de Cinzas Massa Acumulada (%)	Curva elementar	
	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)		
-1.4	16,23	8,72	1623		8,72	100	46,46	8,72	16,23
+1.4-1.5	11,50	22,53	27,73	21,35	14,44	83,77	53,77	22,53	21,98
+1.5-1.6	9,85	30,76	37,58	17,51	18,72	72,28	58,74	30,76	32,65
+1.6-1.7	7,66	40,63	45,24	14,60	22,43	62,43	63,15	40,63	41,41
+1.7-1.8	6,95	45,14	52,18	12,94	25,45	54,77	66,30	45,14	48,71
+1.8-1.9	5,99	52,08	58,18	13,60	28,20	47,82	69,38	52,08	55,18
+1.9-2.0	7,61	59,39	65,78	17,42	31,80	41,83	71,86	59,39	61,98
2.0-2.2	9,82	66,15	75,60		36,26	3422	74,63	66,15	70,69
+2.2	24,40	78,04	100		46,46	24,40	78,04	78,04	87,80
TOTAL	100	46.46							

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 10: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada MLCU (50X1mm)

			FLUTUADOS			AFUNDADOS		ELEMENTAR	
Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Massa (%)	Teor de Cinzas (%)	Massa Acumulada 1		Teor de Cinzas Massa Acumulada (%)	Massa Acumulada 2		Curva Elementar	
			(%)	NGM		(%)	(%)		
-1.4	15,54	8,77	15,54		8,77	100	45,11	8,77	15,54
+1.4-1.5	14,84	19,31	30,38	25,73	13,92	84,46	51,79	19,31	22,96
+1.5-1.6	10,88	26,80	41,27	15,78	17,32	69,62	58,71	26,80	35,82
+1.6-1.7	4,89	39,47	46,16	12,70	19,66	58,74	64,62	39,47	43,71
+1.7-1.8	7,80	44,81	53,96	15,44	23,30	53,84	66,91	44,81	50,06
+1.8-1.9	7,64	54,13	61,60	12,21	27,12	46,04	70,66	54,13	57,78
+1.9-2.0	4,57	58,84	66,17	13,66	29,31	38,41	73,94	58,84	63,88
2.0-2.2	9,09	66,16	75,26		33,76	33,84	75,98	66,16	70,71
+2.2	24,75	79,59	100		45,10	24,75	79,59	79,59	87,63
TOTAL	100	45,11							

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 11: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada LC 45/6 (50X1mm)

			FLUTUADOS			AFUNDADOS		ELEMENTAR	
Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Massa (%)	Teor de Cinzas (%)	Massa Acumulada 1		Teor de Cinzas Massa Acumulada (%)	Massa Acumulada 2		Curva Elementar	
			(%)	NGM		(%)	(%)		
-1.4	23,55	7,89	23,55		7,89	100	43,62	7,89	23,55
+1.4-1.5	16,05	20,85	39,60	24,90	13,14	76,45	54,62	20,85	31,57
+1.5-1.6	8,86	29,98	48,45	12,94	16,22	60,41	63,60	29,98	44,02
+1.6-1.7	4,09	38,40	52,54	7,81	17,95	51,55	69,37	38,40	50,50
+1.7-1.8	3,72	46,96	56,26	7,85	19,86	47,46	72,04	46,96	54,40
+1.8-1.9	4,13	52,98	60,39	8,43	22,13	43,74	74,17	52,98	58,33
+1.9-2.0	4,30	59,60	64,70	10,48	24,62	39,61	76,38	59,60	62,54
2.0-2.2	6,17	65,69	70,87		28,20	35,31	78,43	65,69	67,78
+2.2	29,13	81,13	100		43,62	29,13	81,13	81,13	85,44
TOTAL	100	43,62							

Fonte: O Pesquisador

**Apêndice 12: Tabela de resultados de análises de Umidade das subcamadas
(1x0,25 mm)**

Densidade (g/cm ³)	SUBCAMADAS			
	UCT	UCB	MLCU	LC45/6
Amostra -1,4	0,75	1,20	1,94	1,28
Réplica -1,4				
Amostra -1,5	0,86	1,12	2,15	1,11
Réplica -1,5				
Amostra -1,6	1,15	1,04	2,21	0,89
Réplica -1,6				
Amostra -1,7	1,10	1,16	2,19	1,10
Réplica -1,7				
Amostra -1,8	1,23	1,03	2,17	1,01
Réplica -1,8				
Amostra -1,9	1,21	1,18	2,46	1,15
Réplica -1,9				
Amostra -2,0	1,50	1,31	1,98	1,41
Réplica -2,0				
Amostra -2,2 Fl.	1,37	1,36	2,01	1,46
Réplica -2,2 Fl.				
Amostra +2,2 Af.	0,99	1,40	2,15	1,15
Réplica +2,2 Af.				

Fonte: O Pesquisador

**Apêndice 13: Resultados de análises de Materiais Voláteis das subcamadas
(1x0,25 mm)**

Amostra	SUBCAMADAS			
	UCT	UCB	MLCU	LC 45/6
Amostra -1,4	28,17	25,85	25,18	24,76
Réplica -1,4				
Amostra -1,5	25,80	20,92	22,91	21,53
Réplica -1,5				
Amostra -1,6	20,97	18,85	21,33	20,95
Réplica -1,6				
Amostra -1,7	19,46	17,62	19,12	18,37
Réplica -1,7				
Amostra -1,8	18,35	21,38	18,53	17,27
Réplica -1,8				
Amostra -1,9	17,32	15,70	17,78	16,07
Réplica -1,9				
Amostra -2,0	16,51	14,28	16,32	12,82
Réplica -2,0				
Amostra - 2,2 Fl.	14,84	14,19	14,61	14,60
Réplica - 2,2 Fl.				
Amostra +2,2 Af.	11,90	13,39	15,78	14,33
Réplica +2,2 Af.				

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 14: Tabela de resultados de análise de Teores de Cinzas das subcamadas (1x0,25 mm)

Amostra	SUBCAMADAS			
	UCT	UCB	MLCU	LC45/6
Amostra -1,4	4,99	9,75	9,28	9,60
Réplica -1,4				
Amostra -1,5	12,81	21,07	11,94	21,23
Réplica -1,5				
Amostra -1,6	27,36	31,54	21,39	30,64
Réplica -1,6				
Amostra -1,7	35,48	40,58	31,22	40,00
Réplica -1,7				
Amostra -1,8	44,44	43,43	39,90	47,27
Réplica -1,8				
Amostra -1,9	52,49	54,06	43,21	55,35
Réplica -1,9				
Amostra -2,0	58,54	60,98	56,46	63,42
Réplica -2,0				
Amostra -2,2 Fl.	68,33	67,09	67,71	68,88
Réplica -2,2 Fl.				
Amostra +2,2 Af.	84,00	78,97	78,16	79,58
Réplica +2,2 Af.				

Fonte: O Pesquisador

**Apêndice 15: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada UCT
(1x0,25 mm)**

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	FLUTUADOS				AFUNDADOS		ELEMENTAR		
	Massa	Teor de Cinzas	Massa Acumulada 1	NGM	Teor de Cinzas Massa Acumulada	Massa Acumulada 2	Teor de Cinzas Massa Acumulada	Curva Elementar	
	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)		
-1.4	43,95	4,99	43,95		4,99	100	30,03	4,99	43,95
+1.4-1.5	13,39	12,81	57,34	20,20	6,68	56,05	49,67	12,81	50,64
+1.5-1.6	6,81	27,36	64,15	10,88	8,87	42,66	61,24	27,36	60,75
+1.6-1.7	4,06	35,48	68,21	7,41	10,46	35,85	67,67	35,48	66,18
+1.7-1.8	3,35	44,44	71,56	6,92	12,05	31,78	71,79	44,44	69,89
+1.8-1.9	3,57	52,49	75,13	5,76	13,97	28,43	75,01	52,49	73,35
+1.9-2.0	2,19	58,54	77,32	7,76	15,23	24,86	78,24	58,54	76,23
2.0-2.2	5,58	68,33	8290		18,80	22,68	80,15	68,33	80,11
+2.2	17,10	84,00	100		29,95	17,10	84,00	84,00	91,45
TOTAL	100	30,03							

Fonte: O Pesquisador

**Apêndice 16: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada UCB
(1x0,25 mm)**

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	FLUTUADOS				AFUNDADOS		ELEMENTAR		
	Massa	Teor de Cinzas	Massa Acumulada 1	NGM	Teor de Cinzas Massa Acumulada	Massa Acumulada 2	Teor de Cinzas Massa Acumulada	Curva Elementar	
	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)		
-1.4	13,09	9,75	13,09		9,75	100	44,48	9,75	130,9
+1.4-1.5	12,26	21,07	25,35	28,81	15,23	86,91	49,71	21,07	19,22
+1.5-1.6	16,55	31,54	41,90	22,05	21,67	74,65	54,41	31,54	33,62
+1.6-1.7	5,49	40,58	47,39	13,18	23,86	58,10	60,93	40,58	44,65
+1.7-1.8	7,69	43,43	55,08	13,74	26,59	52,60	63,06	43,43	51,24
+1.8-1.9	6,05	54,06	61,13	20,38	29,31	44,92	66,41	54,06	58,11
+1.9-2.0	14,33	60,98	75,46	27,40	35,33	38,86	68,34	60,98	68,30
2.0-2.2	13,07	67,09	88,53		40,02	24,53	72,64	67,09	82,00
+2.2	11,47	78,97	100		44,48	11,47	78,96	78,97	94,26
TOTAL	100	44,48							

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 17: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada MLCU (1x0,25 mm)

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Massa (%)	Teor de Cinzas (%)	FLUTUADOS		AFUNDADOS		ELEMENTAR	
			Massa Acumulada 1 (%)	Teor de Cinzas Massa Acumulada NGM (%)	Massa Acumulada 2 (%)	Teor de Cinzas Massa Acumulada (%)	Curva Elementar	
-1.4	53,74	9,28	53,74		100	21,85	9,28	53,74
+1.4-1.5	15,50	12,94	69,24	22,73	46,26	36,45	12,94	61,49
+1.5-1.6	7,23	21,39	76,47	11,71	30,76	48,31	21,39	72,86
+1.6-1.7	4,48	31,22	80,96	7,01	23,53	56,58	31,22	78,71
+1.7-1.8	2,53	39,90	83,48	5,89	19,04	62,55	39,90	82,22
+1.8-1.9	3,37	43,21	86,85	5,45	16,52	66,01	43,21	85,17
+1.9-2.0	2,08	56,46	88,93	5,82	13,15	71,85	56,46	87,89
2.0-2.2	3,74	67,70	92,67		11,07	74,75	67,70	90,80
+2.2	7,33	78,16	100		7,33	78,34	78,16	96,33
TOTAL	100	21,84						

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 18: Tabela de resultados de ensaios de afunda-flutua da subcamada LC 45/6 (1x0,25 mm)

Faixa Densimétrica (g/cm ³)	Massa (%)	Teor de Cinzas (%)	FLUTUADOS		AFUNDADOS		ELEMENTAR	
			Massa Acumulada 1 (%)	Teor de Cinzas Massa Acumulada NGM (%)	Massa Acumulada 2 (%)	Teor de Cinzas Massa Acumulada (%)	Curva Elementar	
-1.4	21,68	9,60	21,68		100	51,46	9,60	21,68
+1.4-1.5	9,14	21,23	30,82	15,64	78,32	63,05	21,23	26,25
+1.5-1.6	6,50	30,64	37,32	11,34	69,18	68,57	30,64	34,07
+1.6-1.7	4,84	40,00	42,17	8,29	62,68	72,51	40,00	39,75
+1.7-1.8	3,45	47,27	45,62	5,54	57,83	75,23	47,27	43,89
+1.8-1.9	2,09	55,35	47,71	3,52	54,38	77,00	55,35	46,66
+1.9-2.0	1,43	63,42	49,13	7,63	52,30	77,87	63,42	48,42
2.0-2.2	6,21	68,88	55,34		50,87	78,27	68,88	52,24
+2.2	44,66	79,58	100		44,66	79,58	79,58	77,67
TOTAL	100	51,46						

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 19: Tabela de resultados da análise de Enxofre Total-UCT

ID: UCT- ROM	Enxofre (%)	Média (%)	Desvio Padrão
UCT - ROM - FI 1,4	0,870	0,870	0,009
UCT - ROM - FI 1,4	0,871		
UCT - ROM - FI 1,5	0,970	0,988	0,018
UCT - ROM - FI 1,5	1,006		
UCT - ROM - FI 1,6	0,913	0,909	0,005
UCT - ROM - FI 1,6	0,904		
UCT - ROM - FI 1,7	0,723	0,718	0,005
UCT - ROM - FI 1,7	0,713		
UCT - ROM - FI 1,8	0,799	0,800	0,002
UCT - ROM - FI 1,8	0,802		
UCT - ROM - FI 1,9	0,486	0,495	0,008
UCT - ROM - FI 1,9	0,503		
UCT - ROM - FI 2,0	0,530	0,522	0,009
UCT - ROM - FI 2,0	0,513		
UCT - ROM - FI 2,2	0,508	0,901	0,393
UCT - ROM - FI 2,2	1,294		
UCT - ROM – Af. +2,2	0,843	0,826	0,017
UCT - ROM – Af. +2,2	0,808		

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 20: Tabela de resultados da análise de Enxofre Total-UCB

ID: UCB- ROM	Enxofre	Média	Desvio Padrão
UCB ROM FI - 1.4	0,86809	0,85161	0,01649
UCB ROM FI - 1.4	0,83512		
UCB ROM FI - 1.5	0,786	0,78923	0,00322
UCB ROM FI - 1.5	0,79245		
UCB ROM FI - 1.6	0,68688	0,67695	0,00994
UCB ROM FI - 1.6	0,66701		
UCB ROM FI - 1.7	0,57414	0,57121	0,00293
UCB ROM FI - 1.7	0,56827		
UCB ROM FI - 1.8	0,61621	0,60616	0,01006
UCB ROM FI - 1.8	0,5961		
UCB ROM FI - 1.9	0,61056	0,60559	0,00498
UCB ROM FI - 1.9	0,60061		
UCB ROM FI - 2.0	0,32833	0,32546	0,00287
UCB ROM FI - 2.0	0,32259		
UCB ROM FI - 2.2	0,30665	0,29733	0,00933
UCB ROM FI - 2.2	0,288		
UCB ROM Af - +2.2	0,59557	0,59814	0,00257
UCB ROM Af - +2.2	0,60071		

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 21: Tabela de resultados da análise de Enxofre Total-MLCU

ID: MLCU- ROM	Enxofre	Média	Desvio Padrão
MLCU - ROM - FI 1.4	0,70	0,70	0,016
MLCU - ROM - FI 1.4	0,71		
MLCU - ROM - FI 1.5	0,62	0,60	0,002
MLCU - ROM - FI 1.5	0,61		
MLCU - ROM - FI 1.6	0,52	0,51	0,023
MLCU - ROM - FI 1.6	0,50		
MLCU - ROM - FI 1.7	0,52	0,50	0,004
MLCU - ROM - FI 1.7	0,49		
MLCU - ROM - FI 1.8	0,52	0,529	0,007
MLCU - ROM - FI 1.8	0,54		
MLCU - ROM - FI 1.9	0,474	0,487	0,013
MLCU - ROM - FI 1.9	0,50		
MLCU - ROM - FI 2.0	0,49	0,482	0,008
MLCU - ROM - FI 2.0	0,47		
MLCU - ROM - FI 2.2	0,465	0,480	0,015
MLCU - ROM - FI 2.2	0,49		
MLCU - ROM - Af 2.2	0,81	0,817	0,010
MLCU - ROM - Af 2.2	0,827		

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 22: Tabela de resultados da análise de Enxofre Total-LC 45/6

ID: LC 45/6- ROM	Enxofre	Média	Desvio Padrão
LC 45/6 - ROM - FI 1.4	0,47614	0,702435	0,01566
LC 45/6 - ROM - FI 1.4	0,63523		
LC 45/6 - ROM - FI 1.5	0,54815	0,63523	0,02675
LC 45/6 - ROM - FI 1.5	0,48124		
LC 45/6 - ROM - FI 1.6	0,55545	0,548145	0,00533
LC 45/6 - ROM - FI 1.6	0,37004		
LC 45/6 - ROM - FI 1.7	0,47614	0,481235	0,00156
LC 45/6 - ROM - FI 1.7	1,09490		
LC 45/6 - ROM - FI 1.8	0,46162	0,55545	0,00695
LC 45/6 - ROM - FI 1.8	0,47614		
LC 45/6 - ROM - FI 1.9	0,63523	0,37004	0,00279
LC 45/6 - ROM - FI 1.9	0,54815		
LC 45/6 - ROM - FI 2.0	0,48124	0,476135	0,01177
LC 45/6 - ROM - FI 2.0	0,55545		
LC 45/6 - ROM - FI 2.2	0,37004	1,0949	0,01450
LC 45/6 - ROM - FI 2.2	0,47614		
LC 45/6 - ROM - Af 2.2	1,09490	0,46162	0,00648
LC 45/6 - ROM - Af 2.2	0,46162		

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 23: Tabela de resultados da análise de Umidade das subcamadas após a jigagem

Gavetas	Densidade (g/cm ³)	SUBCAMADAS			
		UCT	UCB	MLCU	LC 45/6
A	Fl. 1,6	0,53	0,96	1,12	1,56
	Fl. 1,6				
	Fl. 2,2	1,07	1,18	1,30	1,10
	Fl.2,2				
	Af. 2,2	0,83	1,22	0,55	
	Af.2,2				-----
B	Fl. 1,6	0,49	0,92	0,87	1,02
	Fl. 1,6				
	Fl. 2,2	0,53	0,77	1,17	1,09
	Fl.2,2				
	Af. 2,2	2,66	2,65	0,87	0,84
	Af.2,2				
C	Fl. 1,6		1,00	1,23	0,97
	Fl. 1,6	-----			
	Fl. 2,2	1,12	1,12	1,00	1,14
	Fl.2,2				
	Af. 2,2	0,61	1,29	1,12	1.15

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 24: Tabela de resultados da análise de Teores de cinzas das subcamadas após a jigagem

Gavetas	Densidade (g/cm ³)	SUBCAMADAS			
		UCT	UCB	MLCU	LC 45/6
A	Fl. 1,6	21,45	17,28	13,95	2,29
	Fl. 1,6				
	Fl. 2,2	43,85	38,95	39,08	38,46
	Fl.2,2				
	Af. 2,2	54,01	51,68	50,76	
	Af.2,2				-----
B	Fl. 1,6	23,40	20,76	18,08	15,97
	Fl. 1,6				
	Fl. 2,2	50,76	64,74	41,42	40,46
	Fl.2,2				
	Af. 2,2	76,76	76,00	73,42	61,00
	Af.2,2				
C	Fl. 1,6		22,06	19,88	16,18
	Fl. 1,6	-----			
	Fl. 2,2	83,97	83,77	80,57	76,85
	Fl.2,2				
	Af. 2,2	88,61	84,77	83,97	83,49

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 25: Tabela de Resultados de análise petrográfica da subcamada UCT

Min: valor mínimo da refletância da vitrinita; Max: valor máximo da refletância da vitrinita;

VM: valor médio; S: desvio padrão; N: número de medidas.

Número de Laboratório	16-119
Número de Origem	Projeto Vale (Moatize, Moçambique)
Refletância da vitrinita	
V. Max	1,204
V. Min	0,791
V.M.	0,981
S	0,09
N	100
Rank	HVB-A
Análise de macerais (%)	
Colotenita	11,40
Colodetrinita	9,60
Vitrodetrinita	1,20
Vitrinita Total:	22,20
Cutinita	0,00
Esporinita	0,00
Resinita	0,00
Liptodetrinita	1,20
Liptinita Total:	1,20
Fusinita	9,00
Semifusinita	4,80
Inertodetrinita	7,40
Macrinita	1,40
Micrinita	0,00
Inertinita Total:	22,60
Argila	47,80
Carbonato	3,40
Quartzo	1,60
Pirita	1,20
Matéria Mineral Total:	54,00
Total	100

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 26: Tabela de Resultados de análise petrográfica da subcamada UCB

Min: valor mínimo da refletância da vitrinita; Max: valor máximo da refletância da vitrinita;

VM: valor médio; S: desvio padrão; N: número de medidas.

Número de Laboratório	16-059
Número de Origem	Projeto Vale (Moatize, Moçambique)
Refletância da vitrinita	
V. Max	1,323
V. Min	0,972
V.M.	1,125
S	0,083
N	100
Rank	MVB
Análise de Macerais (%)	
Colotenita	26,0
Colodetrinita	7,60
Vitrodetrinita	1,0
Vitrinita Total:	34,60
Cutinita	0,00
Esporinita	0,00
Resinita	0,00
Liptodetrinita	0,00
Liptinita Total:	0,00
Fusinita	5,40
Semifusinita	14,60
Inertodetrinita	5,60
Macrinita	1,40
Micrinita	0,00
Inertinita Total:	27,00
Argila	31,60
Carbonato	3,60
Quartzo	2,60
Pirita	0,60
Matéria Mineral Total:	38,40
Total	100

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 27: Tabela de resultados de análise petrográfica da subcamada MLCU

Min: valor mínimo da refletância da vitrinita; Max: valor máximo da refletância da vitrinita;

VM: valor médio; S: desvio padrão; N: número de medidas.

Número de Laboratório	16-118
Número de Origem	Projeto Vale (Moatize, Moçambique)
Refletância da vitrinita	
V. Max	1,214
V. Min	0,821
V.M.	1,036
S	0,074
N	100
Rank	HVB-A
Análise de Macerais(%)	
Colotenita	26,80
Colodetrinita	8,60
Vitrodetrinita	1,20
Vitrinita Total:	36,60
Cutinita	0,00
Esporinita	0,00
Resinita	0,00
Liptodetrinita	0,40
Liptinita Total:	0,40
Fusinita	8,60
Semifusinita	4,00
Inertodetrinita	8,60
Macrinita	1,20
Micrinita	0,00
Inertinita Total:	22,40
Argila	37,00
Carbonato	0,00
Quartzo	2,60
Pirita	1,00
Matéria Mineral Total:	40,60
Total	100

Fonte: O Pesquisador

Apêndice 28: Tabela de resultados da análise petrográfica da subcamada LC 45/6

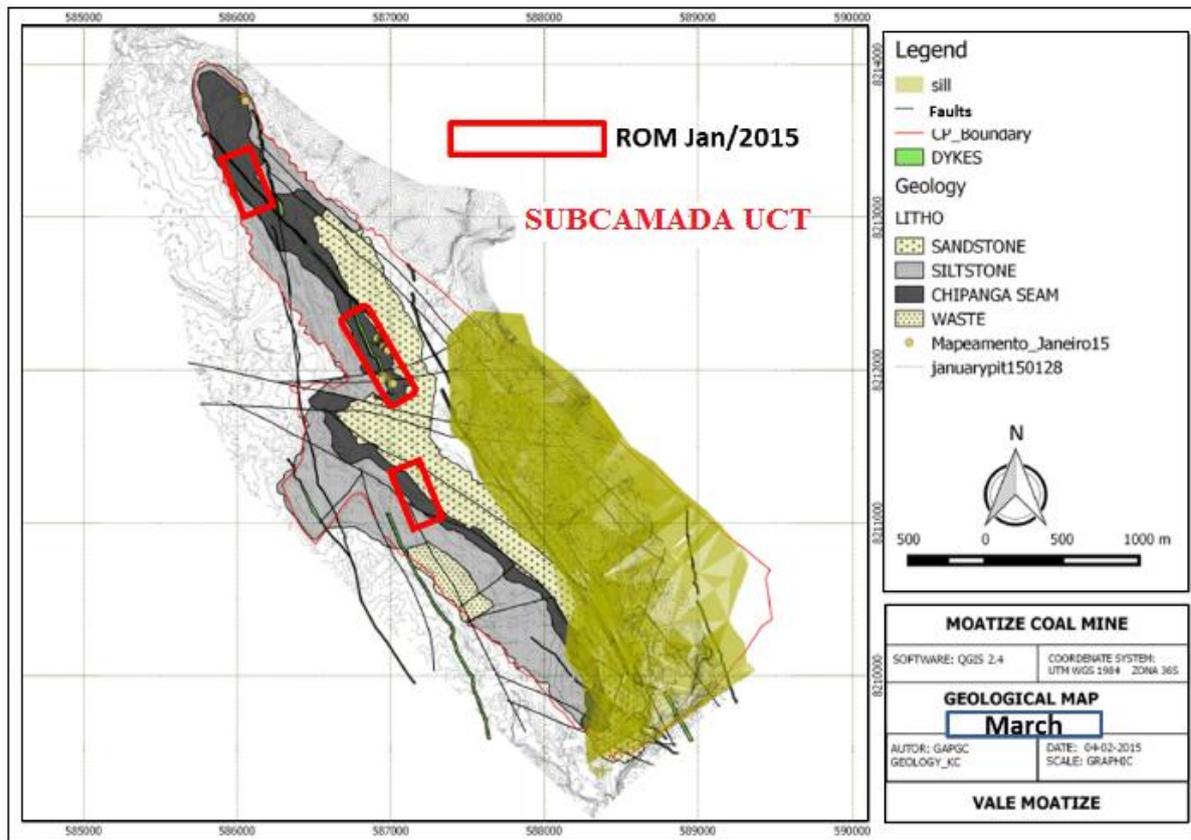
Min: valor mínimo da refletância da vitrinita; Max: valor máximo da refletância da vitrinita;

VM: valor médio; S: desvio padrão; N: número de medidas.

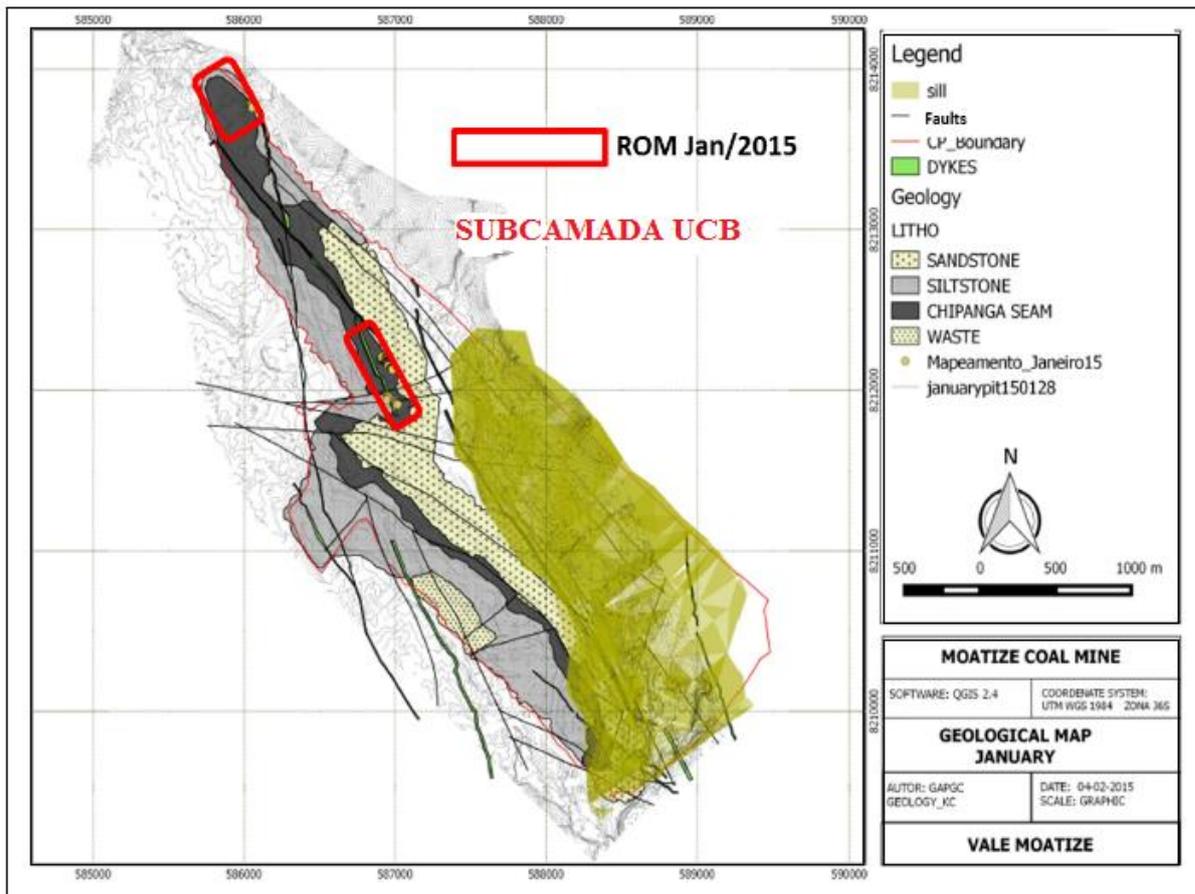
Número de Laboratório	16-060
Número de Origem	Projeto Vale (Moatize, Moçambique)
Refletância da vitrinita	
V. Max	1,351
V. Min	1,029
V.M.	1,152
S	0,063
N	100
Rank	HVB
Análise de Macerais (%)	
Colotenita	38,40
Colodetrinita	10,40
Vitrodetrinita	2,00
Vitrinita Total:	50,80
Cutinita	0,00
Esporinita	0,00
Resinita	0,00
Liptodetrinita	0,00
Liptinita Total:	0,00
Fusinita	4,20
Semifusinita	6,40
Inertodetrinita	3,60
Macrinita	0,60
Micrinita	0,00
Inertinita Total:	14,80
Argila	28,00
Carbonato	0,60
Quartzo	5,20
Pirita	0,60
Matéria Mineral Total:	34,40
Total	100

Fonte: O Pesquisador

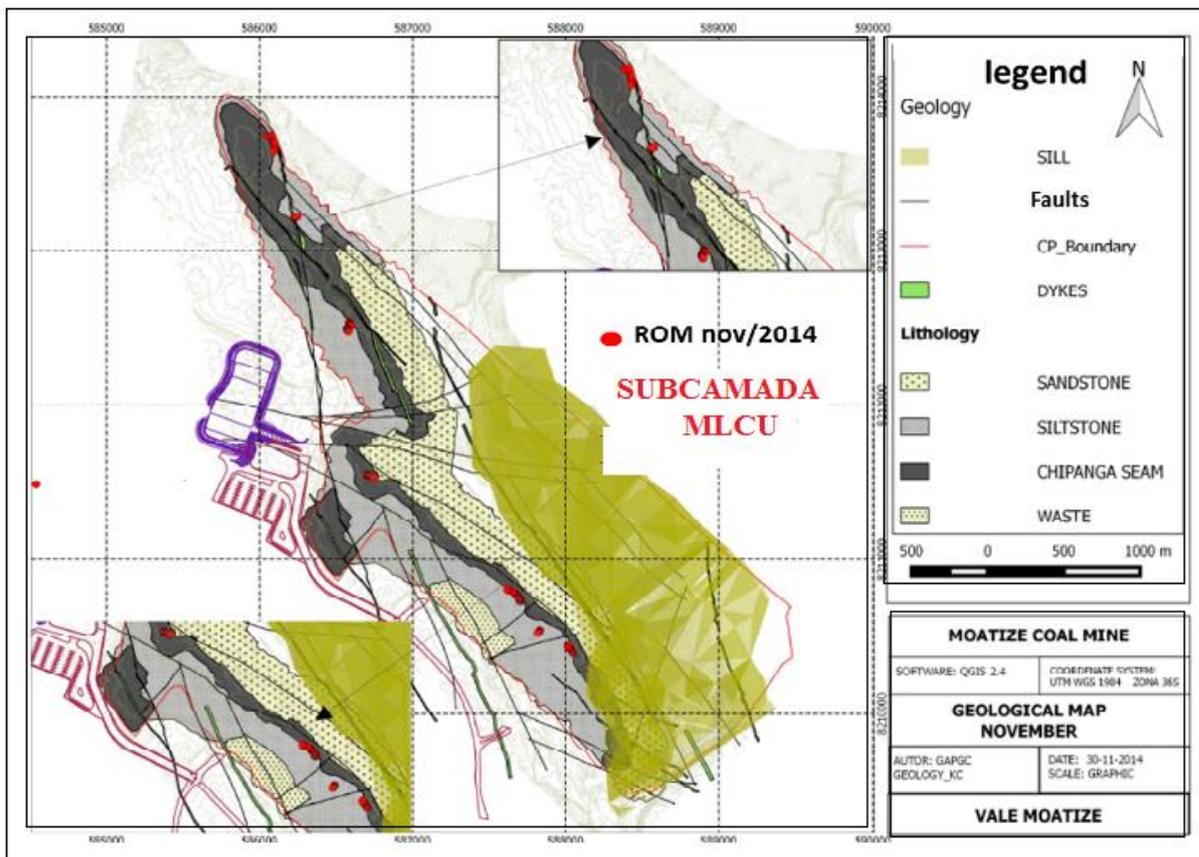
ANEXOS



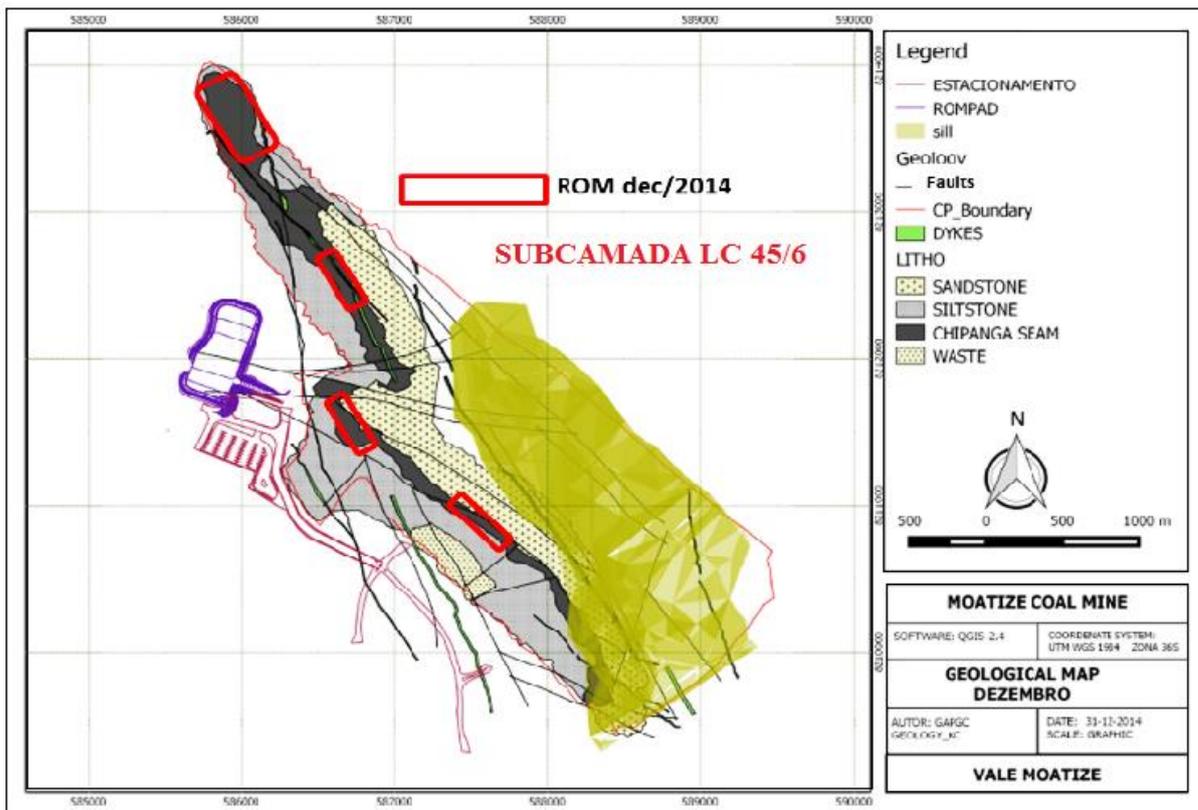
Anexo 1: Pontos de coleta de amostras da camada UCT-Minas de Moatize
Fonte: VALE (2015)



Anexo 2: Pontos de coleta de amostras da camada UCB- Mina de Moatize
 Fonte: VALE (2015)



Anexo 3: Pontos de coleta de amostras da camada MLCU- Mina de Moatize
 Fonte: VALE (2015)



Anexo 4: Pontos de coleta de amostras da camada LC 45/6- Mina de Moatize

Fonte: VALE (2015)