



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**  
**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**TEMA:**  
**ESTUDO DA BENEFICIAÇÃO DE AREIAS PESADAS DE CHIBUTO**

**Autor: Márcio Atanásio Mabote**

**Supervisor: Prof. Doutor Engº António Cumbane**

**Maputo, Julho de 2024**



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**  
**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**TEMA:**  
**ESTUDO DA BENEFICIAÇÃO DE AREIAS PESADAS DE CHIBUTO**

**Autor: Márcio Atanásio Mabote**

**Supervisor: Prof. Doutor Eng<sup>o</sup> António Cumbane**

**Maputo, Julho de 2024**



**FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO TRABALHO DE  
LICENCIATURA**

Declaro que o estudante finalista Márcio Atanásio Mabote entregou no dia \_\_\_ / \_\_\_ / 2024 as \_\_\_ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência \_\_\_\_\_ intitulado: Estudo da Beneficiação de Areias Pesadas de Chibuto.

Maputo, \_\_\_\_ de Julho de 2024

A Chefe da Secretaria

---

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Márcio Atanásio Mabote declaro por minha honra que este relatório de trabalho de licenciatura é da minha autoria e resulta da minha investigação. Esta é a primeira vez que submeto para obter um grau académico numa instituição educacional.

Maputo, aos \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2024

---

(Márcio Atanásio Mabote)

## DEDICATÓRIA

Dedico esta Monografia aos meus pais

Maria João Francisco Cossa e Atanásio Feleciano Taela,

aos meus dois irmãos Letícia Mabote e Óscar Mabote que com muito amor e esforço me ajudaram a chegar até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida, pela saúde, forças e bênçãos que tem depositado em mim durante todo este maravilhoso percurso como estudante.

Agradeço imensamente aos meus pais e irmãos que sempre me apoiaram com tudo que foi necessário para chegar até aqui, tanto sob ponto de vista material assim como emocional.

Agradeço a Faculdade de Engenharia, e um especial obrigado ao Prof. Dr. Eng. António Cumbane, pela confiança, orientação e acompanhamento durante este trabalho.

Agradeço também aos técnicos de laboratório, pelo apoio, disponibilidade e confiança que sempre depositaram em mim durante o decurso de todas etapas deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e colegas da turma de Engenharia Química de 2020, Anatórica, João, Sérgio, Edson, Delson, Shaquilla, Eden, Márcia, Wilson, Neldy, Estácio, Elias, Nazira, Manecas, Chelsea, Armando, Sixpence e outros que participaram desta caminhada, pelo apoio incondicional e precioso que sempre me prestaram.

## RESUMO

Moçambique é um país rico em areias pesadas e com um potencial para se colocar como um dos maiores produtores mundiais de minerais como ilmenite, rútilo e zircão. Por esta razão desenvolveu-se um estudo sobre a beneficiação das areias pesadas de Chibuto.

Numa primeira fase fez-se a colheita de uma amostra de areias pesadas no distrito de Chibuto em Gaza, donde se retirou uma amostra representativa (previamente homogenizada e quartejada) para efectuar a separação granulométrica. Desta separação verificou-se que cerca de 85% dos grãos desta areia têm dimensões inferiores à 1000  $\mu\text{m}$  e superiores à 250  $\mu\text{m}$ . De seguida, cada fracção granulométrica de areia obtida da etapa anterior foi submetida a separação gravítica numa mesa vibratória Wilfley, onde o concentrado da fracção granulométrica de 125  $\mu\text{m}$  demonstrou ser o mais rico em minerais pesados. Após a separação gravítica, cada fracção de concentrado obtida na mesa Wilfley foi submetida a uma separação magnética começando pelo íman de mão seguido do separador electromagnético Frantz, obtendo-se desse jeito duas fracções: a dos minerais magnéticos com cerca de 70% e das dos minerais não magnéticos (19%). De seguida, cada fracção de concentrado da mesa Wilfley foi submetida a análise mineralógica clássica usando o microscópio óptico binocular, onde verificou-se que grande parte dos minerais pesados ocorrem nas faixas granulométricas mais finas. Depois, as fracções do concentrado da mesa Wilfley foram misturados e submetidos a difractometria de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X (FRX) e picnometria. Na análise por DRX do concentrado (minerais pesados) verificou-se que ele é constituído maioritariamente por ilmenite (cerca de 53%), acompanhado de outros minerais como hematite, magnetite, zircão, rútilo, caulinite, quartzo, zincocromita e eskolaite. Da análise por FRX verificou-se que o concentrado é constituído maioritariamente por  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , acompanhados de outros compostos como  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{ZnO}$ . Por fim realizou-se a medição da densidade tanto do concentrado como do rejeito (obtidos na mesa Wilfley) através da picnometria e notou-se que a densidade do concentrado era de aproximadamente 4,55 que é geralmente a média da densidade dos minerais pesados e a do rejeito era de 2,65 que é a média dos minerais de ganga/leves como o quartzo.

**Palavras chave:** Areias pesadas, Chibuto, separação gravítica, DRX, FRX, ilmenite.

# ÍNDICE

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA .....	i
DECLARAÇÃO DE HONRA .....	ii
DEDICATÓRIA .....	iii
AGRADECIMENTOS .....	iv
RESUMO .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABELAS .....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	xii
Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1. Justificativa .....	2
1.2. Objectivos .....	2
1.2.1. Objectivo Geral .....	2
1.2.2. Objectivos Específicos.....	2
1.3. Estrutura do Trabalho .....	3
Capítulo 2: Revisão Bibliográfica.....	4
2.1. Areias Pesadas.....	4
2.1.1. Características dos principais minerais pesados.....	4
2.1.1.1. Ilmenite.....	5
2.1.1.2. Zircão .....	6
2.1.1.3. Rútilo.....	7
2.2. Exploração de Areias Pesadas a Nível de Moçambique.....	9
2.3. Processamento e Caracterização de Areias Pesadas.....	11
2.3.1. Técnicas usadas na caracterização de areias pesadas .....	12
2.3.1.1. Amostragem.....	12
2.3.1.2. Classificação Granulométrica .....	12
2.3.1.3. Picnometria.....	14



2.3.1.4. Análise mineralógica clássica usando microscópio óptico .....	15
2.3.1.5. Difractometria de raios X (DRX) .....	17
2.3.1.6. Fluorescência de Raios X .....	18
2.3.2. Técnicas usadas na concentração de areias pesadas .....	18
2.3.2.1. Concentração Gravítica .....	18
2.3.2.2. Concentração magnética.....	21
2.3.2.3. Concentração Electrostática .....	22
Capítulo 3: Metodologia.....	25
3.1. Aquisição das amostras.....	25
3.2. Experiências Laboratoriais.....	26
3.2.1. Materiais usados .....	26
3.2.2. Fluxograma das experiências laboratoriais .....	27
3.2.3. Amostragem .....	27
3.2.4. Classificação Granulométrica.....	28
3.2.5. Separação Gravítica .....	29
3.2.6. Separação magnética.....	29
3.2.8. Fluorescência de Raios X.....	31
3.2.9. Difractometria de Raios X .....	32
3.2.10. Picnometria.....	33
Capítulo 4: Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados .....	34
4.1. Classificação Granulométrica .....	34
4.2. Separação Gravítica.....	35
4.3. Separação Magnética.....	37
4.4. Análise Mineralógica Clássica .....	38
4.4. Análise por Fluorescência de Raios X.....	41
4.4. Análise por Difractometria de Raios X .....	43
4.5. Picnometria .....	45

Capítulo 5: Conclusões e Recomendações .....	47
5.1. Conclusões .....	47
5.2. Recomendações .....	48
Bibliografia .....	49
Anexos e Apêndices .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mineral ilmenite.....	5
Figura 2: Mineral zircão .....	6
Figura 3: Mineral rútilo.....	7
Figura 4: Principais áreas de aplicação dos minerais pesados no mundo.....	9
Figura 5: Mina de areias pesadas em Moma.....	10
Figura 6: Mina de areias pesadas de Chibuto.....	10
Figura 7: Série de peneiras num agitador de peneiras.....	13
Figura 8: Picnômetros utilizados para determinação de densidade de sólidos.....	15
Figura 9: Constituintes do microscópio óptico.....	17
Figura 10: Esquemática da mesa vibratória de Wilfley (A) e da vista plana da mesa (B). ..	19
Figura 11: Esquema de uma espiral Humphreys.....	20
Figura 12: Separador magnético isodinâmico de Frantz.....	22
Figura 13: Esquema do separador eletrodinâmico de tambor ou de alta tensão.....	24
Figura 14: Fluxograma resumido da concentração de minerais pesados na indústria.....	24
Figura 15: Área de colecta da amostra.....	25
Figura 16: Rota usada durante as experiências laboratoriais.....	27
Figura 17: Quarteamento da amostra.....	28
Figura 18: Peneiramento da amostra.....	28
Figura 19: Organização da mesa (à esquerda) e separação gravítica da amostra (à direita)..	29
Figura 20: Operação no separador Isodinâmico Frantz.....	30
Figura 21: Observação dos minerais usando a microscópio óptico binocular.....	30
Figura 22: Prensagem (à esquerda) e pastilhas prensadas (à direita).....	31
Figura 23: Aparelho usado na análise por FRX.....	32
Figura 24: Aparelho usado para a análise por DRX.....	32
Figura 25: Minerais observados na fracção granulométrica de 355 $\mu\text{m}$ . .....	38
Figura 26: Minerais observados na fracção granulométrica de 250 $\mu\text{m}$ . .....	39
Figura 27: Minerais observados na fracção granulométrica de 180 $\mu\text{m}$ . .....	39
Figura 28: Minerais observados na fracção granulométrica de 125 $\mu\text{m}$ . .....	40
Figura 29: Resultados de DRX para o concentrado.....	43
Figura 30: Resultados de DRX para o rejeito.....	45

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de outros minerais encontrados nas areias pesadas. ....	8
Tabela 2: Materiais usados durante a realização das experiências.. ....	26
Tabela 3: Resultados do peneiramento da amostra. ....	34
Tabela 4: Resultados da operação na mesa Wilfey. ....	36
Tabela 5: Percentagens das fracções de concentrado separadas magneticamente.....	37
Tabela 6: Resultados da análise por FRX para o concentrado. ....	41
Tabela 7: Resultados da análise por FRX para o rejeito (ganga).....	42
Tabela 8: Resultados da análise por DRX para o concentrado.....	43
Tabela 9: Resultados da análise por DRX para o rejeito (ganga).....	44
Tabela 10: Resultados dos cálculos das densidades médias relativas. ....	45

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: curva de frequências (à esquerda) e curva cumulativa da fracção passante (à direita). .....	14
Gráfico 2: Curva cumulativa passante da distribuição granulométrica .....	35
Gráfico 3: Curva da variação da percentagem do concentrado em função do diâmetro nominal. ....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A: Ampere

A<sub>1</sub>: massa do picnômetro vazio.

A<sub>2</sub>: massa do picnômetro + amostra.

A<sub>3</sub>: massa do picnômetro + amostra+ água.

A<sub>4</sub>: massa do picnômetro + água.

Al: Alumínio

Ca: Cálcio

Co: Cobalto

Cr: Crômio

d: desvio padrão

d<sub>s</sub>: densidade relativa dos sólidos.

e: erro

DRX: Difractometria de raios-X

Fe: Ferro

FRX: Fluorescência de raios-X

g/cm<sup>3</sup>: grama por centímetro cúbico

Hz: Hertz

K: Potássio

Na: Sódio

m: metro

mm: milímetro

mL: mililitro

Mg: Magnésio

Mn: Manganés

O: Oxigênio

P: Fósforo

PIB: Produto Interno Bruto

S: Enxofre

Si: Silício

Ti: Titânio

UV: Ultravioleta

W: Tungstênio

Zn: Zinco

Zr: Zircônio

°C: Graus Celsius

μ: micro

## **Capítulo 1: Introdução**

Moçambique é um país que apresenta uma grande diversidade de recursos minerais ao longo do seu território como carvão, ouro, pedras preciosas, areias pesadas, etc. A abundância destes recursos de elevado valor no mercado tem impulsionado a entrada de fortes investimentos de capital estrangeiro no país, acelerando o desenvolvimento económico e social das comunidades.

Dentre os vários recursos explorados no país, destaca-se a exploração de areias pesadas. Este recurso está actualmente a ser explorado em distritos como Moma em Nampula e Chibuto em Gaza. O depósito de minerais pesados de Chibuto é um dos maiores do mundo, possuindo, pelo menos, 14 000 Mton de areias ricas em ilmenite, rutilo e zircão (Peixoto, Anjo, & Bonito, 2015).

Dias (2004), define “areias pesadas” ou “minerais pesados” como sendo os grãos mineralógicos (principalmente da areia), provenientes de rochas ígneas e metamórficas, onde ocorrem normalmente de forma acessória, cuja densidade é superior a 2,9, isto é, superior à do quartzo (2,65) e à dos feldspatos (2,56 a 2,76). Das areias pesadas pode-se separar a ilmenite, rutilo e zircão.

A caracterização mineralógica de um minério determina e quantifica toda a assembleia mineralógica, define quais são os minerais de interesse e de ganga, bem como quantifica a distribuição dos elementos úteis entre os minerais de minério, se mais de um. Além disso, estuda as texturas da rocha, definindo o tamanho de partícula necessário para liberação dos mineral de interesse dos minerais de ganga, e ainda define diversas propriedades físicas e químicas destes minerais, gerando informações potencialmente úteis na definição das rotas de processamento (Da Luz, Sampaio, & França, 2010).

Com este trabalho, pretende-se fazer o estudo do beneficiamento das areias pesadas do distrito de Chibuto, província de Gaza, contribuindo deste modo com informações e dados importantes para os projectos de exploração nesta área e para o crescimento do sector mineiro em Moçambique.



## **1.1. Justificativa**

A exploração dos recursos minerais tem desempenhado um papel de extrema importância no desenvolvimento económico e social dos países africanos, contribuindo para o aumento do PIB e empregabilidade.

Em Moçambique, sector mineiro vem crescendo mais do que os outros sectores da economia nacional, no entanto, contribui com menos de 2% no PIB, com apenas 3% na receita fiscal e emprega menos de 0,1% do total da força do trabalho nacional. Embora nos últimos anos a produção mineral esteja a ganhar peso na economia de Moçambique, a sua participação mundial, tanto em reservas, como em produção é de apenas 0,1%, com a exceção das areias pesadas (ilmenite, rútilo e zircônio) que têm a sua participação variando entre 1 à 9 % (Armando, 2015).

A exploração de areias pesadas no país tem aberto um vasto campo de pesquisa para a caracterização deste recurso encontrado nos vários pontos do país.

Este trabalho visa produzir informações técnicas sobre o beneficiamento de areias pesadas, contribuindo para o aprimoramento dos projectos de exploração deste recurso no distrito de Chibuto, província de Gaza e para o desenvolvimento do sector mineiro no país.

## **1.2. Objectivos**

### **1.2.1. Objectivo Geral**

- Estudar a beneficiação de areias pesadas de Chibuto.

### **1.2.2. Objectivos Específicos**

- Fazer a caracterização física da amostra através da análise granulométrica por peneiração;
- Realizar a separação dos minerais usando o método da concentração gravítica;
- Realizar a separação dos minerais usando o método da concentração magnética;
- Fazer a caracterização mineralógica dos concentrados de minerais pesados pelo método da análise mineralógica clássica;
- Fazer a caracterização mineralógica dos concentrados de minerais pesados pelo método de DRX;

- Fazer a caracterização química dos concentrados de minerais pesados pelo método de FRX;
- Fazer a caracterização física dos concentrados de minerais pesados pelo método de picnometria.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Para a realização deste trabalho, foi feita a divisão do mesmo em 5 capítulos que são descritos a seguir:

- No primeiro capítulo, são apresentadas as generalidades do trabalho como a introdução do tema, a justificativa e os objectivos;
- No segundo capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica onde abordam-se os conceitos teóricos relacionados com o tema em estudo;
- No terceiro capítulo, aborda-se a metodologia usada durante a realização do trabalho, onde foram descritos os materiais assim como os procedimentos experimentais utilizados para o alcance dos objectivos descritos em 1.1.
- No quarto capítulo, temos a apresentação e discussão dos resultados obtidos nas experiências realizadas;
- Por fim no quinto capítulo apresenta-se as conclusões e as recomendações do trabalho.

## Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

### 2.1. Areias Pesadas

As areias pesadas são constituídas essencialmente pelo quartzo que ocorre em quantidades significativas, óxidos de ferro e minerais densos ou pesados como o zircão, ilmenite e rútilo em proporções que variam de local para local. Estes minerais são conhecidos como fontes primárias dos elementos químicos metálicos zircônio (Zr) e titânio (Ti) e por isso tornam estas areias interessantes do ponto de vista económico (Jalo, 2018).

Segundo Gonçalves (2019), com base nos minerais pesados predominantes essas areias podem ser classificadas em:

- **Areia ilmenítica:** quando é rica em cristais de ilmenite e fazem parte da sua composição minerais como rútilo e zircão,
- **Areia monazítica:** quando é rica em monazite, minério constituído por fosfatos de metais do grupo cério e de tório.

A maioria dos depósitos de areias pesadas são encontrados nas linhas costeiras fósseis não consolidadas, a várias centenas de metros, dezenas de quilômetros e, ocasionalmente, centenas de quilômetros para o interior da presente linha da costa (Mussá, 2022).

Todos os componentes dos depósitos de areias pesadas têm alta gravidade específica (superior a  $2,85 \text{ g/cm}^3$ ) e tendem a concentrar-se durante as tempestades, quando componentes mais leves, como quartzo, são carregadas offshore ou ao longo da costa, por forte deriva litorânea. A acumulação de minerais pesados, ocorre durante os períodos de bom clima de formação de praia e são estes minerais pesados que fornecem a base para as linhas de costa mais espessas dos minerais pesados, formados durante grandes eventos de tempestade (Lines, 2008).

#### 2.1.1. Características dos principais minerais pesados

Os minerais pesados podem ser caracterizados segundo às suas propriedades físicas (densidade, cor, brilho, dureza, susceptibilidade magnética, entre outras) assim como consoante a sua composição química.

Dentre os principais minerais pesados encontrados nas areias pesadas destacam-se os seguintes: a ilmenite, zircão e rútilo.

### 2.1.1.1. Ilmenite

A ilmenite é um óxido natural de ferro e titânio ( $\text{FeTiO}_3$ ), que corresponde aproximadamente a 52,6% em peso de  $\text{Ti}_2\text{O}$  e 47,4% de  $\text{FeO}$ . Cristaliza no sistema trigonal. Apresenta média a elevada densidade (4,7 a 4,79) e dureza média (5 à 6, na escala de Mohs). É opaco, tem cor preta e é um importante minério de titânio. Em termos de propriedades diagnósticas, a ilmenite pode ser identificada pelas suas propriedades magnéticas fracas, e também pela densidade e brilho metálico a submetálico. Os cristais de ilmenite são geralmente maciços e romboédricos (Jalo, 2018).

A ilmenite pode ser encontrada como mineral acessório em rochas metamórficas e intrusões de rochas ígneas, especialmente gabros e noritos. O nome ilmenite deve-se muito provavelmente a um dos locais onde foi descoberto e explorado de forma abundante, os Montes Ilmenski, perto de Miass, na Rússia. Em certas condições apresenta-se numa associação variável, normalmente com magnetite em rochas basálticas e ácidas (Jalo, 2018).

Com apenas um olhar, pode ser facilmente confundido com hematita e magnetita. A diferenciação é fácil. A hematita tem uma faixa vermelha, enquanto a ilmenita tem uma faixa preta. A magnetita é fortemente magnética, enquanto a ilmenita não é magnética. Ocasionalmente, a ilmenita é fracamente magnética, possivelmente devido a pequenas quantidades de magnetita incluída (Grachane, 2022).



Figura 1: Mineral ilmenite.

Fonte: <https://www.britannica.com/science/ilmenite> (2011)

A ilmenite é um importante minério fonte de ferro e titânio, principalmente deste último. A maior parte da ilmenite minerada é obtida de fontes secundárias, tais como areias de praia,

onde é encontrada normalmente como partículas arredondadas com um diâmetro entre 0,1 e 0,2 mm. A ilmenite é explorada tendo em vista a produção de dióxido de titânio. Por sua vez, o dióxido de titânio é um pigmento branco de alta qualidade e é também utilizado para a produção de titânio metal. O maior uso de titânio é, sob a forma de titânio (IV), este é amplamente utilizado como pigmento branco brilhante com excelente poder de cobertura em tintas, plásticos, esmaltes e papel. O titânio (IV) ainda é utilizado em filtros solares porque impede que a luz UV atinja a pele. Nanopartículas de titânio (IV), óxido e tem a tendência de ficar invisível quando aplicado à pele (Jalo, 2018).

#### **2.1.1.2. Zircão**

O zircão é um silicato de zircônio de fórmula química  $ZrSiO_4$ , com composição aproximada de 67,2% de  $ZrO_2$  e 32,8% de  $SiO_2$ . A estrutura cristalina do zircão é tetragonal com um hábito prismático, brilho vítreo e fractura concoidal. A coloração natural do zircão varia desde incolor passando pelo rosa, lilás, esverdeado, amarelado, acinzentado, acastanhado, amarelo-alaranjado, vermelho, castanho, castanho-escuro, amarelo escuro, cinzento-escuro ou branco leitoso. Ocorre como mineral acessório de rochas plutônicas, principalmente rochas ricas em sódio, em granitos e pegmatitos, também em rochas sedimentares, como arenitos (Pratas, 1997)

Apresenta média a elevada densidade (3,9 a 4,86), alta dureza (6,5 à 7,5 na escala de Mohs), elevado índice de refração, elevado ponto de fusão (1500°C), baixa expansão térmica, e é muito resistente ao ataque ácido, choque térmico e desgaste por atrito (Jalo, 2018).



Figura 2: Mineral zircão

Fonte: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/silicatos/nesossilicatos/zircao/> (2021)

O zircão na forma mineral é utilizado principalmente como um opacificante, nomeadamente na indústria cerâmica. Outros usos são, por exemplo, refratários, barras de combustível

nuclear, conversores de combustível catalítico e em sistemas de purificação de água e ar. O zircão é ainda um dos principais minerais utilizados pelos geólogos para datações (Jalo, 2018).

São ainda utilizadas areias de zircão para aumentar a resistência global e a resistência ao calor de materiais cerâmicos para fornos de alta temperatura, devido ao seu ponto de fusão alto, é utilizado na fundição dos certos elementos; ponto de fusão: 1 855 °C. É utilizado em muitos revestimentos das fundições, tanques químicos e unidades de contenção de calor. Além disso, o pó de zircão em esmaltes cerâmicos lhes dá uma opacidade que permite que as cores permanecem fixas. O zircão também é comercializado como uma pedra preciosa natural (Jalo, 2018).

Os países com reservas significativas deste mineral são o Brasil, Moçambique, Rússia, China, Estados Unidos da América, Austrália, Áustria, Suíça e Índia. A estes juntam-se o Senegal e a Guiné-Bissau com reservas assinaláveis já identificadas (Jalo, 2018).

### **2.1.1.3. Rútilo**

O mineral rútilo é um dióxido de titânio (fórmula química  $TiO_2$ ), sendo um dos três polimorfos de  $TiO_2$  (anátase e brookita). Cristaliza no sistema tetragonal e pode ser utilizado para a extração de titânio. Tem uma densidade relativa entre 4,1 a 4,2, brilho metálico a adamantino, é opaco e transparente quando pouco espesso, e cor geralmente marrom ou vermelho, algumas vezes, amarelo, azul ou violeta. Este mineral pode conter até 10% de ferro (Jalo, 2018).



Figura 3: Mineral rútilo.

Fonte: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxitos/rutilo/> (2021)

Os principais usos do rútilo são o fabrico de cerâmica refratária, como pigmento, e a produção do metal de titânio. O rútilo finamente moído é um pigmento branco brilhante que é utilizado em tintas, plásticos, borracha, papel, cosméticos, alimentos e outras aplicações que exigem uma cor branca brilhante. O  $TiO_2$  produz brancura a 90% e o padrão 100% é o  $MgO$ . As partículas de rútilo são transparentes à luz visível, mas são altamente eficazes na absorção de radiação ultravioleta, razão pela qual estas partículas são utilizadas como protetores solares. O rútilo é ainda amplamente utilizado como revestimento de elétrodos de soldagem. Mais recentemente tem sido comercializado um produto de substituição semelhante ao sintético (Jalo, 2018).

Para além dos minerais pesados apresentados em 2.2.1, outros minerais podem ser encontrados nas areias pesadas tais como: quartzo, feldspato, magnetite, hematite, perovskita.

Tabela 1: Propriedades de outros minerais encontrados nas areias pesadas.

Mineral	Fórmula Química	Densidade Relativa	Dureza	Cor
Quartzo	$SiO_2$	2,6	7	Transparente/incolor, branco
Feldspato	(K, Na, Ca) (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	2,5-2,	6-6,5	Branco, rósea
Magnetite	$Fe_3O_4$	5,2	6	Preto
Hematite	$Fe_2O_3$	5-5,2	5-6	Cinza metálico
Perovskita	$CaTiO_3$	4-4,25	5,5-6	verde, marrom, amarelo pálido, laranja amarelado, castanho e preto.

Fonte: Adaptada de Cumbane (2000).

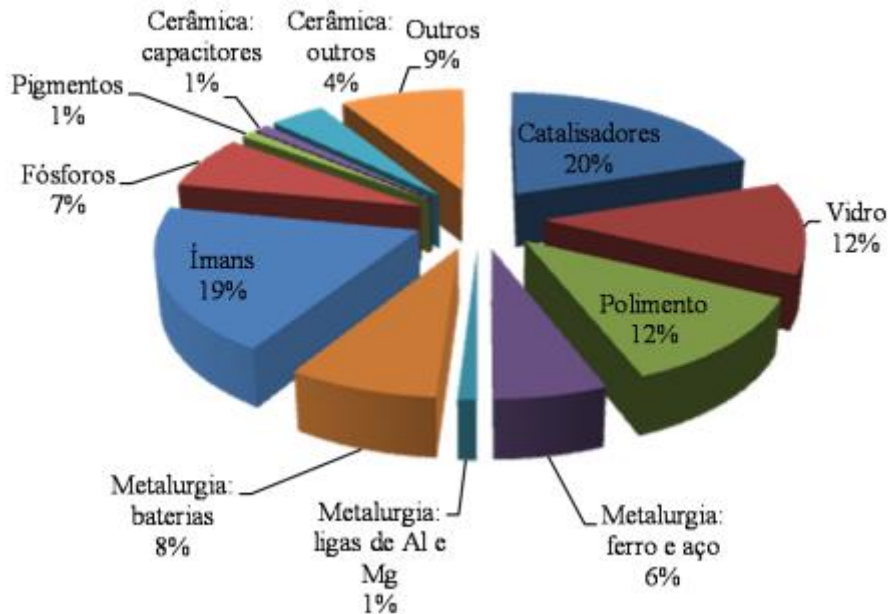


Figura 4: Principais áreas de aplicação dos minerais pesados no mundo.

Fonte: Adaptado de European Commission (2010)

## 2.2. Exploração de Areias Pesadas a Nível de Moçambique

Moçambique é um dos países onde a actividade extractiva de minerais pesados tem tido maior desenvolvimento.

A nível de Moçambique, as Areias Pesadas ocorrem em diversos locais ao longo da costa de Moçambique. O desenvolvimento de novos projectos para a produção de produtos minerais a partir das areias pesadas está dependente do mercado internacional para absorver tais produtos.

No distrito de Moma, na província de Nampula, em Moçambique, encontram-se algumas das maiores reservas de areias pesadas do mundo.

Em 19 de Outubro de 2007, foi iniciada a fábrica para a produção de areias pesadas de Moma, localizada na povoação de Tupuito.

Segundo o Diário Económico (26 de Outubro de 2022) as reservas de areias pesadas desta região estão estimadas em 6,3 mil milhões de toneladas de recursos minerais e o seu projecto tem uma vida útil de mais de 100 anos, tendo em conta a sua actual taxa de produção. Delas são extraídos os minerais ilmenite, zircão e rútilo. A empresa que explora as areias pesadas é a Kenmare Resources plc, registada na Irlanda.





Figura 5: Mina de areias pesadas em Moma.

Fonte: <https://clubofmozambique.com/news/mozambiques-moma-mine-one-of-the-largest-titanium-minerals-deposits-in-the-world-kenmare-227492/> (2022)

Em Chibuto, na província de Gaza encontra-se também um dos maiores jazigos mundiais, com as pesquisas a apontarem para um total de 2 660 milhões de tonelada de matéria-prima depositada e existe dentro da área de concessão 10.544 hectares um enorme potencial de recursos de ilmenite. Contas feitas revelam que mesmo com a capacidade diária de processar 100 mil toneladas de areias pesadas, os recursos existentes podem ser explorados num período de 70 a 100 anos (Portal do Governo de Moçambique, 2018).

A empresa Dingsheng Minerals encontra-se actualmente a explorar as areias pesadas de Chibuto.



Figura 6: Mina de areias pesadas de Chibuto.

Fonte: <https://opais.co.mz/dingsheng-minerals-inicia-exploracao-de-areias-pesadas-do-chibuto/> (2018)

A província de Inhambane conta também com grandes reservas de areias pesadas provenientes do distrito de Jangamo. A Mutamba Mineral Sands SA, responsável pelo projecto, está atualmente na fase final da construção de uma plataforma de processamento com uma capacidade impressionante de 120 toneladas por hora. O ambicioso projecto abrange uma extensão de 25 mil hectares nos distritos de Jangamo e Inharrime, apresentando reservas minerais estimadas em quatro bilhões de toneladas (Rádio Moçambique, 2023).

A exploração de areias pesadas no distrito de Pebane, na província da Zambézi, pela empresa chinesa TZM Resources deverá iniciar-se nos próximos meses, uma vez que a instalação e ensaio dos equipamentos estão na fase final.

Portanto, estes são alguns dos projectos de exploração de areias pesadas em andamento em Moçambique.

Segundo Neldes Mc (2021), há ainda alguns depósitos de areias pesadas por se explorar, nomeadamente: Ponta de Ouro, Marracuene, Limpopo, Zavora, Gorai, Zalal, Micaúne-Deia, Xai-Xai, Quissico, Inhassouro, Zalala, Moebase, Angoche, Congolone e Quinga.

De acordo com Anfoso & Marques (1998), as jazidas de melhor qualidade encontram-se em Zalala, Pebane, Moebase, Moma, Angoche, Congolene e Quinga.

### **2.3. Processamento e Caracterização de Areias Pesadas**

O processamento mineral define-se como sendo as operações unitárias usadas para obtenção de produtos concentrados a partir do minério bruto sem modificar a identidade química ou física dos minerais. O objectivo primordial da exploração mineira é produzir metais puros, sendo que o processamento mineiro desempenha o papel importante.

Substância mineral, ou simplesmente mineral, é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. Minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, que podem ser aproveitados economicamente. Esses minerais valiosos, aproveitáveis como bens úteis, são chamados de minerais-minério. O mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério é denominado ganga (Da Luz & Lins, 2004).

No processamento de areias pesadas a amostra é submetida a um conjunto de operações de concentração onde os minerais valiosos (de interesse) são separados dos minerais de ganga

com base na diferença das suas propriedades físicas. Estas propriedades podem ser: densidade, suscetibilidade magnética, condutividade eléctrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade e forma.

Os métodos típicos de concentração de areias pesadas são: concentração gravítica, magnética, eletrostática e a flotação. Dos quais, neste trabalho, irá se abordar os primeiros dois .

No processamento das areias pesadas também encontram-se etapas de caracterização física, química e mineralógica da amostra. As análises química e mineralógica são realizadas com o objectivo de identificar a composição química e os minerais que compõem a amostra, respectivamente.

A análise granulométrica, como um dos métodos da caracterização física, visa a determinação do tamanho óptimo da alimentação para o processo, com vista a se alcançar a eficiência máxima e também o tamanho a partir do qual se verificam as perdas.

### **2.3.1. Técnicas usadas na caracterização de areias pesadas**

#### **2.3.1.1. Amostragem**

O processo de amostragem consiste na retirada de quantidades moduladas de material (incrementos) de um todo que se deseja amostrar, para a composição da amostra primária ou global, de tal forma que esta seja representativa do todo amostrado. Em seguida, a amostra primária é submetida a uma série de etapas de preparação que envolvem operações de homogeneização e quarteamento, até a obtenção da amostra final, com massa e granulometria adequadas para a realização de ensaios (químicos, físicos, mineralógicos etc), (De Góes, 2010).

Cabe ressaltar que a representatividade referida é válida para a(s) característica(s) de interesse (densidade, teor, umidade, distribuição granulométrica, constituintes minerais etc) definida(s) a priori (De Góes, 2010).

#### **2.3.1.2. Classificação Granulométrica**

Atualmente, existem diversas técnicas para a análise granulométrica de minérios. A escolha do método a ser utilizado está vinculada a fatores como: as dimensões das partículas, os custos, o tempo gasto, a qualidade amostral, a frequência da análise e o grau de automatização.

A análise granulométrica de partículas sólidas abrange a definição do tamanho das mesmas, além da periodicidade com que aparecem em uma classe ou faixa de tamanho. É uma importante ferramenta nos estudos de caracterização tecnológica de minérios, no controle de qualidade de um produto para comercialização e na seleção de equipamentos. Em processos de tratamento de minérios, é primordial para a definição da eficiência das etapas de cominuição (britagem e moagem) e de classificação (LIMA & LUZ, 2000).

O peneiramento, método bastante utilizado na prática laboratorial, ainda é visto como uma das mais antigas operações unitárias de significância para a separação e classificação nas indústrias (LIU, 2009).

Segundo Luz & Carvalho (2005) o peneiramento é o processo de separação de um material granular não coeso em duas ou mais diferentes classes de tamanho de partículas, mediante uma ou mais superfícies vazadas com aberturas de dimensões definidas. O processo poderá ser realizado a seco (fácil operação), a húmido (processo mais lento com utilização de água) ou combinado (mistura do seco e húmido) através dos peneiradores vibratórios, por equipamentos de bancada e peneiramento manual.

Para o peneiramento de um material granular, a amostra é, inicialmente, secada em estufa e seu peso determinado. Esta amostra será colocada na peneira de maior abertura da série previamente escolhida e levada a um vibrador de peneiras onde permanecerá pelo tempo necessário à separação das fracções.

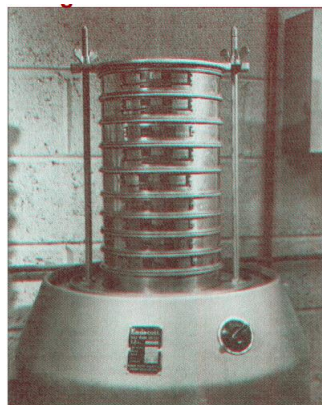


Figura 7: Série de peneiras num agitador de peneiras.

Fonte: adaptado de Luz & Carvalho (2005).

Os peneiros são caracterizados pela sua abertura quadrada ou abertura nominal e também pelo número de aberturas ou mesh. São feitos de diversos materiais.

Após o peneiramento, obtêm-se as frações das massas retidas em cada peneira/crivo. Esses dados são usados para traçar as curvas de distribuição granulométrica nomeadamente: a curva de frequências (percentagem das frações retidas em função do diâmetro nominal dos crivos), a curva cumulativa que é a percentagem da fração passante/retida em função do diâmetro nominal dos crivos e a curva diferencial que é a derivada da curva cumulativa.

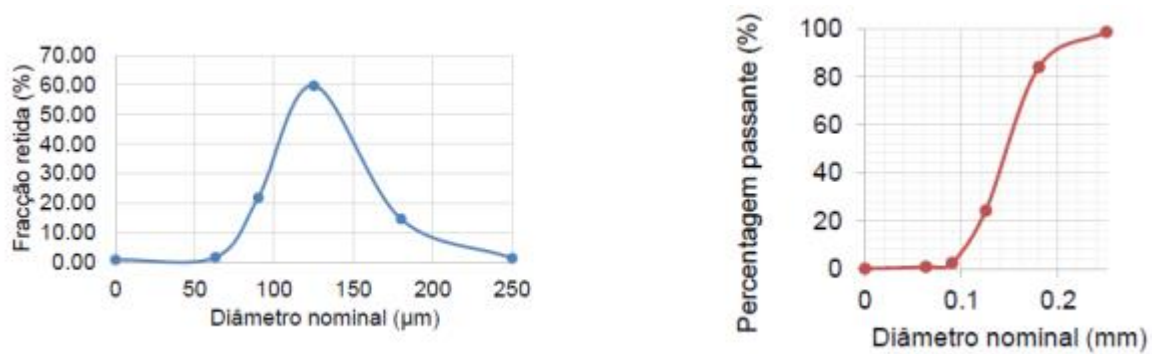


Gráfico 1: curva de frequências (à esquerda) e curva cumulativa da fração passante (à direita).

Fonte: adaptado de Inguane (2019).

### 2.3.1.3. Picnometria

Durante o processamento, onde estão presentes as operações que envolvem modificação da granulometria, concentração e a forma dos minerais. Nesse processo, não há modificação química, apenas físicas. Essas operações consideram as propriedades como a massa, densidade, condutividade eléctrica, magnetismo, cor e radioatividade (Da Luz, Sampaio, & França, 2010).

Sobre as propriedades de determinada substância, a densidade destaca-se, sendo uma propriedade intensiva, ou seja, é independente do tamanho da amostra utilizada para observação, apresentando sempre as mesmas características. A densidade é encontrada pela razão entre a massa de uma amostra da substância (mineral, minério ou rocha) e o seu volume, caracterizando a forma como é encontrada a estrutura cristalina (Sampaio J. A., 2007).

A densidade de uma amostra mineral, pode representar a presença relativa de um determinado cristal em sua estrutura. Desta forma, mensurar a densidade pode ser um mecanismo para estudar o teor de amostras minerais. Uma forma muito utilizada, que oferece

alguma simplicidade operacional, para medir a densidade de amostras particuladas é a aplicação de picnometria (Sampaio J. A., 2007).

Uma das técnicas utilizadas para medir a densidade de sólidos é o método do picnômetro. Um picnômetro consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar, conforme ilustrado na Figura 9.

O volume dos picnômetros varia de 25 a 250 mL ou mais, dependendo da sua aplicação. Os mais usados possuem capacidades entre 25 e 100 mL. A Figura 7 ilustra exemplos de três picnômetros de mesmo volume utilizados para medir densidade de sólidos, em particular, de rocha, minérios ou minerais (Sampaio J. A., 2007).



Figura 8: Picnômetros utilizados para determinação de densidade de sólidos.

Fonte: adaptado de Sampaio (2007).

#### 2.3.1.4. Análise mineralógica clássica usando microscópio óptico

A análise mineralógica clássica compreende um conjunto de etapas que culminam com a identificação dos minerais usando um microscópio óptico. As etapas que antecedem a visualização dos minerais são:

- **Classificação granulométrica:** de modo a separar os minerais com base no seu tamanho.
- **Separação magnética usando íman de mão:** para remover os minerais que apresentam magnetismo mais intenso.
- **Separação em meio denso:** onde usam-se fluídos com densidade intermediária às dos constituintes que se deseja separar. No caso de areias pesadas podem-se usar fluídos

orgânicos que apresentem densidade intermédia entre os minerais de ganga (quartzo e feldspato) e os minerais de interesse (ilmenite, rútilo e zircão). Por exemplo, o bromofórmio, tetrabromoetano, iodeto de metileno e mais.

- **Separação electromagnética:** usado para separar a fracção magnética que não foi atraída pela passagem do íman de mão.

Todos as fracções obtidas nos diferentes ensaios de separação, representados pelos minerais leves, pesados, magnéticos e não magnéticos, e que ocorrem nas variadas fracções granulométricas, deverão ser identificados ao microscópio óptico com maior facilidade.

No geral, as propriedades ópticas são uma importante ferramenta de diagnóstico para identificar minerais. As propriedades ópticas de minerais referem-se ao seu comportamento na presença de luz e como eles interagem com a luz quando observados usando várias técnicas ópticas. Essas propriedades incluem transparência/opacidade, cor, brilho, índice de refração, dispersão, fluorescência e cristalografia.

A microscopia óptica, é uma técnica amplamente utilizada na área de mineralogia para a identificação e caracterização de minerais.

A microscopia óptica é baseada na interação da luz com os minerais, ou seja, o microscópio óptico utiliza luz visível para ampliar e analisar amostras minerais . Quando a luz passa por uma amostra de mineral, ela pode ser absorvida, transmitida ou refletida dependendo das propriedades ópticas do mineral. Ao observar como a luz interage com um mineral sob um microscópio, informações valiosas sobre suas propriedades físicas e ópticas podem ser obtidas.

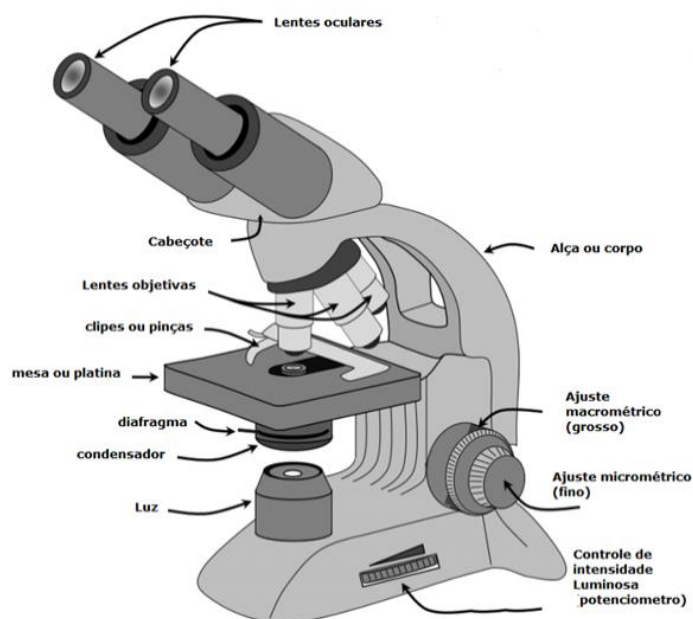


Figura 9: Constituintes do microscópio óptico.

Fonte: <https://laborana.com.br/blog/microscopio-como-funciona> (2021).

### 2.3.1.5. Difractometria de raios X (DRX)

A difratometria de raios X (DRX) permite medir a distância entre os planos atômicos sucessivos e localizar as posições dos vários átomos ou íons nos cristais. A difratometria de raios X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, como em engenharias metalúrgica, química e de minas, geociências, entre outros (Soares, 2014).

O método das poeiras é uma técnica muito importante para a identificação dos minerais. Os planos reticulares dos fragmentos da matéria cristalina encontram-se caoticamente distribuídos, mas, entre eles, alguns deverão orientar-se de forma a observar-se difracção. Assim a amostra é moída até se obter um pó muito fino que é colocada no porta amostras. A amostra é colocada no difractómetro de raios X de forma a poder girar relativamente ao tubo de raios X permitindo que o ângulo de incidência  $\theta$  do feixe de raios X varie de  $0^\circ$  até cerca de  $90^\circ$ . A intensidade dos raios X reflectidos é continuamente registada numa folha de papel e/ou electronicamente num computador. Um pico na intensidade dos raios X difractados indica que o mineral possui planos atômicos cujo espaçamento  $d$  é apropriado para reflectir raios X para esse ângulo  $\theta$  particular (Gomes, 2007).



Os dados de difracção de raios X para minerais e outros compostos estão compilados pelo International Centre for Diffraction Data (ICDD) e estão disponíveis sob a forma de cartões, fichas, microfichas ou em formato digital (Gomes, 2007).

#### **2.3.1.6. Fluorescência de Raios X**

A fluorescência de raios X, nos últimos anos, tornou-se uma técnica universal de análise de materiais. Na fluorescência de raios X, o processo de excitação da amostra deve-se à irradiação por um feixe primário de raios X, que resulta na produção de uma radiação secundária devido à característica dos elementos químicos presentes. Conhecendo-se os ângulos de reflexão e as intensidades da radiação, é possível, não só identificar esses elementos, como também proceder à quantificação (DUTRA & GOMES, 1984).

Os elementos na amostra, são identificados pelo comprimento de onda da fluorescência emitida e as concentrações pela intensidade desta radiação. Os elementos não detectados devido ao número atómico baixo, estão no intervalo entre o Sódio e o Lítio. Analisadores multicanal computadorizados são utilizados para adquirir e mostrar o espectro dos dados (Oliveira, 2000).

### **2.3.2. Técnicas usadas na concentração de areias pesadas**

#### **2.3.2.1. Concentração Gravítica**

A concentração gravítica pode ser definida como um processo no qual partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas uma das outras por ação da força de gravidade ou por forças centrífugas (Lins, 2010). Equipamentos como mesa vibratória/oscilatória ou espiral são frequentemente usados na concentração gravítica de areias pesadas.

##### **a) Mesa vibratória Wilfey**

As mesas vibratórias são equipamentos de concentração que agem através de superfícies com movimentos assimétricos, combinados muitas vezes com o princípio de escoamento laminar. Desde 1895 a mesa de Wilfley, desenvolvida por Arthur R. Wilfley, é um dos equipamentos de concentração gravimétrica mais utilizado no tratamento de minérios, e dos mais importantes na concentração de areias em leitos oscilatórios, operando sobre o material mais fino (Engendrar, 2010).

A separação é obtida pela aplicação de um movimento oscilatório numa mesa rectangular, em posição quase horizontal cuja superfície é quase toda coberta por “riffles” que se orientam paralelamente ou ligeiramente oblíquos à direção dos impulsos, (figura III.1A e B). O material a ser concentrado é colocado no alimentador e por meio de uma caixa de distribuição, com a agitação produzida pelas oscilações e pelo escoamento da água de lavagem, espalha-se ao longo da mesa. As partículas que atingem a extremidade da parte coberta pelos “riffles são descarregadas por uma superfície lisa, onde são submetidas à acção da película de água em escoamento; as partículas densas são, então, descarregadas na extremidade oposta ao mecanismo de acionamento, onde um desviador ajustável é normalmente usado para separá-las em um produto de alto teor de minerais densos e um misto; as partículas leves, por outro lado, são descarregadas ao longo do lado oposto da alimentação, denominadas por estéril (Pita, 2004).

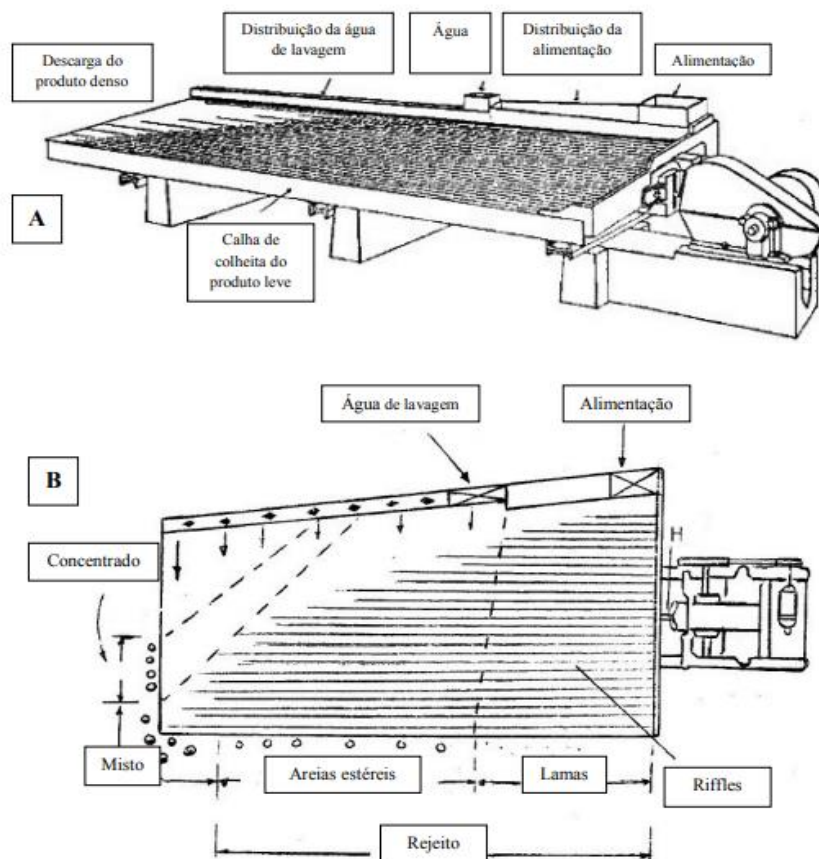


Figura 10: Esquematização da mesa vibratória de Wilfley (A) e da vista plana da mesa (B).

Fonte: Adaptado de Pita (2004).

b) Espiral

O concentrador espiral é construído na forma de um canal helicoidal de seção transversal semicircular (Figura 11). No processamento mineral, a espiral concentradora é utilizada com sucesso, na concentração de minérios. Contudo, para a utilização deste equipamento, algumas propriedades físicas dos minerais devem ser consideradas, sobretudo a densidade, o tamanho e o formato dos grãos minerais (Sampaio & Tavares, 2005).

Quando a espiral é alimentada, o movimento do minério na calha é composto basicamente por dois fluxos: um fluxo primário, no sentido descendente devido à ação da força gravitacional, e um fluxo secundário, no sentido transversal à calha e devido à ação da força centrífuga. Estes dois vetores produzem uma distribuição das partículas como apresentado na Figura 11.

No plano vertical, os minerais pesados estratificam-se na superfície do canal, com baixa velocidade, e os minerais leves tendem a estratificar-se na parte superior do fluxo, nas regiões de maiores velocidades. A trajetória helicoidal causa também um gradiente radial de velocidade no plano horizontal, que tem um efeito menor na trajetória dos minerais pesados e substancial na dos minerais leves. Estes, devido à força centrífuga, tendem a uma trajetória mais externa (Lins, 2010).

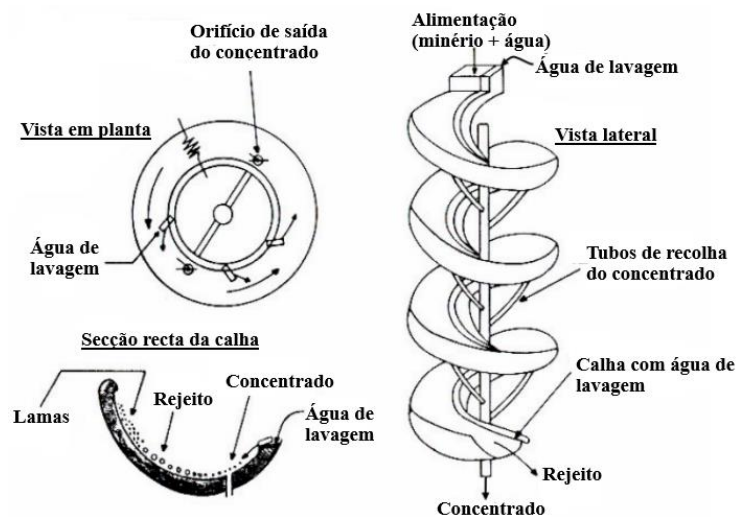


Figura 11: Esquema de uma espiral Humphreys.

Fonte: Adaptado de Lins (2010)

A resultante desses mecanismos é a possibilidade de se remover os minerais pesados por meio de algumas aberturas reguláveis existentes na parte interna do canal - como é o caso da maioria das espirais, inclusive a tradicional espiral de Humphreys (Lins, 2010).

Assim como a polpa, a água de lavagem é adicionada no topo da espiral, em um canal paralelo àquele interno à calha, pelo qual escoam a polpa. Esse canal possui rasgos que desviam a água de lavagem para o interior da calha, em uma operação de lavagem da polpa, daí o nome água de lavagem, conforme ilustrado na Figura 11 (Sampaio & Tavares, 2005).

Nos dias atuais, a espiral concentradora substituiu, com sucesso, a mesa oscilatória na maior parte das aplicações industriais. A razão disso está ligada aos seguintes fatores:

- a espiral não possui partes móveis, entretanto, baixos custos de capital e manutenção;
- a sua construção, com materiais leves e duráveis, facilita o manejo do equipamento e demanda pequenos espaços para instalações.

Essas e outras vantagens fazem da espiral concentradora um equipamento competitivo e utilizado, com sucesso, em usinas de pequeno e grande porte.

### **2.3.2.2. Concentração magnética**

A separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies mineralógicas individualmente, no beneficiamento de minério.

A propriedade do mineral que determina sua resposta a um campo magnético, é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade os minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso tem-se os minerais ferromagnéticos, que são atraídos fortemente pelo campo (ímã comum), sendo o exemplo mais conhecido a magnetite, e os paramagnéticos, que são fracamente atraídos cujo exemplo clássico é a hematite. Aqueles que possuem susceptibilidade magnética negativa e, portanto, são repelidos quando submetidos a um campo magnético, denominam-se de diamagnéticos, como por exemplo o quartzo, calcite, barite, fluorite, entre outros (Almeida, Sampaio, & Silva, 2004).

Para a separação electromagnética no beneficiamento de minerais usa-se frequentemente o separador Isodinâmico Frantz.

Esta separação consiste na passagem contínua dos minerais num campo magnético, começando por se colocar a amostra no funil de alimentação que com a vibração faz com que as partículas deslizem por meio de uma régua vibradora inclinada, situada entre os ferros do electroímã. Esta régua está dividida, aproximadamente ao meio, em dois canais terminais.

Os grãos ferromagnéticos atraídos pelo campo vão pelo canal exterior, e os grãos não atraídos passam no outro canal, ou seja, no canal interior, e as duas fracções resultantes são recolhidos na extremidade da régua em dois recipientes distintos, com fracções denominadas por magnético e não magnético, respectivos à magnitude aplicada (Neto, Neumann, & Schneider, 2002).



Figura 12: Separador magnético isodinâmico de Frantz.

Fonte: [12 -Separador magnético Frantz. O separador é composto, de maneira... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#) (2015).

### 2.3.2.3. Concentração Electrostática

O princípio da separação eletrostática baseia-se no facto de que os minerais de um determinado minério podem receber cargas superficiais, quando submetidos a um campo eléctrico. Os minerais podem obter cargas positivas ou negativas, dependendo das condições de eletrização dos mesmos. Uma vez carregadas, as partículas minerais percorrem trajetórias distintas ao atravessarem uma determinada região do espaço, na qual há um campo eléctrico. Este princípio é muito utilizado na separação de minerais (Sampaio, Da Luz, & Cristina, 2010).

Todo mineral possui um determinado grau de condutividade. Dessa forma, um processo de separação eletrostática usará, como princípio, a diferença entre a condutividade eléctrica ou cargas superficiais existentes nas diversas espécies mineralógicas a serem separadas (Venkatraman, Knoll, & Lawver, 2006).

Para que a separação ocorra, há necessidade da existência de dois fatores eléctricos:

- a existência de carga eléctrica superficial ou polarização induzida, para sofrer a influência do campo eléctrico;

- um campo elétrico com intensidade suficiente para desviar uma partícula eletricamente carregada, quando se movimenta na região do espaço, na qual há um campo elétrico.

Quando partículas minerais estão sob a ação de um campo elétrico, elas podem acumular cargas elétricas. Isso dependerá diretamente da sua condutividade, densidade máxima de carga e área superficial. A partícula eletricamente carregada poderá ser separada, tanto por atração diferencial, quanto por repulsão ao campo elétrico. Dessa forma, é imprescindível que as mesmas sejam submetidas aos mecanismos de geração de cargas eletrostáticas e superficiais (Venkatraman, Knoll, & Lawver, 2006).

Uma vez carregadas, as partículas poderão ser submetidas ao processo eletrostático de separação, utilizando equipamentos das mais diversas configurações.

Um dos equipamentos de separação electrostática mais usados na indústria é o separador eletrodinâmico de alta tensão.

#### a) Separadores Eletrodinâmicos

Nestes separadores, a amostra contendo a mistura de minerais com diferentes condutividades elétricas é alimentada sobre a superfície do tambor (A) e logo recebe o bombardeamento iônico por meio do eléctrodo de ionização (trecho B-C). O eléctrodo funciona com corrente contínua, potencial na faixa de 50 kV e polarização negativa. As partículas minerais submetidas ao fluxo iônico são carregadas negativamente, devido ao intenso efeito corona (fenômeno luminoso que ocorre durante uma descarga eléctrica), e permanecem aderidas à superfície do tambor até entrar no ambiente de ação do eléctrodo estático (trecho C-D). Esse eléctrodo estático tem a finalidade de reverter as cargas das partículas condutoras, por indução, fazendo com que estas se desprendam da superfície do tambor e modifiquem a sua trajetória inicial. Assim, são coletadas como material condutor.

A fração dieléctrica, com carga negativa, permanece aderida à superfície do tambor e é removida com o auxílio da escova e do eléctrodo de corrente alternada, que promove a eficiência do processo de limpeza.

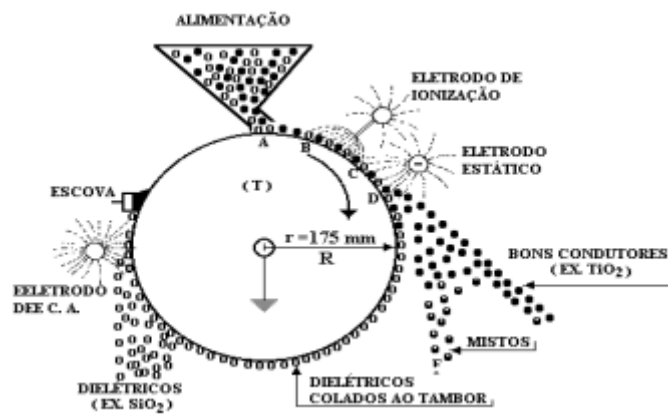


Figura 13: Esquema do separador eletrodinâmico de tambor ou de alta tensão.

Fonte: Adaptado de Sampaio, Da Luz, & Cristina (2010).

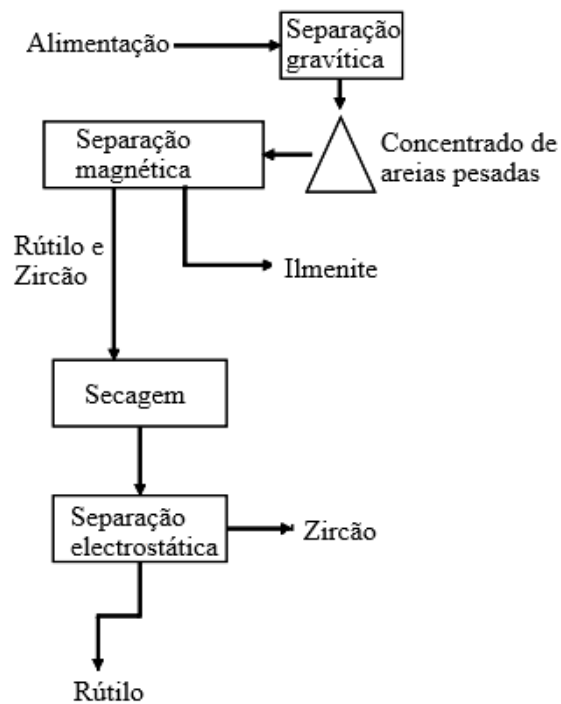


Figura 14: Fluxograma resumido da concentração de minerais pesados na indústria.

## Capítulo 3: Metodologia

Neste capítulo apresentam-se os procedimentos que foram usados na realização do presente trabalho.

### 3.1. Aquisição das amostras

Para a realização das experiências laboratoriais foi usada uma amostra de areias pesadas retiradas na área explorada pela empresa de processamento de areias pesadas da Dingsheng Minerals em Chibuto, província de Gaza. Foi colectada uma amostra de 30 kg de areia pesada húmida.

**Coordenadas do ponto de colecta da amostra:** 24°38'18.1"S 33°32'05.6"E



Figura 15: Área de colecta da amostra.

Fonte: Google earth (24 de Maio de 2024).



### 3.2. Experiências Laboratoriais

As experiências laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Geologia no Instituto Nacional de Minas.

#### 3.2.1. Materiais usados

Tabela 2: Materiais usados durante a realização das experiências..

<b>Equipamento/Reagente</b>	<b>Marca</b>	<b>Descrição</b>
Vibrador de peneiras	Matest	----
Peneiras	KINGTEST	BS 410:1986 Série Tyler
Balança analítica	BEL	Max 220g/1100ct Min 0.01g/0.1ct d=0.0001g/0.001ct e=0.001g/0.01ct
Balança electrónica	OHAUS	Max= 4 kg
Estufa	J.P. SELECTA	---
Mesa vibratória de Wilfley	TRIÓNICA	Modelo LY1100x500
Separador magnético Frantz	S.G. Frantz CO., INC.	Modelo L-1
Microscópio óptico	LEICA	Modelo M205C
Difractómetro de Raios-X	Malvern PANalytical	Modelo EMPYREAN
Aparelho de FRX	Malvern PANalytical	Modelo Zetium
Prensa de pastilhas	Specac	---
Almofariz	--	De ágata
Picnômetro	NORMAX	50 mL

### 3.2.2. Fluxograma das experiências laboratoriais

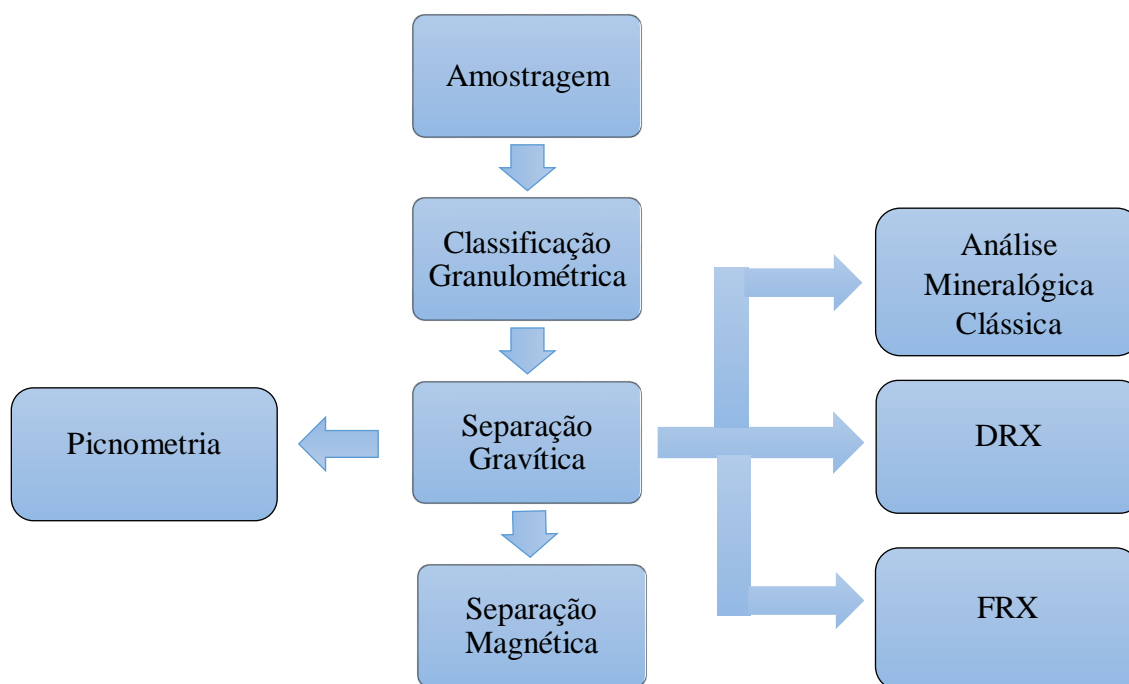


Figura 16: Rota usada durante as experiências laboratoriais.

### 3.2.3. Amostragem

A amostra de areias pesadas colectada em Chibuto foi colocada a secar ao ar livre e de seguida retirou-se uma quantidade representativa da seguinte maneira:

- 1º. Homogenizou-se a amostra com auxílio de uma espátula;
- 2º. Dividiu-se a amostra em 4 partes semelhantes;
- 3º. Retirou-se alternadamente duas partes e misturou-se as mesmas;
- 4º. Com a amostra misturada anteriormente repetiu-se os procedimentos anteriores duas vezes;

5°. A amostra final foi levada e conduzida a próxima etapa do processo.



Figura 17: Quarteamento da amostra.

### 3.2.4. Classificação Granulométrica

Esta etapa do processo foi realizada num vibrador de peneiras durante 20 minutos usando peneiras da série Tyler com aberturas desde 1000  $\mu\text{m}$  até 63  $\mu\text{m}$ . De seguida fez-se a pesagem das massas retidas em cada peneira incluindo a base.



Figura 18: Peneiramento da amostra.

### 3.2.5. Separação Gravítica

A separação gravítica foi realizada a húmido numa mesa vibratória Wilfey, onde alimentou-se as fracções retidas nos peneiros 500  $\mu\text{m}$  à 63  $\mu\text{m}$  provenientes da etapa anterior.

Cada fracção do concentrado e mistos foi reprocessada mais 3 vezes de maneira a obter-se um concentrado com maior percentagem de minerais pesados.

No final de cada processamento os minerais que permaneceram nos mistos foram adicionados ao rejeito (ganga), obtendo-se deste modo dois produtos (concentrado e ganga) que foram colocados a secar na estufa durante 14 horas à 110 °C.

Após a secagem, calculou-se as percentagens dos concentrados, dos minerais de ganga e das perdas obtidas na separação usando a mesa vibratória.



Figura 19: Organização da mesa (à esquerda) e separação gravítica da amostra (à direita).

### 3.2.6. Separação magnética

A separação magnética foi efectuada em cada concentrado obtido da separação gravítica desde a abertura de 500  $\mu\text{m}$  até 90  $\mu\text{m}$  e usou-se 10 g de cada concentrado.

Numa primeira fase, usou-se o íman de mão de modo a separar os minerais que apresentavam magnetismo mais intenso (minerais ferromagnéticos). Esta separação foi efectuada para evitar que os minerais ferromagnéticos entupissem o canal do separador electromagnético usado na etapa seguinte.

De seguida, as fracções que não foram atraídas pelo íman de mão foram submetidas a separação electromagnética usando o separador Isodimâmico Frantz. Esta separação foi feita

a seco com as inclinações longitudinal e lateral reguladas para 5° e 0°, respectivamente, e as vibrações de *chute* e *feed* para 3 Hz e 5 Hz, respectivamente. Foram usadas as amperagens de 0.3A, 0.5A e 0.8A.



Figura 20: Operação no separador Isodimâmico Frantz.

### 3.2.7. Análise Mineralógica Clássica

A análise mineralógica clássica foi feita usando um microscópio óptico binocular para a visualização dos minerais presentes nas frações do concentrado e da ganga em cada classe granulométrica desde 500  $\mu\text{m}$  até 63  $\mu\text{m}$ .



Figura 21: Observação dos minerais usando a microscópio óptico binocular.

### 3.2.8. Fluorescência de Raios X

Esta etapa foi realizada usando as fracções representativas de concentrado e ganga provenientes da separação gravítica.

As fracções de concentrado de cada classe granulométrica foram misturadas e quartejadas, donde retirou-se uma fracção representativa para a realização desta análise por fluorescência de raios X. O mesmo foi feito para as fracções de rejeito (ganga). As fracções a serem usadas foram previamente pulverizadas num almofariz de ágata.

O aparelho de FRX usado foi programado para analisar as amostras na forma de pellet/pastilhas prensadas produzidas numa prensa usando 8g de cada fracção e 2g de Wax que é um aglomerante.



Figura 22: Prensagem (à esquerda) e pastilhas prensadas (à direita).

Após a produção das pastilhas prensadas, elas foram adicionadas ao aparelho de FRX e foi feita a análise que durou 30 minutos para cada amostra.

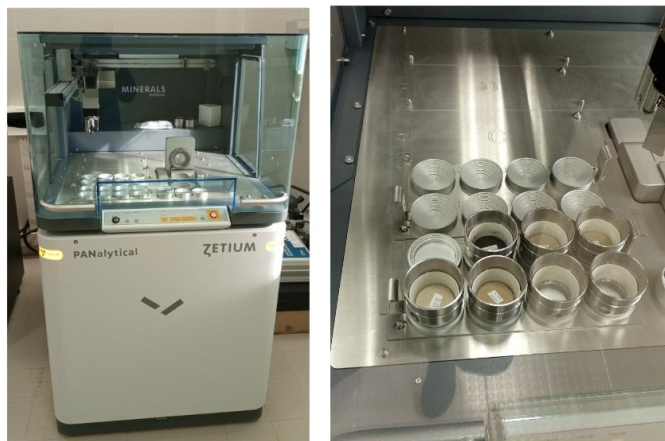


Figura 23: Aparelho usado na análise por FRX.

### 3.2.9. Difractometria de Raios X

A difractometria de raios X foi realizada usando as fracções representativas de concentrado e ganga provenientes da separação gravítica.

As fracções do concentrado e dos minerais de ganga foram previamente pulverizadas num almofariz de ágata.

As fracções foram colocadas em um molde e introduzidas no porta amostras do aparelho de DRX para a análise que durou 45 minutos para cada amostra.



Figura 24: Aparelho usado para a análise por DRX.

### 3.2.10. Picnometria

A medição da densidade média relativa dos minerais foi feita tanto para o concentrado assim como para a ganga usando o seguinte procedimento:

- i Pesou-se o picnômetro vazio, previamente limpo e seco, em estufa, a 100 °C e resfriado em dessecador;
- ii Pesou-se uma massa de 5 g da amostra que se pretendia determinar a densidade e determinou-se o peso do picnômetro mais essa amostra;
- iii Encheu-se o picnômetro com água apenas até transbordar, secou-se a água que molhava a superfície externa do mesmo e, em seguida, pesou-se o picnômetro com água;
- iv Adicionou-se a amostra de sólidos no picnômetro com água e, em seguida, pesou-se todo o conjunto.

De seguida, com os dados obtidos calculou-se a densidade relativa dos sólidos usando a fórmula a seguir, proposta por Silva (2007):

$$d_s = \frac{A_2 - A_1}{(A_4 + A_2) - (A_3 + A_1)} \quad (1)$$

Onde:

A<sub>1</sub>= massa do picnômetro vazio

A<sub>2</sub>= massa do picnômetro + amostra

A<sub>3</sub>= massa do picnômetro + amostra+ água

A<sub>4</sub>= massa do picnômetro + água



## Capítulo 4: Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados

### 4.1. Classificação Granulométrica

Os resultados da peneiração foram interpretados segundo a escala de Wentworth, que permite designar os materiais de acordo com as proporções que se encontram em cada intervalo granulométrico. Esta classificação foi proposta pelo geólogo Chester Wentworth e determina as seguintes designações:

- Areia muito fina (maior que 62,5  $\mu\text{m}$  e menor que 125  $\mu\text{m}$  – ou 1/8 mm);
- Areia fina (maior que 125  $\mu\text{m}$  e menor que 250  $\mu\text{m}$  – ou 1/4 mm);
- Areia média (maior que 250  $\mu\text{m}$  e menor que 500  $\mu\text{m}$  – ou 1/2 mm);
- Areia grossa (maior que 500  $\mu\text{m}$  e menor que 1000  $\mu\text{m}$ );
- Areia muito grossa (maior que 1000  $\mu\text{m}$  e menor que 2000  $\mu\text{m}$ ).

Os resultados da classificação granulométrica são apresentados na tabela 3 e figura 22.

Tabela 3: Resultados do peneiramento da amostra.

Diâmetro nominal ( $\mu\text{m}$ )	Massa retida		Fracção cumulativa retida (%)	Fracção cumulativa passante (%)
	g	%		
+1000	24,4	0,92	0,92	99,08
-1000 +500	762,6	28,61	29,53	70,47
-500 - +355	905,2	33,96	63,49	36,51
-355 +250	607,7	22,80	86,29	13,71
-250 +180	166,1	6,23	92,52	7,48
-180 +125	137,2	5,15	97,67	2,33
-125 +90	34,3	1,29	98,96	1,04
-90 +63	17,8	0,67	99,62	0,38
-63	10	0,38	100,00	0,00
Soma	2665,3		100,00	0,00

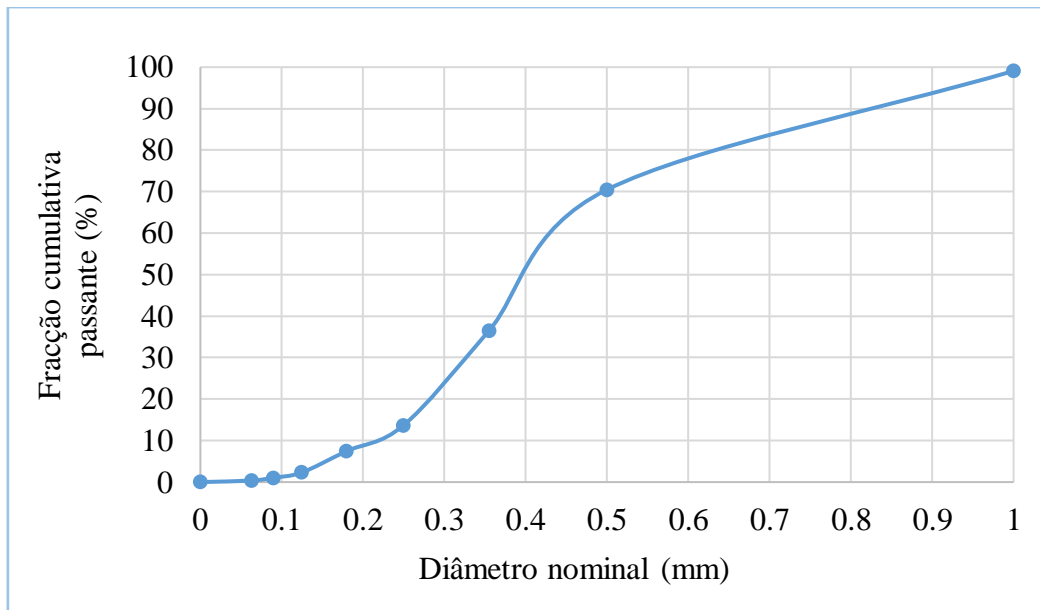


Gráfico 2: Curva cumulativa passante da distribuição granulométrica

Os resultados mostram que o peneiro com a abertura 355  $\mu\text{m}$  foi o que reteve a maior quantidade de material, cerca de 34% da quantidade inicial, isso quer dizer que a grande parte dessa amostra tem grãos com dimensão superior a 355  $\mu\text{m}$ , mas inferior a 500  $\mu\text{m}$ . No entanto, existe uma percentagem ainda considerável de grãos com dimensões superiores e inferiores a esta classe, com destaque para o intervalo de 1000 à 500  $\mu\text{m}$  com quase 29% e o intervalo de 500 à 250  $\mu\text{m}$  com cerca de 23% em peso. Pode-se então designar a amostra como predominantemente de areia média e com mistura de areia grossa e areia fina.

#### 4.2. Separação Gravítica

Para a concentração gravítica na mesa Wilfey são analisadas as percentagens de concentrado recuperado, determinadas pela fórmula (2). Posteriormente também se avaliam as percentagens de minerais de ganga e as perdas obtidas em cada processamento.

$$\% \text{ de concentrado} = \frac{\text{massa de concentrado} \times 100}{\text{massa total}} \quad (2)$$

Tabela 4: Resultados da operação na mesa Wilfey.

<b>Diâmetro nominal (µm)</b>	<b>Massa adicionada (g)</b>	<b>Concentrado (%)</b>	<b>Ganga (%)</b>	<b>Perdas (%)</b>
-1000 + 500	762,6	5,04	81,16	13,80
-500 + 355	905,2	1,88	65,4	32,72
-355 + 250	607,7	4,82	80,11	15,07
-250 + 180	166,1	20,84	47,72	31,44
-180 + 125	137,2	59,68	27,55	12,77
-125 + 90	34,3	51,37	32,33	16,30

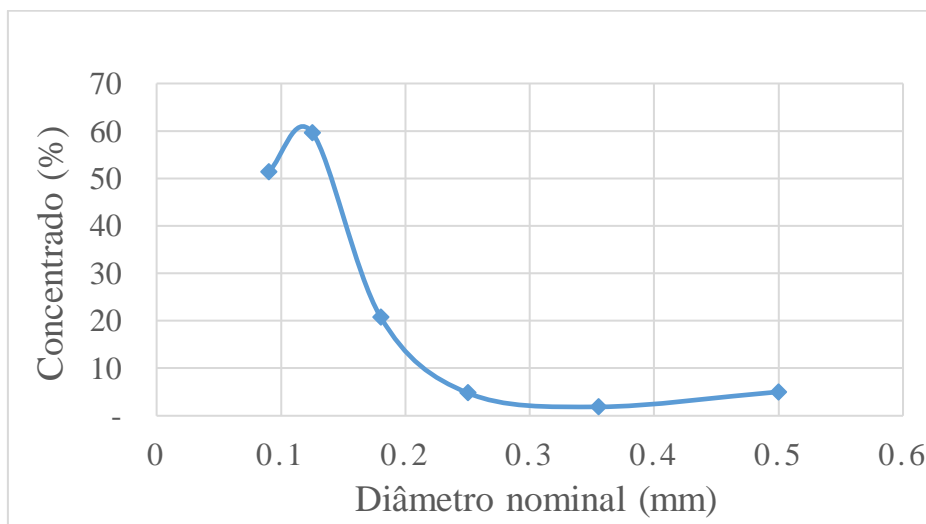


Gráfico 3: Curva da variação da porcentagem do concentrado em função do diâmetro nominal.

Da tabela (4) e da figura 23, nota-se que há uma tendência de aumento da % do concentrado a medida que o diâmetro dos grãos de areia vai decrescendo. Verifica-se portanto que há maior concentração dos minerais pesados (valiosos) nas granulometrias de 0,180 à 0,09 mm.

Um comportamento semelhante quanto a recuperação do concentrado foi verificado por Grachane (2022) e Mabilane (2019) no estudo de areias pesadas de Macaneta e Nicoadala, respectivamente.

### 4.3. Separação Magnética

A separação magnética foi feita em relação a influência do tamanho dos grãos com o objectivo de demonstrar a quantidade de minerais magnéticos e não magnéticos presentes em cada fracção granulométrica do concentrado.

Tabela 5: Percentagens das fracções de concentrado separadas magneticamente..

Diâmetro nominal ( $\mu\text{m}$ )	Fracção magnética (%)				Fracção não magnética (%)
	Íman	0,3A	0,5A	0,8A	
-1000 + 500	8,60	18,34	1,93	1,12	65,63
-500 + 355	23,79	51,14	7,16	0,76	14,46
-355 + 250	33,07	38,22	9,53	1,19	12,10
-250 + 180	32,30	34,88	10,99	0,94	12,70
-180 + 125	20,86	56,68	13,81	1,38	6,29
-125 + 90	17,73	64,97	9,26	2,38	4,61
Subtotal	22,73	44,04	8,78	1,29	19,30
Total	76,83				19,30

Da tabela 5 pode-se verificar que o concentrado das areias pesadas em estudo é maioritariamente constituído por minerais magnéticos com cerca de 77 %, onde quase 23% são ferromagnéticos (atraídos pelo íman de mão), 54% são paramagnéticos (atraídos no separador electromagnético) e o restante são diamagnéticos.

Pode também verificar-se que há maior concentração de minerais magnéticos nas granulometrias de 355 à 90  $\mu\text{m}$ , facto que não se verifica por exemplo na granulometria de 500  $\mu\text{m}$  onde maior parte dos minerais são não magnéticos.

#### 4.4. Análise Mineralógica Clássica

Na análise mineralógica clássica foi feita a visualização dos minerais presentes em cada fracção granulométrica de concentrado proveniente da separação gravítica usando o microscópio óptico binocular e constatou-se que há maior presença dos minerais pesados nas fracções mais finas.

Este estudo permitiu também adquirir informação complementar sobre as propriedades físicas (cor, morfologia, brilho, grau de alteração) das diferentes dos minerais presentes nos concentrados analisados.

O concentrado da fracção granulométrica de 500  $\mu\text{m}$  (anexo 3) é essencialmente constituído por quartzo, portanto nesta granulometria há muita pouca presença de minerais pesados.



Figura 25: Minerais observados na fracção granulométrica de 355  $\mu\text{m}$ .

Na fracção granulométrica de 355  $\mu\text{m}$  pode-se observar a presença de alguns minerais pesados porém ainda há muita predominância de quartzo (mineral leve). Uma vez que as fracções granulométricas de 500 e 355  $\mu\text{m}$  apresentam muita pouca presença de minerais pesados, pode-se afirmar que neste intervalo é necessário efectuar de mais de 4 processamentos na mesa Wilfey de modo a obter um concentrado que com menor quantidade possível de minerais leves.

A alta predominância de minerais leves nestas fracções desencoraja o beneficiamento das areias pesadas usando estas granulometrias pois irão reduzir a taxa de recuperação total do concentrado e aumentar a quantidade de rejeito do processo.

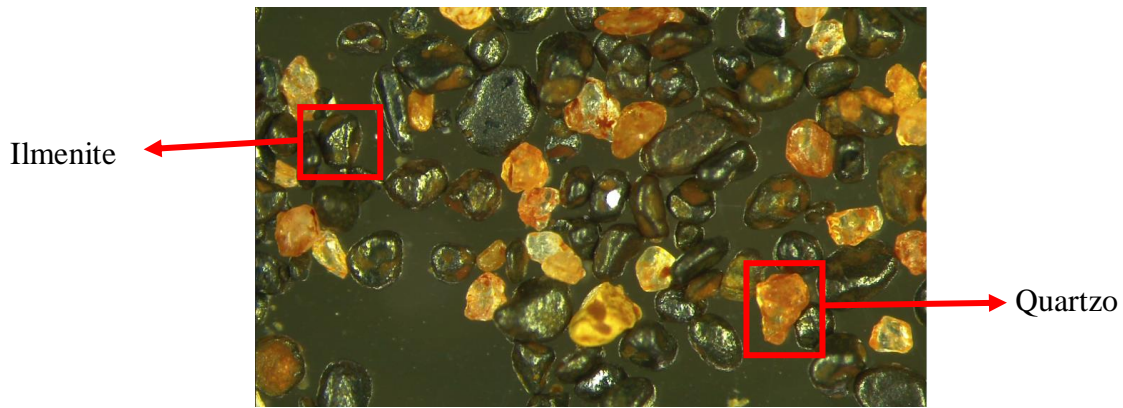


Figura 26: Minerais observados na fracção granulométrica de 250 µm.

Na fracção granulométrica de 250 µm, a presença de minerais pesados como a ilmenite é mais considerável que nas fracções anteriores.

O desgaste produzido durante o transporte e a deposição pode conduzir a uma redução significativa do tamanho de grão e a um aumento progressivo do grau de arredondamento (. suavização das suas arestas e saliências). Em geral, o grau de arredondamento tende a aumentar com a distância entre a área-mãe e o local de deposição (Rangel, 2014).



Figura 27: Minerais observados na fracção granulométrica de 180 µm.

Nestes concentrados observa-se que os grãos dos minerais apresentam-se significativamente arredondados, o que indica que estes parte destes minerais terem sido transportados de outros depósitos até ao depósito de Chibuto durante os processos de meteorização.

Pode-se observar que as areias pesadas em estudo apresentam poucas quantidades de zircão e rútilo, sendo a ilmenite o mineral pesado mais abundante. Observa-se também grãos de magnetite e hematite em quantidades consideráveis.

Uma vez que os minerais ilmenite, magnetite e hematite apresentam propriedades ópticas semelhantes, recorreu-se ao uso de uma barra metálica para atrair os minerais fortemente magnéticos (magnetite) e separá-los dos minerais de magnetismo fraco (hematite, ilmenite). Esta técnica permitiu visualizar com maior certeza estes minerais com propriedades semelhantes.

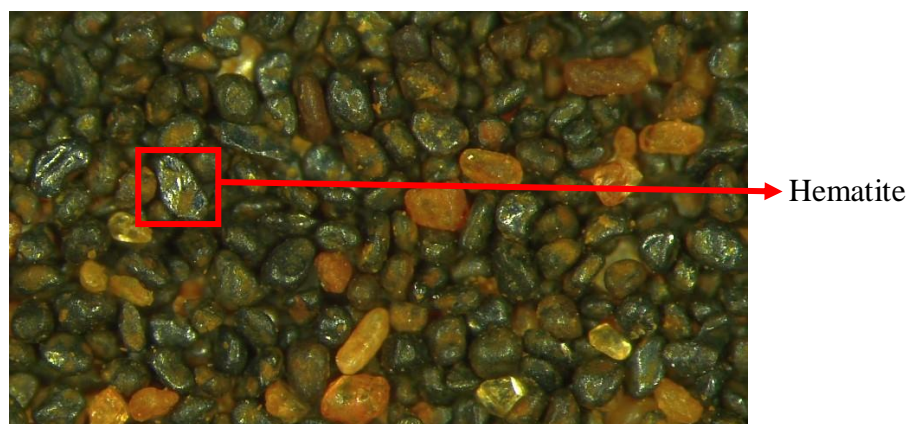


Figura 28: Minerais observados na fracção granulométrica de 125  $\mu\text{m}$ .

A fracção granulométrica de 125  $\mu\text{m}$  juntamente com a fracção granulométrica de 90  $\mu\text{m}$  são as que apresentam maior quantidade de minerais pesados como ilmenite, magnetite e hemanite.

Os grãos de ilmenite, magnetite e hematite nestes concentrados apresentam-se como cristais opacos, de cor preta e com brilho metálico. Os cristais de magnetite e ilmenite apresentam também algumas manchas acastanhadas nas suas faces. Os grãos de zircão apresentam-se com cor acastanhada, transparentes e com brilho vítreo. O mineral rútilo apresenta-se predominantemente com opaco e com cor vermelha.

#### 4.4. Análise por Fluorescência de Raios X

Esta análise foi feita com o objectivo de obter a composição química do concentrado assim como do rejeito (ganga). O aparelho de FRX usado apresenta os resultados em forma de concentrações moleculares, como mostra a tabela 6, facto que facilita a interpretação dos possíveis minerais presentes nas amostras analisadas.

Tabela 6: Resultados da análise por FRX para o concentrado.

PARÂMETROS ANALISADOS	RESULTADO (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54.85
TiO <sub>2</sub>	33.48
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.07
SiO <sub>2</sub>	2.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.55
ZrO <sub>2</sub>	1.78
MnO	0.80
MgO	0.53
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09
ZnO	0.04

Como pode-se ver na tabela 6, o concentrado é maioritariamente constituído por Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub>, indicando uma possível presença de minerais pesados como ilmenite, magnetite, hematite e rútilo. O elevado teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em relação ao TiO<sub>2</sub> indica uma forte presença de minérios de ferro como magnetite e hematite. Outros óxidos encontram-se no concentrado com percentagens abaixo dos 5% como Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, MnO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e ZnO.

Pode-se notar que a qualidade do producto de valor ilmenite é afectada pela presença de produtos contaminantes com especial atenção para a cromita.



Segundo Cumbane (2000), ao fracionar magneticamente e depois aplicar um tratamento térmico designado *oxidising roasting process* (processo de torrefacção oxidante) ao concentrado, uma janela de separação é criada onde a cromita e outros contaminantes são removidos do concentrado.

Este tratamento térmico pode ser realizado numa mufla a uma temperatura de 750 °C durante 10 minutos, conforme proposto por Cumbane (2000). Após o tratamento térmico o concentrado é submetido a concentração magnética e deste modo parte dos contaminantes é removido do concentrado final.

Tabela 7: Resultados da análise por FRX para o rejeito (gangá).

<b>PARÂMETROS ANALISADOS</b>	<b>RESULTADO (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	88.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.02
K <sub>2</sub> O	1.72
TiO <sub>2</sub>	0.44
Na <sub>2</sub> O	0.21
CaO	0.11
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10
WO <sub>3</sub>	0.09

O rejeito é constituído basicamente por SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que são dois dos principais constituintes do quartzo e dos feldspatos (minerais leves). Outros compostos como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e WO<sub>3</sub> apresentam-se nesta fracção com baixas percentagens indicando muita pouca presença de minerais pesados nesta fracção.

#### 4.4. Análise por Difractometria de Raios X

Os resultados da análise do concentrado e rejeito por DRX, estão apresentados nas tabelas 8 e 9 assim como nos anexos 1 e 2 através dos seus respectivos difractogramas.

Tabela 8: Resultados da análise por DRX para o concentrado.

MINERAIS	Fórmula Química	Percentagem (%)
Ilmenite	$\text{FeTiO}_3$	53.3
Hematite	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	17.2
Magnetite	$\text{Fe}_2\text{O}_4$	12.4
Zincocromita	$\text{ZnCr}_2\text{O}_4$	7.5
Zircão	$\text{ZrSiO}_2$	3.0
Quartzo	$\text{SiO}_2$	2.4
Rútilo	$\text{TiO}_2$	2.1
Caulinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	1.4
Eskolaite	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.7

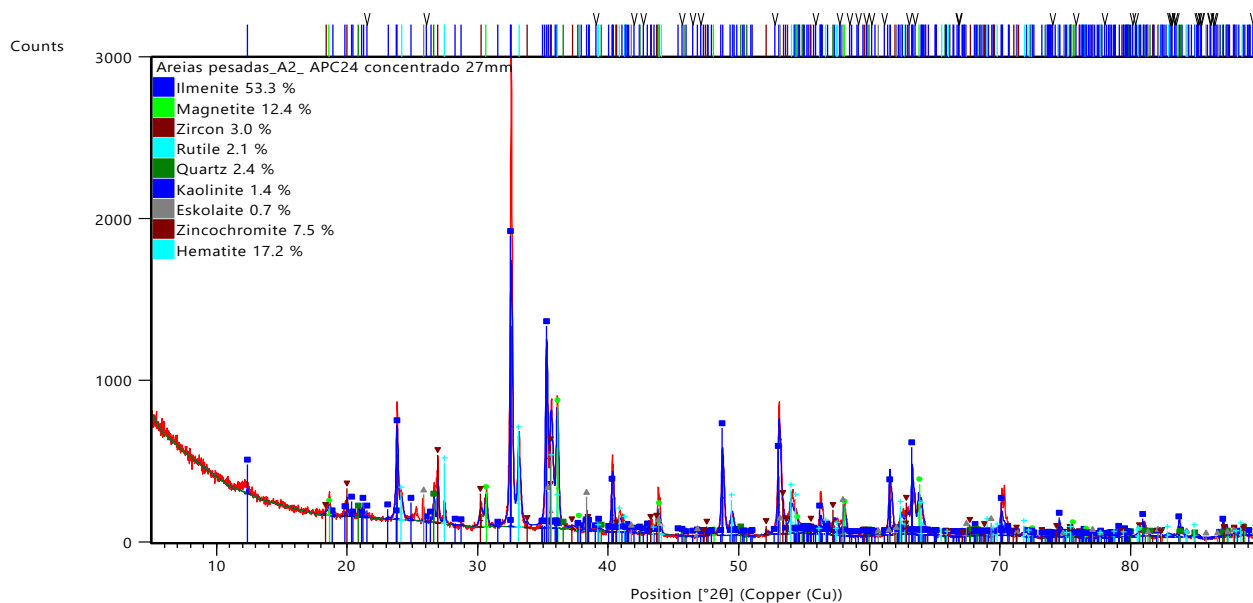


Figura 29: Resultados de DRX para o concentrado.

Com base nos resultados da análise por DRX apresentados na tabela 8 e gráfico 4, verifica-se que o concentrado é predominantemente constituído por ilmenite, que apresenta os picos

mais elevados, acompanhado de outros minerais ferrosos como hematite e magnetite. Estes resultados mostram que a separação não foi completa, podendo-se ainda submeter este concentrado a uma separação magnética (de modo a separar os minerais magnéticos dos não magnéticos) seguida de uma separação electrostática (separando os minerais conductores dos não conductores) de modo a separar ainda mais estes minerais.

Uma vez que o constituinte predominante do concentrado destas areias é a ilmenite, estas areias podem ser consideradas ilmeníticas. Porém, segundo Afonso e Marques (1998), o teor de ilmenite neste concentrado (53,3%) é ligeiramente inferior ao teor de ilmenite de alguns depósitos de areias pesadas da região norte de Moçambique, como o depósito de Moma que conta com 60%, o depósito de Moebase com 75,5% e o depósito de Angoche com 72%. Esta diferença de concentração deve-se à natureza de cada terreno geológico que está sujeito a intempéries naturais, erosões de rochas fornecendo assim minerais a estes depósitos em diferentes medidas.

Observou-se também a presença de minerais como zircão, rútilo, caulinite, quartzo e minerais de crómio como zincocromita e eskolaite. Destacar que a eskolaite é um mineral muito raro de óxido de crómio.

A grande presença dos principais minérios de ferro (magnetite e hematite) no concentrado destas areias pesadas abre uma grande oportunidade para o seu beneficiamento tendo como foco a indústria siderúrgica para a produção de ferro e aço.

Tabela 9: Resultados da análise por DRX para o rejeito (gangá).

<b>MINERAIS</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Percentagem (%)</b>
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	97.2
Microclina	K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2.4
Rútilo	TiO <sub>2</sub>	0.3
Anortite	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	0.1

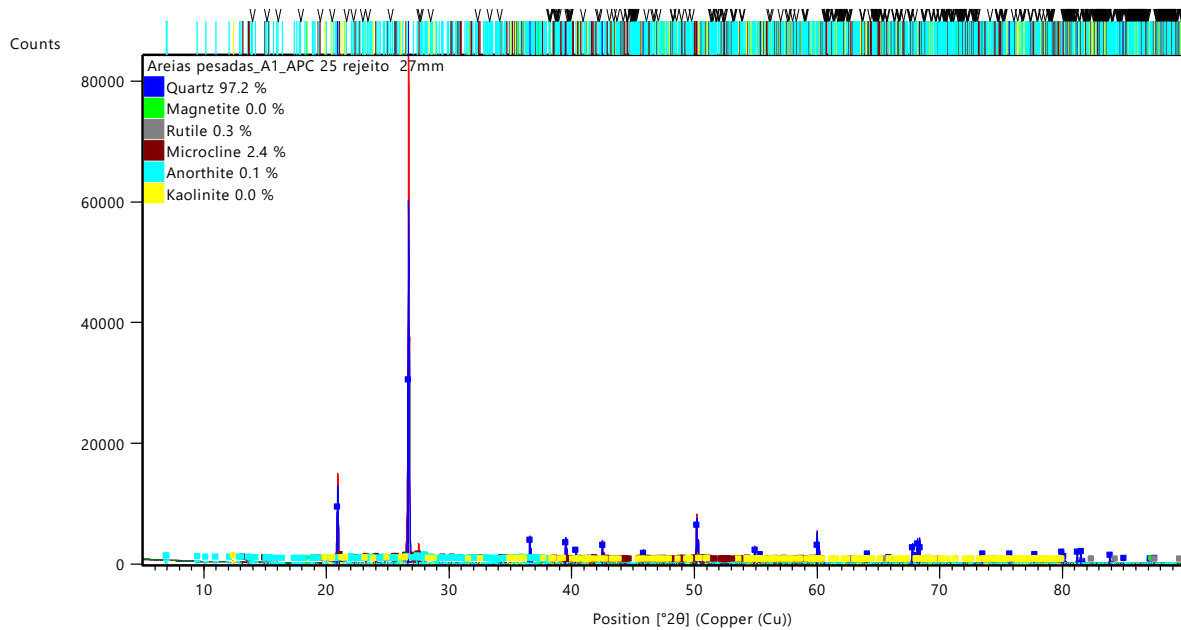


Figura 30: Resultados de DRX para o rejeito.

Da tabela 9 e gráfico 5, verifica-se que o rejeito é essencialmente constituído por quartzo, e pequenos vestígios de microcline, rútilo e anortite. A microclina e a anortite são silicatos de alumínio do grupo dos feldspatos (minerais mais abundantes na crosta terrestre).

Com a excepção do rútilo (0,3%), todos os minerais observados a partir da DRX no rejeito são minerais leves (ganga).

#### 4.5. Picnometria

Os resultados da análise picnométrica do concentrado e do rejeito dão informações sobre a densidade das fracções assim como acerca da qualidade dos concentrado recuperado.

Tabela 10: Resultados dos cálculos das densidades médias relativas.

Fracção	Densidade média relativa
Concentrado	4,5456
Rejeito	2,6562

Conforme pode-se ver na tabela 10, a densidade do concentrado encontra-se dentro do intervalo da densidade relativa dos minerais valiosos presentes nas areias pesadas, que varia

de 4 à 5 conforme adiantado no subcapítulo 2.1.1.. Este facto transmite a informação de que o concentrado processado apresenta um grande teor de minerais valiosos.

A mesma avaliação pode-se fazer em relação a densidade média relativa do rejeito que se aproxima muito a densidade do quartzo que é o mineral mais abundante nos minerais de ganga.

Os aspectos avançados nos parágrafos anteriores mostram que a separação gravítica na mesa Wilfey foi eficaz por ter conseguido efectuar uma boa separação entre os minerais valiosos e os minerais de ganga.

## Capítulo 5: Conclusões e Recomendações

### 5.1. Conclusões

Realizado o trabalho com o tema “Estudo de beneficiação de areias pesadas de Chibuto” e tendo em consideração a lista de objectivos traçados concluiu-se que:

- a) A areia em estudo pode-se classificar como sendo areia média com maior parte do material a ser retido entre os peneiros de 500  $\mu\text{m}$  à 250  $\mu\text{m}$ . O peneiro de 355  $\mu\text{m}$  acumula mais material (33,96%).
- b) Na separação gravítica, verifica-se que quanto menor o diâmetro dos grãos de areia maior a percentagem de minerais pesados recuperados. A fracção de 125  $\mu\text{m}$  é a que apresenta maior quantidade de minerais pesados.
- c) Da separação magnética, verifica-se quanto menor o tamanho dos grãos maior a quantidade de minerais magnéticos. O concentrado é maioritariamente constituído por minerais magnéticos com cerca de 77%.
- d) A observação dos minerais na análise mineralógica clássica permitiu verificar que há maior ocorrência dos minerais pesados nas faixas granulométricas mais finas.
- e) Na análise por DRX, verificou-se que o concentrado é maioritariamente constituído por ilmenite (cerca de 53%), acompanhado de outros minerais como hematite, magnetite, zircão, rútilo, caulinite, quartzo, zincocromita e eskolaite. Estes resultados mostram que a separação não foi completa, podendo-se ainda submeter este concentrado a uma separação magnética seguida de uma separação electrostática de modo a separar ainda mais estes minerais.
- f) A análise da composição química por FRX demonstrou que o concentrado é constituído maioritariamente por  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , acompanhados de outros compostos em menores percentagens como  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{ZnO}$ . De maneira a melhorar a qualidade do producto ilmenite da contaminação destes productos acessórios pode-se submeter o concentrado da mesa Wilfey a um tratamento térmico designado “oxidising roasting process” seguida de uma separação magnética.

- g) A medição da densidade pelo método do picnômetro demonstrou que a densidade média relativa do concentrado é de aproximadamente 4,55 e encontra-se dentro do intervalo das densidades médias dos minerais pesados.

## **5.2. Recomendações**

Para se complementar e melhorar os resultados obtidos, num futuro trabalho recomenda-se:

- Colher amostras em diferentes pontos da mesma área de estudo;
- Fazer a comparação das eficiências entre os métodos de concentração gravítica usando a mesa vibratória Wilfey e a espiral Humphreys;
- Realizar a concentração dos minerais usando o método da separação electrostática.

## Bibliografia

1. Afonso, R. S., & Marques, J. M. (1998). *A evolução geológica de Moçambique*. Lisboa: Instituto de Investigação Científica Tropical.
2. Almeida, S. L., Sampaio, J. A., & Silva, A. O. (2004). *Tratamento de minérios*. (4ª ed.). CETEM/MCT. Obtido em 23 de Maio de 2024, de <http://www.cetem.gov.br/files/docs/livros/2004/Livro%20Trat.%20Min.4a%20Edicao.pdf>
3. Armando, R. (2015). *Recursos minerais e o desenvolvimento económico de Moçambique*. Minas Gerais: UFMG.
4. *Club of Mozambique*. (27 de Outubro de 2022). Obtido em 21 de Maio de 2024, de Clubofmozambique.com: <https://clubofmozambique.com/news/mozambiques-moma-mine-one-of-the-largest-titanium-minerals-deposits-in-the-world-kenmare-227492/>
5. Commission, E. (2010). Annex V to the Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. pp. 220.
6. Cumbane, A. J. (2000). *An investigation of thermal treatment in the magnetic beneficiation of Chibuto beach sands*. Reino Unido.
7. Da Luz, A. B., & Lins, F. F. (2004). *Introdução ao Tratamento de Minérios* (5 ed.). Rio de Janeiro: CETEM.
8. Da Luz, A. B., & Lins, F. F. (2008). *Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações* (2 ed.). Rio de Janeiro: CETEM.
9. Da Luz, A. B., Sampaio, J. A., & França, S. A. (2010). *Introdução ao Tratamento de Minérios* (5ª ed.). Rio de Janeiro: CETEM.
10. De Góes, M. A. (2010). Amostragem. Em A. Da Luz, J. A. Sampaio, & S. C. França, *Tratamento de Minérios* (pp. 23-53). Rio de Janeiro: CETEM.
11. *Diário Económico*. (26 de Outubro de 2022). Obtido em 21 de Maio de 2024, de [Diárioeconomico.co.mz: https://www.diarioeconomico.co.mz/2022/10/26/oilgas/extractivas/kenmare-areias-pesadas-de-moma-na-lista-dos-maiores-depositos-do-mundo/](https://www.diarioeconomico.co.mz/2022/10/26/oilgas/extractivas/kenmare-areias-pesadas-de-moma-na-lista-dos-maiores-depositos-do-mundo/)
12. Dias, J. A. (2004). *In Análise Sedimentar e Conhecimento de Sistemas Marinho*. Faro: Universidade do Algarve.
13. DUTRA, C., & GOMES, C. (1984). *A fluorescência de raios X na geologia*. In: *Técnicas analíticas*. São Paulo: Edagard Blücher.
14. Engendrar. (2010). *Equipamentos para concentração: Mesa de concentração vibratória tipo wilfley*. Obtido em 23 de Maio de 2024, de Engendrar: [http://www.engendrar.com.br/site/\\_downloads/8.pd](http://www.engendrar.com.br/site/_downloads/8.pd)
15. Gomes, E. M. (2007). *Apontamentos da disciplina de Mineralogia*. Departamento Ciências da Terra – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.



16. Gonçalves, S. P. (2019). *Grupo escolar*. Obtido em 20 de Maio de 2024, de [www.grupoescolar.com/pesquisa/areia.html](http://www.grupoescolar.com/pesquisa/areia.html)
17. Grachane, E. J. (2022). *CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NO BENEFICIAMENTO DAS AREIAS PESADAS DE MACANETA*. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
18. Inguane, N. E. (2019). *Processamento e Caracterização Mineralógica das Areias Pesadas de Morrumbala-Zambézia*. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
19. Jalo, I. (2018). *Caracterização Mineralógica e Avaliação do Potencial Mineiro das Areias Pesadas do Depósito de Varela, Guiné-Bissau*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
20. Jona, S. (30 de Outubro de 2018). *O País*. Obtido em 21 de Maio de 2024, de [opais.co.mz](http://opais.co.mz): <https://opais.co.mz/dingsheng-minerals-inicia-exploracao-de-areias-pesadas-do-chibuto/>
21. LIMA, R. M., & LUZ, J. A. (2000). *Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: lei de Stokes*. Ouro Preto: REM – Revista Escola de Minas.
22. Lines, M. (2008). An overview of the mineral sands industry. *ILUKA*, 38-41. Obtido de <http://cdn.ceo.ca.s3.amazonaws.com/1d8eduo-mineral-sands---an-overview-of-the-industry-by-greg-jones-manager-development-geology.pdf>
23. Lins, F. A. (2010). CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA. Em A. B. Da Luz, J. A. Sampaio, & S. C. França, *TRATAMENTO DE MINÉRIOS* (pp. 301-325). Rio de Janeiro: CETEM.
24. LIU, K. (2009). *Some factors affecting sieving performance and efficiency*. Wisconsin: Powder Technology.
25. LUZ, J. A., & CARVALHO, S. C. (2005). *Modelamento matemático de peneiramento vibratório (Parte 1)*.: Ouro Preto: REM: Revista Escola de Minas.
26. Mussá, A. G. (2022). *MÉTODOS DE PROSPECÇÃO E PESQUISA DE AREIAS PESADAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACOMPANHADA COM UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO NA LICENÇA 6620L - DISTRITO DO CHIBUTO - PROVÍNCIA DE GAZA*. Instituto Superior de Ciências e Tecnologias de Moçambique, Maputo.
27. Neto, A. A., Neumann, R., & Schneider, C. L. (2002). Caracterização tecnológica de minérios. Em *Tratamento de Minérios* (pp. 62-74). Rio de Janeiro: CETEM.
28. Oliveira, L. C. (2000). *XRF: X-Rays fluorescence spectroscopy*. Obtido em 2024 de Maio de 22, de <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~furio/IE607A/XRF.pdf>
29. Peixoto, E., Anjo, A. B., & Bonito, J. (2015). Recursos Geológicos em Moçambique e sua presença em contexto educativo. *Revista de Estudios e Investigación en Psicología Educación*, 1-4.

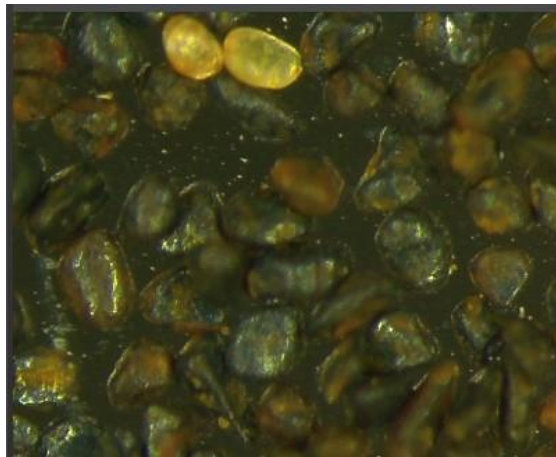
30. Pita, F. A. (2004). *Apontamentos da disciplina Concentração e Diagramas*. Departamento Ciências da Terra – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
31. *Portal do Governo de Moçambique*. (4 de Abril de 2018). Obtido em 21 de Maio de 2018, de Portaldogoverno.gov.mz: <https://portaldogoverno.gov.mz/por/Imprensa/PR-recebe-primeira-ministra-da-Italia-Giorgia-Meloni/Projecto-das-areias-pesadas-de-Chibuto-entra-para-fase-decisiva-de-investimento>
32. Pratas, J. A. (1997). *Apontamentos da disciplina Depósitos Minerais: Exame de minerais*. Departamento Ciências da Terra-Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
33. *Rádio Moçambique*. (8 de Dezembro de 2023). Acesso em 21 de Maio de 2024, disponível em rm.co.mz: <https://www.rm.co.mz/inhambane-inicia-se-exportacao-das-areias-pesadas-de-jangamo/>
34. Rangel, J. (2014). *Exploração e caracterização de minerais pesados de Moma, Moçambique*. Universidade de Aveiro, Departamento de Geociências, Aveiro.
35. Sampaio, C. H., & Tavares, L. M. (2005). *Beneficiamento gravimétrico*. Porto Alegre: UFRGS Editora.
36. Sampaio, J. A. (2007). *TRATAMENTO DE MINÉRIOS: PRÁTICAS LABORATORIAIS*. Rio de Janeiro: CETEM.
37. Sampaio, J. A., Da Luz, A. B., & Cristina, F. S. (2010). Separação Magnética e Electrostática. Em *Tratamento de Minérios* (pp. 367-395). Rio de Janeiro: CETEM.
38. Silva, F. A. (2007). *Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema – Seridó*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
39. Soares, T. F. (2014). *Estudo exploratório de areias pesadas da Guiné-Conakry*. Departamento de Ciências da Terra - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
40. Venkatraman, P., Knoll, F. S., & Lawver, J. (2006). Magnetic and electrostatic separation. Em *Principles of Mineral Processing* (pp. 221-244). SME Editors.
41. Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 377-392.

Anexos e Apêndices

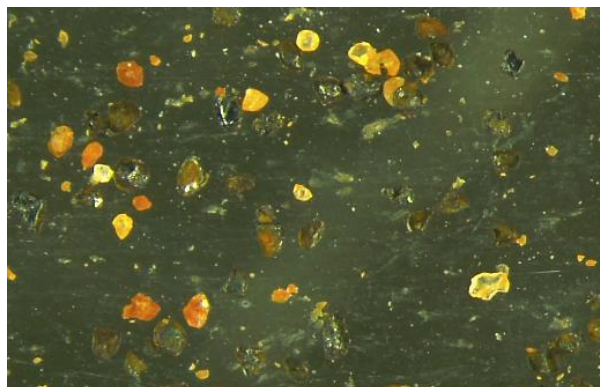
**Anexo 1:** Minerais observados na fracção granulométrica de 500  $\mu\text{m}$ .



**Anexo 2:** Minerais observados na fracção granulométrica de 90  $\mu\text{m}$



**Anexo 5:** Minerais observados na fracção granulométrica de 63 $\mu\text{m}$ .



## Apêndice 1: Cálculo das densidades médias relativas

- Densidade média relativa do concentrado

$$d_{s1} = \frac{(A_2 - A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_3 + A_1)}$$

$$d_{s1} = \frac{(40,6605 - 35,6605)}{(85,0785 + 40,6605) - (89,0257 + 35,6605)}$$

$$d_{s1} = 4,7492$$

$$d_{s2} = \frac{(40,6601 - 35,6601)}{(85,1423 + 40,6601) - (88,9912 + 35,6601)}$$

$$d_{s2} = 4,3437$$

$$d_{s3} = \frac{(40,6571 - 35,6571)}{(85,1196 + 40,6571) - (89,0192 + 35,6571)}$$

$$d_{s3} = 4,5438$$

$$d_{s,média} = \frac{d_{s1} + d_{s2} + d_{s3}}{3}$$

$$d_{s,média} = \frac{4,7492 + 4,3437 + 4,5438}{3}$$

$$d_{s,média} = 4,5436$$

- Densidade média relativa do rejeito

$$d_{s1} = \frac{(A_2 - A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_3 + A_1)}$$

$$d_{s1} = \frac{(40,6585 - 35,6585)}{(85,0947 + 40,6585) - (88,2223 + 35,6585)}$$

$$d_{s1} = 2,6704$$

$$d_{s2} = \frac{(40,6666 - 35,6666)}{(85,1063 + 40,6666) - (88,2156 + 35,6666)}$$

$$d_{s2} = 2,6445$$

$$d_{s3} = \frac{(40,6574 - 35,6574)}{(85,0898 + 40,6574) - (88,2056 + 35,6574)}$$

$$d_{s3} = 2,6536$$

$$d_{s,média} = \frac{d_{s1} + d_{s2} + d_{s3}}{3}$$

$$d_{s,média} = \frac{2,6704 + 2,6445 + 2,6536}{3}$$

$$d_{s,média} = 2,6562$$