



UNIVERSIDADE  
EDUARDO MONDLANE

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ENGENHARIA QUÍMICA**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**TEMA:**

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO  
TRATAMENTO TÉRMICO NO BENEFICIAMENTO DAS AREIAS  
PESADAS DE MACANETA**

**Autor: Eric José dos Anjos Grachane**

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

**Maputo, Dezembro de 2022**



**FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENGENHARIA QUÍMICA**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**TEMA:**

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO  
TRATAMENTO TÉRMICO NO BENEFICIAMENTO DAS AREIAS PESADAS  
DE MACANETA**

**Autor: Eric José dos Anjos Grachane**

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

**Maputo, Dezembro de 2022**



**FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

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

Declaro que o estudante finalista Eric José dos Anjos Grachane entregou no dia \_\_\_ / \_\_\_ / 2022 as \_\_\_ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência \_\_\_\_\_ intitulado: Caracterização Mineralógica e Estudo da Influência do Tratamento Térmico no Beneficiamento das Areias Pesadas de Macaneta.

Maputo, \_\_\_\_ de Dezembro de 2022

A Chefe da Secretaria

---

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Eric José dos Anjos Grachane 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 2022

---

(Eric José dos Anjos Grachane)

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à Deus todo-poderoso,  
Aos meus Pais, José Grachane e Deolinda Victor  
Ao meu Irmão, Walter Grachane. Amo-vos!*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus primeiramente, pelo dom da vida, pela sabedoria, saúde, forças e protecção durante esta caminhada, pois sem a bênção divina não conseguiria chegar ao fim.

À minha família, principalmente aos meus Pais, José Grachane e Deolinda Victor por toda força, motivação e apoio incondicional em todos momentos da minha formação, desde a escola primária, até ao fim da licenciatura e se hoje eu sinto orgulho do que me tornei, é graças ao vosso apoio. Ao meu irmão, Walter Grachane, por motivar-me e sempre dar-me dicas e materiais extremamente importantes durante este percurso.

À Faculdade de Engenharia, em especial ao meu supervisor, Engenheiro António Cumbane, que teve muita paciência, mostrou-se sempre disposto a esclarecer as minhas dúvidas e que não mediu esforços para ajudar-me com o que precisasse, foi uma honra ter bebido do seu vasto conhecimento e muito obrigado por tudo.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios, em especial ao dr. Leonel, pelas orientações e pelo companheirismo no laboratório de Geologia, saiba que foi uma grande companhia para mim, os dias no laboratório foram longos, mas com a sua companhia e as nossas conversas soltas os dias ficaram curtos, irei carregá-lo comigo para sempre meu "*cota Leonel*", como carinhosamente o tratava.

Um agradecimento super especial aos meus colegas e amigos da turma de Engenharia Química 2017, em especial ao Jones, Isaías, Wilson, Aizeque, Camilo, Óscar, Moane, Mboa, Chiziane, JP, Machatine, Aka, Abudo, Valente e Armando, obrigado pelos momentos inesquecíveis dentro e fora da faculdade. Desde os "*googles*" aos momentos de diversão.

Todos os familiares e amigos que aqui não mencionei, muito obrigado por de uma forma ou de outra terem me estimulado ou ajudado na concretização deste grande sonho.

## EPÍGRAFE

*“Quem tem medo de errar, já errou aí mesmo”*

(Hernâni da Silva Mudanisse)

## RESUMO

Ao longo da costa de Moçambique, abundam dunas que são ricas em minerais pesados, tais como a ilmenite, rútilo e zircónia, mas para obtenção destes minerais valiosos, é necessário separá-los dos minerais de ganga, e para tal, desenvolveu-se um conjunto de operações de separação granulométrica, gravítica e magnética.

As características físicas das areias de Macaneta apresentaram resultados para a classificação granulométrica em que se obteve que 85% do material da amostra de Macaneta encontra-se na faixa granulométrica maior que 250 $\mu$ m e menor que 350 $\mu$ m. Para a avaliação do potencial de concentração por gravidade, as fracções de 180, 250 e 355 $\mu$ m foram sujeitas a separação gravimétrica de onde constatou-se que a faixa granulométrica de 180 $\mu$ m é a mais rica em minerais pesados, com cerca de 51%. Para a avaliação do potencial de concentração por magnetismo, iniciou-se com um estudo dos parâmetros óptimos de funcionamento do separador magnético *Frantz*, em que se constatou que o ensaio com *chute, feed* e granulometria de 3Hz, 5Hz e 180 $\mu$ m respectivamente apresentou maior recuperação, com cerca de 29,07%. Para avaliar o efeito do tratamento térmico no beneficiamento das areias, os concentrados de 180 $\mu$ m obtidos na separação gravítica sofreram tratamento térmico por 10 minutos à 750°C de onde obteve-se maior recuperação, após o tratamento térmico, nas 5 intensidades em que se trabalhou comprovando a otimização no beneficiamento. Parte dos minerais ganhou propriedades magnéticas quando aquecidos. As características mineralógicas determinadas por espectroscopia por energia dispersiva mostraram que a amostra tratada apresenta maior quantidade de minerais em relação à amostra não tratada e as análises por microscopia óptica mostraram que quanto menor for a granulometria, melhor são vistos os minerais, sendo os mais destacáveis o quartzo, a ilmenite, zircão e a observação do rútilo foi condicionada pelo uso da luz artificial. Notou-se a presença, embora que pequena, da pirovskita que é um mineral raro. Pela picnométrica, verificou-se um aumento da densidade das areias com o tratamento térmico em relação à sem o tratamento térmico, o que indica a otimização no beneficiamento e as amostras possuem densidades relativas médias ligeiramente superiores à do quartzo, o que sugere a presença de minerais pesados.

**Palavras-chaves:** Areias Pesadas, Separação Gravítica, Separação Magnética, Caracterização, Macaneta.



# ÍNDICE

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA..	iii
DECLARAÇÃO DE HONRA .....	i
DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
EPÍGRAFE .....	iv
RESUMO .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJECTIVOS.....	2
1.1.1 Objectivo Geral.....	2
1.1.2 Objectivos Específicos.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA .....	2
1.3 METODOLOGIA .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Areias Pesadas .....	5
2.1.1 Definição e Origem .....	5
2.1.2 Características dos Principais Minerais Pesados .....	6
2.1.3 MINERAÇÃO EM MOÇAMBIQUE .....	10
2.1 MODOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	12
2.2 Técnicas de Caracterização de minerais.....	12
2.2.1 Picnometria.....	12
2.2.2 Classificação Granulométrica .....	13
2.2.3 Microscopia Óptica .....	14
2.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	16
2.2.5 Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) .....	18
2.3 MÉTODOS DE CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS.....	19
2.3.1 Mesa de Concentração Gravimétrica.....	19
2.3.2 Separação Magnética.....	22

3 ESTUDO MINERALÓGICO DAS AREIAS DE MACANETA: MATERIAIS E MÉTODOS .....	26
3.1 Amostragem .....	26
3.2 Análise Granulométrica .....	28
3.3 Separação Gravítica .....	29
3.4 Separação Magnética.....	30
3.5 Análise da Microscopia Óptica .....	33
3.6 Análises MEV & EDS.....	34
3.7 Análise Picnométrica .....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	36
4.1 Análise Granulométrica .....	36
4.2 Concentração Gravítica.....	38
4.3 Estudo dos Parâmetros Ótimos do Separador Magnético de Frantz .....	39
4.4 Separação Magnética.....	40
4.5 Análise Picnométrica .....	42
4.6 Análise no Microscópio Óptico .....	43
4.7 Análises MEV & EDS.....	46
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	50
5.1 Conclusões .....	50
5.2 Recomendações .....	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Areia de Ilmenita proveniente de Florida .....	6
Figura 2. Rútilo proveniente da China.....	7
Figura 3. Zircão proveniente da Turquia .....	9
Figura 4. Produção de concentrado de zircão para 2014 .....	11
Figura 5. Curvas de distribuição granulométrica: acumulativa e curva de frequências .....	14
Figura 6. Ilustração do local dos elementos principais de um microscópio óptico .....	15
Figura 7. Microscópio Óptico Binocular Nikon SMZ1270 .....	16
Figura 8. Ilustração do funcionamento da MEV .....	17
Figura 9. Camada fluída em ação .....	20
Figura 10. Ilustração da mesa vibratória de Wilfley .....	20
Figura 11. a) estratificação vertical entre os riffles; b) arranjo das partículas ao longo dos riffles; c) distribuição na mesa. ....	21
Figura 12. Esquema de funcionamento de um separador magnético de rolos.....	23
Figura 13. Esquema de funcionamento de um separador magnético de tambor .....	23
Figura 14. Separador magnético isodinâmico de Frantz.....	24
Figura 15. Rota usada para a caracterização das areias.....	26
Figura 16. Quarteamento da amostra .....	27
Figura 17. Quarteador do tipo Jones.....	28
Figura 18. Vibrador TAMSON VS 1000 e a série de peneiros usada.....	28
Figura 19. Operando na mesa de Wilfley .....	29
Figura 20. Esquema da mesa de separação gravítica .....	30
Figura 21. Separador Magnético de Frantz .....	32
Figura 22. Mufla Termolab .....	33
Figura 23. Microscópio binocular Nikon SMZ1270 .....	33
Figura 24. Aparelho JSM-IT100 series SEM .....	34
Figura 25. Minerais observados para 355µm .....	44
Figura 26. Minerais observados para 250µm .....	44
Figura 27. Minerais observados para 180µm .....	45
Figura 28. Minerais observados para 90µm .....	45
Figura 29. Minerais observados para 63µm .....	46
Figura 30. Microestrutura da ilmenite da AT para 0,3A.....	46

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas de alguns minerais .....	10
Tabela 2. Principais minerais com propriedades magnéticas.....	25
Tabela 3. Parâmetros de operação avaliados no separador magnético de Frantz... 30	
Tabela 4. Planeamento estatístico do cruzamento de variáveis para determinação dos parâmetros óptimos de funcionamento do Separador Magnético de Frantz .....	31
Tabela 5. Resultados do peneiramento da amostra .....	36
Tabela 6. Resultados para a Mesa de Wilfley .....	38
Tabela 7. Resultados do planeamento estatístico .....	39
Tabela 8. Resultados do Cálculo das Densidades Médias Relativas .....	43
Tabela 9. Resultados da EDS da AT para 0,1A.....	47
Tabela 10. Resultados da EDS da ANT para 0,1A.....	48

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva Cumulativa da Classificação Granulométrica.....	37
Gráfico 2. Curva Diferencial da Classificação Granulométrica.....	37
Gráfico 3. Curva Cumulativa para 180 $\mu\text{m}$ .....	40
Gráfico 4. Curva Diferencial para 180 $\mu\text{m}$ .....	41
Gráfico 5. Elementos Seleccionados na EDS para 0,1A.....	49
Gráfico 6. Elementos Seleccionados na EDS para 0,1A.....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A: Ampere

Al: Alumínio

AT: Amostra tratada termicamente

ANT: Amostra não tratada termicamente

Ca: Cálcio

DRX: Difração de Raio-X

EDS: Espectroscopia por Energia Dispersiva

Fe: Ferro

FRX: Fluorescência de Raios-X

HMC: *Heavy Mineral Concentrate*

HGMS: *High Gradient Magnetic Separation*

HIMS: *High Intensity Magnetic Separation*

Hz: Hertz

K: Potássio

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

m: metro

mm: milímetro

Na: Sódio

Nb: Nióbio

O: Oxigênio

PES: Plano Económico Social

Si: Silício

Ta: Tântalo

TL: Trabalho de Licenciatura

Ti: Titânio

UK: *United Kingdom*

V: Volt

Zr: Zircônio

μ: micro

°C: Graus Celsius

## 1. INTRODUÇÃO

A exploração mineira remota ao período pré-colonial em Moçambique e desde então, o movimento económico do país foi sempre caracterizado pela exploração de elementos da base natural transformados em recursos pela acção do ser humano e nos últimos tempos, o desejo dos megaprojectos de mineração em explorar as riquezas minerais do país são responsáveis pela entrada no território moçambicano do capital de empresas multinacionais, contribuindo assim para a economia nacional.

Moçambique apresenta-se cada vez mais como um destino de empresas multinacionais com objectivo de explorar e valorizar os recursos minerais e o estudo de caracterização de uma área com potencial mineralógico é uma etapa muito importante para a avaliação antecipada dos minerais presentes e do seu potencial económico.

Da Luz (2010), define substância mineral, ou simplesmente "*mineral*", como todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre e "*minério*" como toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, que podem ser aproveitados economicamente em que estando presentes em areias, são denominadas areias pesadas, pois são enriquecidos em minerais de alta densidade, como ilmenita, zircão, rútilo e outros minerais raros.

Minerais pesados têm como característica principal densidade superior a densidade dos minerais de ganga (Rhuan, 2015).

O presente trabalho visa fazer a caracterização físico-química dos minerais presentes nas areias bem como avaliar a influência do tratamento térmico no beneficiamento das areias pesadas da localidade de Macaneta, no distrito de Marracuene na província de Maputo, fornecendo, deste modo, dados importantes para um possível projecto de exploração que poderá contribuir para o crescimento da produção de recursos minerais e, conseqüentemente, irá gerar postos de emprego para as populações locais.



## **1.1 OBJECTIVOS**

### **1.1.1 Objectivo Geral**

- Fornecer as características dos grãos das areias pesadas de Macaneta e avaliar o seu potencial de concentração.

### **1.1.2 Objectivos Específicos**

1. Caracterizar fisicamente as amostras pela análise granulométrica;
2. Separar os minerais usando a mesa de separação por gravidade;
3. Separar os minerais usando o método de separação magnética;
4. Avaliar a influência do tratamento térmico na separação magnética;
5. Caracterizar qualitativamente os concentrados de minerais pesados por microscopia óptica, microscopia eletrônica de veredura, espectroscopia de raios X por energia dispersiva e por picnometria.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O plano económico-social (PES) de 2021 de Moçambique indica um crescimento positivo anual de 1.5% comparativamente ao realizado em 2020, não obstante, o plano estar a ser implementado num contexto da COVID-19, que pode afectar a produção dos recursos minerais. Entretanto, comparativamente a igual período (mês de Agosto) do ano de 2020, a produção cresceu em 27,7%, fundamentalmente, devido à retoma da produção dos minerais de grande peso na estrutura de produção.

Segundo (Dos Santos & Bertolino, 2010), o procedimento de caracterização auxilia o engenheiro de processos com informações que estejam relacionadas directamente ao desenvolvimento e optimização das técnicas de beneficiamento mineral para fins metalúrgicos.

Deste modo, é importante conhecer as características das areias antes de se avançar com um possível projecto de exploração.

Este trabalho, apresenta uma análise característica dos grãos e o potencial de concentração através dos métodos de separação (gravítica e magnética), analisando

ainda o efeito do tratamento térmico, fornecendo assim informação útil para uma futura exploração industrial adequada às areias de Macaneta, contribuindo para o crescimento da produção de recursos minerais no PES e, deste modo, gerando postos de emprego para as populações locais.

### 1.3 METODOLOGIA

Para alcançar os objectivos definidos no presente Trabalho de Licenciatura foram definidas as seguintes actividades:

- Recolha de Dados

A recolha de dados foi baseada na seguinte técnica:

a) **Consulta bibliográfica** com objectivo de colher dados para:

- i) Fazer um levantamento sobre a história da mineração em Moçambique, que permita obter informação mais aprofundada sobre a ocorrência dos minerais, variantes existentes nos diversos quadrantes do país, continente e pelo mundo fora, e também a sua aplicabilidade;
- ii) Fortificar o marco teórico para a escolha do método de caracterização e separação aplicáveis às areias pesadas;
- iii) Identificar as diversas plataformas tecnológicas físicas (instrumentos e equipamentos) de usabilidade neste trabalho de licenciatura

- **Execução de Experiências Laboratoriais** seguindo uma rota descrita no trabalho, realizadas nos laboratórios do departamento de Engenharia Química, departamento de Geologia e departamento de Química da UEM com o objectivo de obter de dados necessários para a análise e avaliação no acto da caracterização e beneficiamento das areias;

- **Tratamento Estatístico, Análise e Discussão** dos dados experimentalmente obtidos com vista a compará-los quantitativamente e qualitativamente para tomada de decisões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Areias Pesadas

#### 2.1.1 Definição e Origem

Areias pesadas são depósitos de dunas paleo, praias ou rios enriquecidos em minerais de alta densidade, como ilmenita, zircão e rútilo. Os minerais pesados têm como característica principal densidade superior à densidade dos minerais de ganga (Rhuan, 2015).

Outros minerais, tais como a perovskite, fluorite e o zircão, poderão transformar-se em fontes importantes de terras raras, os quais já são processados para o aproveitamento de outros elementos podendo ser recuperadas como subproduto (Abrão, 1994).

Segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada, os Elementos de Terras Raras pertencem ao grupo III-B, da tabela periódica, que constituem o grupo de elementos químicos da série dos lantanídeos (número atômico entre 57 a 71), acrescidos do escândio (número atômico 21) e o ítrio (número atômico 39) que apresentam comportamentos químicos similares (Hutton; Connelly & Hartshorn, 2013).

As areias pesadas contêm concentrações de minerais pesados úteis para uma variedade de fins industriais, tais como, indústria de pigmentos, construção de reactores, reforço de ligas metálicas, indústria de cerâmica entre outras.

Estes minerais são originalmente derivados de rochas ígneas ou metamórficas decompostas por processos naturais de intemperismo, transportadas em sistemas fluviais e eventualmente depositadas em “*placers*” em lagos, rios ou praias (Hitchman, 1984). Os principais componentes de importância económica das areias pesadas são os minerais de rútilo ( $\text{TiO}_2$ ), a ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ ) e o zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ).

## 2.1.2 Características dos Principais Minerais Pesados

A principal característica dos minerais pesados é o seu alto valor de densidade, superior à do quartzo, no entanto, existem outras específicas de cada um como a cor, susceptibilidade magnética, eléctrica, entre outras.(Mabilane, 2019).

### 2.1.2.1 Ilmenita

A ilmenita é um mineral acessório comum em rochas ígneas, sedimentos e rochas sedimentares em muitas partes do mundo. Os astronautas da Apollo encontraram ilmenita abundante em rochas lunares e no regolito lunar. A ilmenita é um óxido de ferro-titânio preto com uma composição química de  $(FeTiO_3)$ .

É um minério primário do titânio, um metal necessário para fazer uma variedade de ligas de alto desempenho. A maior parte da ilmenita extraída em todo o mundo é usada para fabricar dióxido de titânio,  $TiO_2$ , um importante pigmento, branqueador e abrasivo de polimento.

É um mineral preto com brilho submetálico a metálico. 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.



Figura 1. Areia de Ilmenita proveniente de Florida

Fonte: geology.com (2005)

Imagem: Hobart M. King

Segundo King (2015), a ilmenita é o minério primário do metal titânio. Pequenas quantidades de titânio combinadas com certos metais produzirão ligas leves, duráveis e de alta resistência. Essas ligas são usadas para fabricar uma ampla variedade de peças e ferramentas de alto desempenho. Os exemplos incluem: peças de aeronaves, articulações artificiais para humanos e equipamentos desportivos, como quadros de bicicletas. Cerca de cinco por cento (5%) da ilmenita extraída é usada para produzir o metal titânio. Alguma ilmenita também é usada para produzir rútilo sintético, uma forma de dióxido de titânio usado para produzir pigmentos brancos altamente refletivos.

### 2.1.2.2 Rútilo

Segundo King (2005) rútilo é um mineral de óxido de titânio com uma composição química de  $TiO_2$ . É encontrado em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares em todo o mundo. O rútilo também ocorre como cristais em forma de agulha em outros minerais.

O mesmo autor afirma que este mineral tem uma gravidade específica alta e é frequentemente concentrado por ação de correntes e ondas em areias minerais pesadas, que existem hoje em depósitos “*onshore*” e “*offshore*”. Grande parte da produção mundial de rútilo é extraída dessas areias, ocorrendo como mineral acessório em rochas ígneas plutônicas, como o granito, e em rochas ígneas de origem profunda, como peridotito e lamproíto.

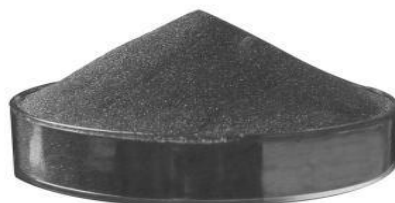


Figura 2. Rútilo proveniente da China

Fonte: <https://portuguese.alibaba.com/g/tio2-rutile-sand.html> (2020)

Imagem: Cecilia wu, Chongqing Huashengding Chemical Products Co., Ltd

Os principais usos do rútilo e do óxido de titânio feitos de rútilo são: fabricação de pigmentos de óxido de titânio, fabricação de cerâmica refractária e produção de titânio metálico.

Quando triturado e processado para remover impurezas, o rútilo se torna um pó branco brilhante que serve como um excelente pigmento. É usado para o fabrico de tinta suspendendo o pó em um líquido. O líquido serve para aplicar na tinta e evapora para depositar uma camada de óxido de titânio sobre o objecto pintado.

As propriedades deste mineral permitem que ele seja usado também como pigmento em alimentos, cosméticos, produtos farmacêuticos e muitos produtos de consumo, como creme/pasta dental.

### **2.1.2.3 Zircão**

O zircão é um mineral de silicato de zircónio com composição química de  $ZrSiO_4$ . É comum em todo o mundo como um constituinte menor de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares.

O zircão é uma pedra preciosa popular que tem sido usada por quase 2000 anos. Possui uma ampla gama de cores, tem um brilho que rivaliza com os do diamante. O zircão incolor às vezes é usado como uma alternativa de baixo custo para o diamante.

O zircão é um mineral acessório primário na maioria das rochas graníticas. Também está presente em gnaisses e outras rochas derivadas do metamorfismo de rochas ígneas portadoras de zircão. O zircão é tão comum e amplamente distribuído pelas rochas da superfície da Terra que pode ser considerado um mineral omnipresente (King, 2005).



Figura 3. Zircão proveniente da Turquia

Fonte: <https://www.lansgrupo.com/pt/PRODUTOS/areia-de-zirc%C3%A3o-para-venda/> (2021)

Imagem: Grupo Lans

A areia de zircão tem um baixo coeficiente de expansão e é muito estável em altas temperaturas. É usado como material refratário em muitas aplicações de fundição e cerâmica. O dióxido de zircônio (zircônia) é produzido aquecendo a areia de zircão a uma temperatura alta o suficiente para quebrar a molécula de zircão. Na forma de pó, o dióxido de zircônio é branco brilhante, altamente refletivo e termicamente estável. É usado como opacificante, agente clareador e pigmento em esmaltes e corantes usados em cerâmica. A zircônia estabilizada com óxido de ítrio (III) é usada para fabricar zircônia cúbica, componentes de fibra óptica, revestimentos refratários, cerâmicas, dentaduras e outros produtos odontológicos.

A tabela 1 ilustra algumas propriedades de alguns minerais pesados.



Tabela 1. Propriedades físicas de alguns minerais

Mineral	Fórmula Química	Densidade Relativa	Dureza	Clivagem	Cor
Ilmenite	FeTiO <sub>3</sub>	4,1-4,8	5-6	1 direção	Preto
Rútilo	TiO <sub>2</sub>	4,18-4,25	6-6,5	2 direções	Cinza escuro, castanho avermelhado
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	2,6	7	Não tem	Transparente/incolor, branco
Zircão	ZrSiO <sub>4</sub>	4,6-4,7	7,5	2 direções	Amarelo, castanho claro, verde, rosa
Hematite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-5,2	5-6	Não tem	Cinza metálico
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,2	6	Não tem	Preto
Perovskita	CaTiO <sub>3</sub>	4-4,25	5,5-6	Não tem	verde, marrom, amarelo pálido, laranja amarelado, castanho e preto.
Feldspato	(K, Na, Ca) (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	2,5-2,6	6-6,5	2 ou 3 direções	Branco, rósea

Fonte: Adaptada de Cumbane (2000).

### 2.1.3 MINERAÇÃO EM MOÇAMBIQUE

Em Moçambique os minerais pesados ocorrem, principalmente em depósitos secundários, ou seja, em associações contidas em areias de praia. Nas praias moçambicanas, areias pesadas com potencial económico para produção de concentrados, HMC (*heavy mineral concentrate*) de rútilo, ilmenite e zircão já vem sendo exploradas em algumas regiões (Hannover A. , 2018).

O país alcançou uma boa posição na produção de zircão, de entre países que estão há mais tempo no ramo, como mostra o diagrama da figura 4.

**Zirconium Mineral Concentrate Production (2014)**  
 Thousand Metric Tons - Data from USGS

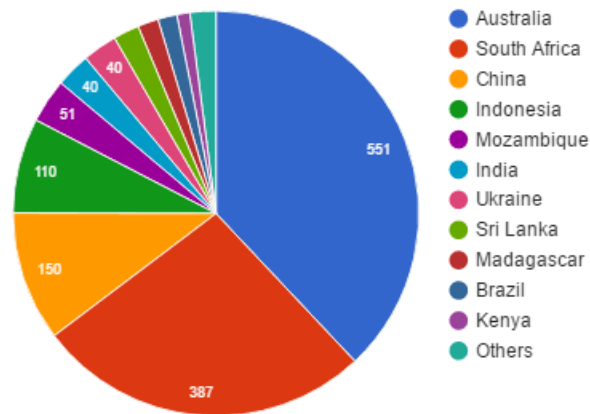


Figura 4. Produção de concentrado de zircão para 2014

Fonte: Serviço Geológico dos Estados Unidos (2014).

- A empresa cotada de Dublin e Londres *Kenmare Resources*, que explora as minas em Moma, na costa da província de Nampula, no norte de Moçambique, desde 2007, anunciou que no ano de 2021 estabeleceu um recorde de produção de ilmenite no segundo trimestre daquele ano.
- O Director-Gerente da *Kenmare* em 2021, Michael Carvill, afirmou que as condições de mercado para ilmenita e matérias-primas de titânio em geral permaneceram fortes no segundo trimestre do ano de 2021 com o fortalecimento dos preços trimestre a trimestre. As perspectivas para o zircão também continuaram melhorando, com aumentos de preços durante o trimestre e continuando até a data da entrevista.
- A *SyrahResources* (Austrália) fez seu primeiro embarque de grafite de seu projecto Balama no segundo semestre do ano de 2017 e inaugurou formalmente o projecto em abril de 2018. O projeto Balama tem capacidade de produção de 350.000 toneladas por ano, o que representa uma participação de 40% do mercado mundial de grafite. A Syrah exportará a maior parte dessa produção para os mercados Chinês e Norte-Americano.
- *Gemfields* (UK) detém uma participação de 75% na Montepuez Ruby Mining Limitada, que iniciou as suas operações em Fevereiro do ano de 2012, e representa um investimento de 130 milhões de dólares no desenvolvimento de depósitos de rubis do norte de Moçambique numa área de concessão de 2600 quilómetros quadrados. A Gemfields estima que sua concessão existente

contém um valor estimado de 467.000 quilates de rubis em mineralização primária e secundária.

## **2.1 MODOS DE CARACTERIZAÇÃO**

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 do(s) minera(is) 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 (Neumann, Shneider, & Neto, 2004).

Esta etapa de caracterização é determinante, pois otimiza o aproveitamento do recurso mineral, dando ao engenheiro as características mineralógicas necessárias para definir a sequência dos processos bem como permitir identificar ineficiências e perdas em processos existentes, possibilitando uma melhoria no rendimento global de uma planta química.

## **2.2 Técnicas de Caracterização de minerais**

### **2.2.1 Picnometria**

A Picnometria é um processo que utiliza um picnômetro (de líquidos ou sólidos) para determinar a densidade relativa de dois materiais (líquido-líquido ou líquido-sólidos).

Este método mede a densidade aparente de uma partícula a partir de dados da densidade de um fluido padrão inerte e não volátil, sendo a água uma das

substâncias mais utilizadas, dado que sua densidade é conhecida em várias faixas de temperatura (Alvarez, Alves & Boaventura, 2013).

A determinação da densidade ( $\rho$ ), tanto de líquidos quanto de sólidos, pode ser obtida, medindo-se a massa de um líquido ou de um sólido, que ocupa um volume conhecido, empregando-se o método do volume exacto, método do picnômetro. Esse método baseia-se no princípio de Arquimedes que diz que um corpo imerso em um líquido deslocará um volume de líquido correspondente ao seu volume.

Esta técnica consiste na determinação da densidade aparente por meio da medição indirecta da massa e do volume do sólido em balão volumétrico chato (picnómetro), utilizando água ou outro líquido.

### **2.2.2 Classificação Granulométrica**

O solo tem origem natural por isso, se pegarmos uma amostra de solo qualquer e estudarmos suas partículas sólidas, veremos que as mesmas tem dimensões variadas. A essa determinação das dimensões das partículas presentes no solo e suas proporções damos o nome de análise/classificação granulométrica (Marinho, 2020).

A análise granulométrica é importante para a classificação do solo e, por consequência, sua caracterização.

Neste passo da caracterização mineral ocorre a britagem e moagem da amostra para ficar conforme as medidas necessárias para a realização dos testes subsequentes. Para o sucesso desta técnica usa-se a peneiração e a sedimentação para partículas muito finas.

As amostras de areia são separadas por peneiração em classes granulométricas e são traçadas as respectivas curvas granulométricas. Estas curvas constituem uma importante ferramenta que ajudará na selecção de um método de separação mais adequado, tendo assim uma grande importância na decisão sobre o conjunto de medidas de engenharia a serem aplicadas e introduzidas no sistema de

processamento e tratamento da matéria-prima, nomeadamente o tipo de processamento e os equipamentos a utilizar.

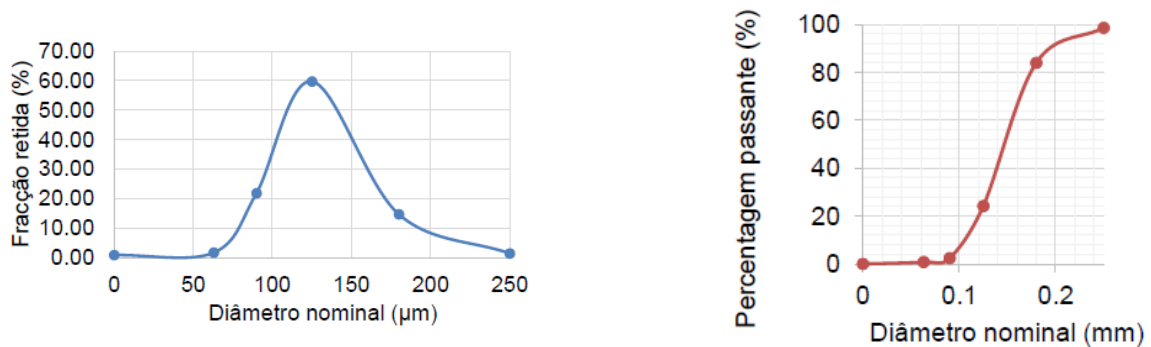


Figura 5. Curvas de distribuição granulométrica: acumulativa e curva de frequências

Fonte: Inguane (2019).

Traça-se assim a **curva acumulativa**, que é a percentagem da fração passante(x) *versus* diâmetro(d) e traça-se também a **curva diferencial**, que é derivada da curva cumulativa, ou seja,  $dx/dd$  *versus* d.

### 2.2.3 Microscopia Óptica

O microscópio é um instrumento utilizado para ampliar e observar estruturas pequenas dificilmente visíveis ou invisíveis a olho nú. O microscópio óptico utiliza luz visível e um sistema de lentes de vidro que ampliam a imagem das amostras (Morreira, 2013).

Os primeiros microscópios ópticos datam do ano de 1600, mas é incerto quem terá sido o autor do primeiro. A sua criação é atribuída a vários inventores: Zacharias Janssen, Galileo Galilei, entre outros. A popularização deste instrumento, no entanto, é atribuída a Anton Van Leeuwenhoek. Os microscópios ópticos são constituídos por uma componente mecânica de suporte e de controlo da componente óptica que amplia as imagens. Os microscópios actuais que usam luz transmitida partilham os mesmos componentes básicos.

A maioria dos microscópios ópticos funcionam com uma intensidade da luz que pode ser regulada directamente através do reóstato que actua na própria fonte luminosa ou indirectamente através do condensador e do diafragma: a intensidade aumenta se se subir o condensador e abrir o diafragma e diminui se se descer o condensador e fechar o diafragma. A ampliação – número de vezes que a imagem é aumentada em relação ao objecto real - é função conjunta do poder de ampliação da objectiva e ocular utilizadas.

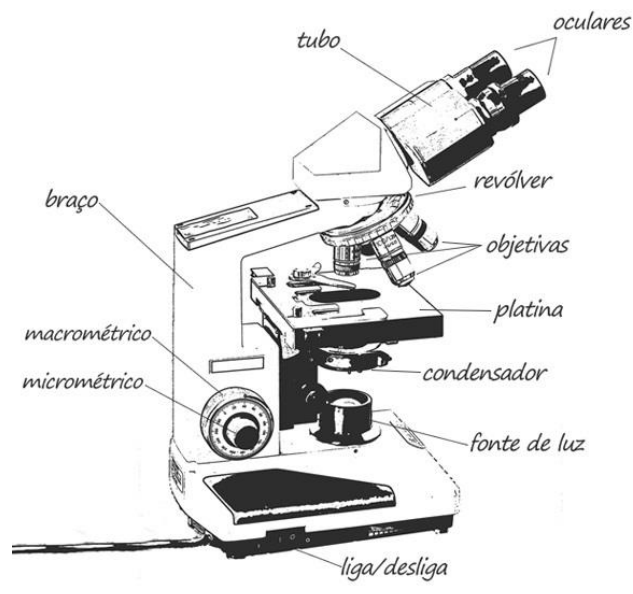


Figura 6. Ilustração do local dos elementos principais de um microscópio óptico

Fonte: <https://www.splabor.com.br> (2013)



Figura 7. Microscópio Óptico Binocular Nikon SMZ1270

A ampliação total é o produto da ampliação da objectiva pela ampliação da ocular (exemplo, ampliação da ocular dez vezes (10x), ampliação da objetiva vinte vezes (20x), ampliação total é  $10 \times 20 = 200x$ ). A imagem observada depende também do poder de resolução, isto é, a capacidade que as lentes têm de discriminar objectos muito próximos. O poder de resolução depende do comprimento de onda da luz utilizada, e o seu valor teórico para um microscópio óptico é de cerca de  $0,2 \mu\text{m}$  – ou seja, dois objectos têm de estar pelo menos a uma distância um do outro de  $0,2 \mu\text{m}$  para poderem ser discriminados ao microscópio óptico. Este valor, contudo, só é alcançável com lentes de elevada qualidade e preço.

#### **2.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Jahn (2007) diz que a utilização de diferentes tipos de microscopias para retirar diferentes informações das mesmas amostras dá-se o nome de Microscopia Correlativa. A MEV é um dos tipos de microscopia usados para caracterizar amostras.

Historicamente, a microscopia eletrônica de varredura teve seu início com o trabalho de M. Knoll (1935), descrevendo a concepção do MEV. Em 1938 Von Ardenne construiu o primeiro microscópio eletrônico de transmissão de varredura adaptando bobinas de varredura ao microscópio eletrônico de transmissão. O aumento máximo conseguido foi de  $8\ 000x$ , com resolução aproximada de  $50 \text{ nm}$ . O primeiro

microscópio eletrônico de varredura para observação de amostras espessas foi construído em 1942 nos laboratórios da RCA usando o detector de elétrons secundários para obter a imagem. No entanto, a resolução conseguida neste caso foi de apenas 1  $\mu\text{m}$ , o que era muito má, já que com o microscópio ótico era possível obter resolução de 0,5  $\mu\text{m}$ . Melhoramentos foram feitos para reduzir o diâmetro do feixe de elétrons e melhorar a parte eletrônica, principalmente a relação sinal-ruído através do uso de elétron-multiplicadora e com estas modificações, conseguiu-se obter imagem com resolução de 50 nm, que mais tarde, vieram outras ferramentas como lentes e programas de computadores para auxiliar na visualização.

A apresentação característica da imagem tridimensional da amostra é o resultado da grande profundidade de campo deste equipamento, bem como o efeito sombra-relevo do contraste de elétrões (Goldstain et al., 2003).

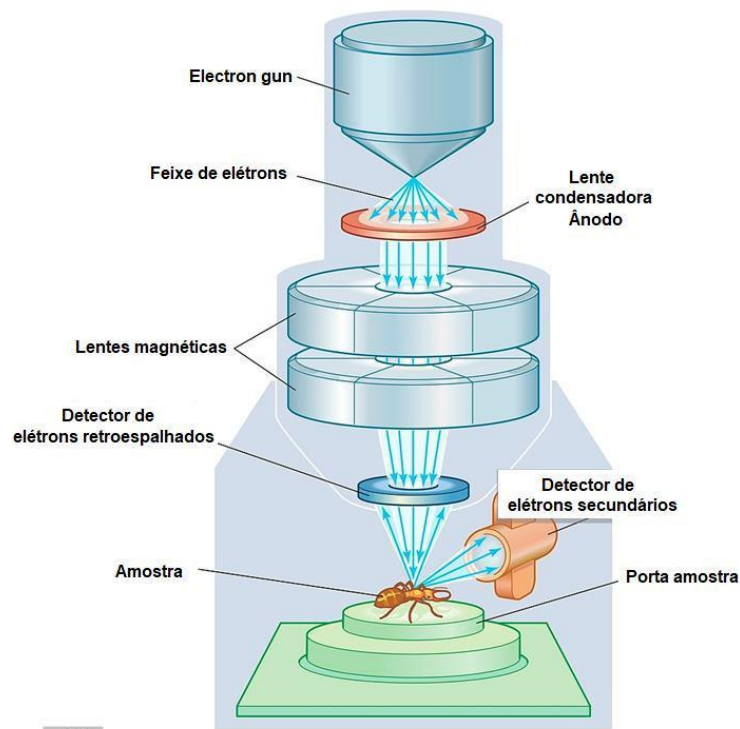


Figura 8. Ilustração do funcionamento da MEV

Fonte: Manzani (2019).

No MEV, um feixe de elétrões altamente focado percorre a superfície das amostras ponto por ponto, linha a linha. Os elétrões secundários ou retrodifundidos pela amostra são detetados por detetores de elétrões, sendo este sinal tratado por forma a criar uma imagem pixel por pixel num ecrã.



O canhão de elétrons, produz e acelera elétrons até à amostra. O canhão pode ter dois tipos de emissão, (1) termoemissão - de tungstênio ou hexaboreto de lantânio - e (2) de emissão de campo. Para que os elétrons se propagem sem que ocorra dispersão é necessário criar vácuo ao longo da coluna. (Denk & Horstmann, 2004)

O sistema de varrimento permite que seja formada uma imagem da amostra. Para tal, o feixe de elétrons faz o varrimento da amostra horizontalmente em direções perpendiculares (X e Y). O procedimento denomina-se raster scanning e faz com que o feixe cubra uma área retangular das amostras. Os outputs dos geradores X e Y são aplicados a um equipamento que forma e faz o display da imagem, tal como acontece num tubo de raios catódico. O feixe de elétrons do raio catódico apresenta um sincronismo exato com o feixe do MEV, de forma que cada ponto da amostra (dentro da área do raster scan) seja equivalente a um ponto no display da imagem.

A câmara onde é colocada a amostra é um espaço livre, imediatamente abaixo da lente objetiva, onde estão posicionados todos os detetores usados no microscópio - detetores de sinal de elétrons e detetores de raios-X - bem como onde é possível movimentar a amostra e onde é necessário criar o vácuo (Egerton, 2005).

### **2.2.5 Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)**

O sistema de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) é uma técnica de microanálise que, acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), possibilita uma alta capacidade de ampliação e visualização da amostra para análises de áreas específicas (Ferrer-Eres et al., 2010).

O MEV é um equipamento que utiliza um feixe de elétrons para explorar a superfície da amostra e, dessa forma, gerar imagens com conformação tridimensional e de alta resolução do material. Entretanto, o EDS permite a realização de uma avaliação química qualitativa e semiquantitativa, dado que sua análise se restringe à superfície da substância, não tendo precisão, mas sim, uma estimativa da concentração dos elementos presentes. Desse modo, um dos focos necessários para uma análise satisfatória é a topografia da amostra, sendo que quanto mais plano e polido for o material, melhor será o resultado semiquantitativo obtido (Duarte et al., 2003; Dedavid et al., 2007, p. 11).

Acopla-se o EDS a um MEV, sendo útil para conhecer os elementos químicos presentes a nível microscópico em uma amostra.

## **2.3 MÉTODOS DE CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS**

Para que a separação ocorra, é preciso que o ou os minerais de interesse não estejam fisicamente agregados aos que não são de interesse, daí a importância das etapas de fragmentação e classificação, que realizam e monitoram essa separação, respectivamente.

A razão de se dar ao processo de separação de minerais contidos em um minério dá-se o nome de **concentração** (Sampaio, 2001). A separação de minerais exige que haja uma diferença física ou físico-química entre o mineral de interesse e os demais e pode ser fácil ou muito complexa, dependendo do minério.

### **2.3.1 Mesa de Concentração Gravimétrica**

As mesas de concentração são dispositivos de concentração gravimétrica com fluxo laminar em uma superfície inclinada. Aqui falamos principalmente dos tipos com movimento vibratório longitudinal, onde as partículas minerais são diferenciadas formando bandas de leque (sobancelhas), de acordo com seu peso específico (e granulometria).

Visto que as partículas se encontram submetidas à duas forças, oscilação e movimento do filme líquido, observa-se uma força resultante diagonal fazendo com que atravessem o deque de forma a serem recolhidas nas posições inferiores. Assim, as partículas densas são descarregadas na extremidade oposta ao mecanismo de accionamento e as partículas leves, por outro lado, são descarregadas ao longo do lado oposto da alimentação (Sampaio, 2001).

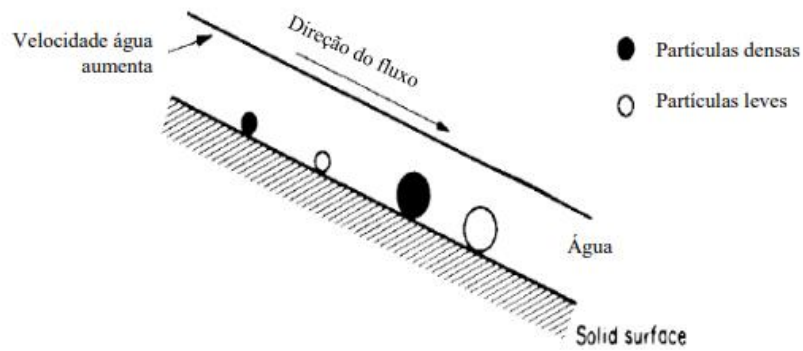


Figura 9. Camada fluída em ação

Fonte: Wills, et al. (2006).

O filme fluente separa efectivamente partículas grossas de pequenas partículas densas, esse mecanismo é utilizado até certo ponto na mesa concentradora, sendo talvez a forma mais metalurgicamente eficiente de concentrador de gravidade, sendo usado para tratar fluxos de fluxo difíceis, e para produzir concentrados acabados a partir de produtos de outras formas de sistema de gravidade (Wills, et al., 2006).

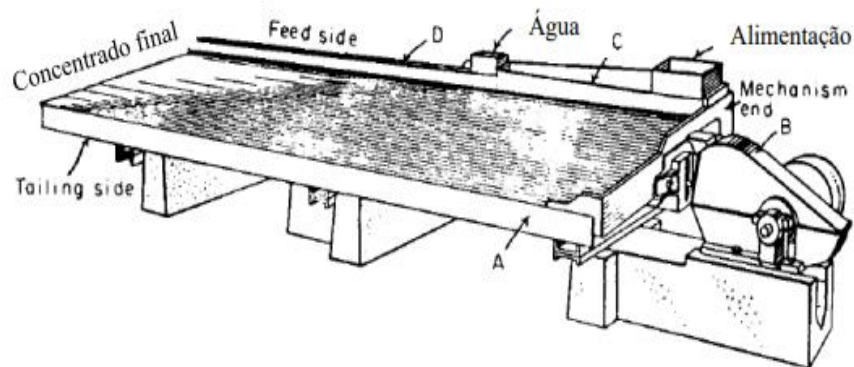


Figura 10. Ilustração da mesa vibratória de Wilfley

Fonte: Wills, et al. (2006).

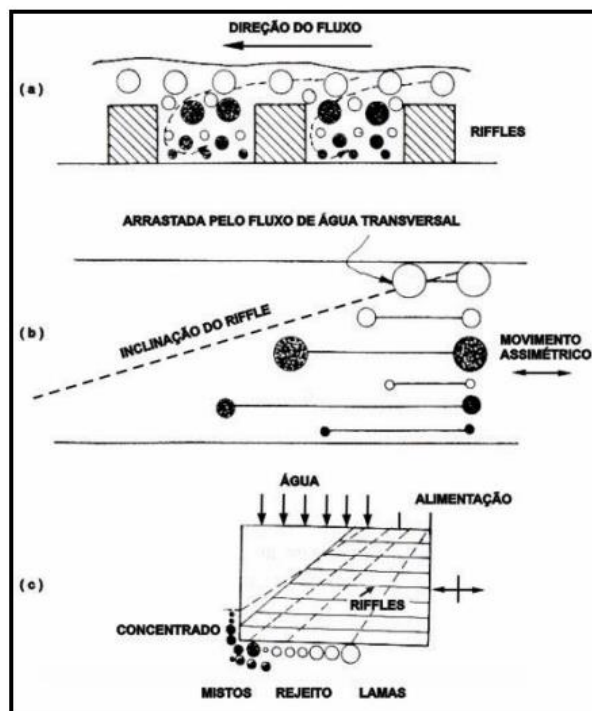


Figura 11.a) estratificação vertical entre os rifles; b) arranjo das partículas ao longo dos rifles; c) distribuição na mesa.

Fonte:

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2178/1/Tratamento%20de%20Min%C3%A9rios%206a%20edi%C3%A7%C3%A3o%20%28CAP.6%29.pdf> (2008)

Imagem: Fernando Lins

Segundo Galvão (2017), a eficiência na concentração de minerais usando a mesa oscilatória Wilfley depende das características da alimentação, tais como a granulometria e de parâmetros operacionais associados ao equipamento, ângulo de inclinação do deque, fluxo de água de limpeza, taxa de alimentação, entre outros.

O objectivo de um beneficiamento adequadamente realizado é que todos os minerais que possuam interesse econômico para sua comercialização sejam devidamente identificados e aproveitados, caso contrário o processo acarretará perdas financeiras e aumento de rejeitos que serão motivo de impacto ambiental da actividade.

### 2.3.2 Separação Magnética

Materiais magnéticos, que atuam como magnetos e são capazes de atrair minerais de ferro, são conhecidos desde os primórdios da civilização. No entanto, a prática da separação magnética só foi reconhecida no século XIX (Svoboda e Fujita, 2003).

Hoje, a separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais, sendo amplamente utilizada na concentração de minerais ferrosos.

A separação magnética pode ser empregada na concentração de minerais, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies mineralógicas individualmente, no beneficiamento de minério e na remoção de sucata.

A propriedade de um mineral que determina sua resposta a um campo magnético é chamada **susceptibilidade magnética** (Da Luz, 2010). Com base nessa propriedade, os materiais ou minerais são classificados em duas categorias: aqueles atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso, incluem-se os minerais magnéticos. Dentre estes, tem-se os minerais ferromagnéticos, que são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. No segundo caso, incluem-se aqueles que são repelidos pelo campo, e são denominados diamagnéticos ou não magnéticos. Minerais ferromagnéticos compreendem aqueles que são fortemente atraídos pelo ímã comum (Da Luz, 2010). O exemplo mais conhecido é a magnetita. Os paramagnéticos são fracamente atraídos e o exemplo clássico é a hematita. Ainda segundo Da Luz (2010), minerais diamagnéticos possuem susceptibilidade magnética negativa e, portanto, são repelidos quando submetidos a um campo magnético. Entre outros, se destacam: quartzo, cerussita, magnesita, calcita, barita, fluorita, esfalerita, etc.

A separação magnética é uma técnica ambientalmente amigável e pode ser usada tanto a seco como a húmido, viabilizando o seu uso em regiões áridas ou onde há disponibilidade de água. O método a seco é usado, em geral, para minérios de granulometria grossa e o método a húmido para aqueles de granulometrias mais finas. Na história da separação magnética verificam-se avanços em ambos os métodos, sem contar a utilização da tecnologia dos supercondutores, que abriu um novo horizonte na área de processamento de minérios (Lawyer e Hopstock, 1974; Mihalk, 1979; Norrgran, 1990; Svoboda e Fujita, 2003).



Figura 12. Esquema de funcionamento de um separador magnético de rolos

Fonte: MHS - Indústria Ltda (2022)

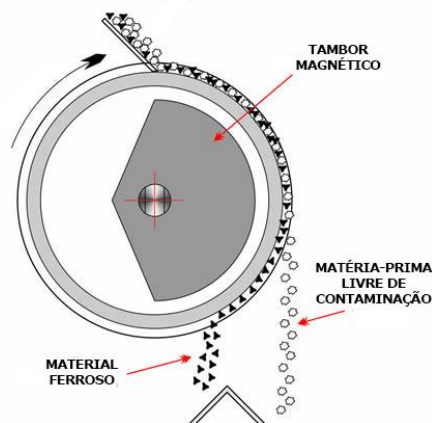


Figura 13. Esquema de funcionamento de um separador magnético de tambor

Fonte: Mgtek Brasil (2021).



Figura 14. Separador magnético isodinâmico de Frantz

Fonte: Giovanni Pedemonte (2016)

O desenvolvimento da separação magnética evoluiu para uma tecnologia que permite separar, desde materiais fortemente magnéticos a fracamente magnéticos, mesmo que sob a forma de partículas finamente dispersas. Isso resultou no desenvolvimento da separação magnética de alta intensidade (high intensity magnetic separation – HIMS) e da separação magnética de alto gradiente (high gradient magnetic separation – HGMS), que usa magnetos resistentes (baixa condutividade), supercondutores ou magnetos permanentes.

Tabela 2. Principais minerais com propriedades magnéticas

Grupo 1 – Ferromagnéticos		
Ferro	Magnetita	
Grupo 2 – Magnéticos		
Ilmenita	Pirrotita	Franklenita
Grupo 3 – Fracamente Magnéticos		
Hematita	Mica	Calcopinta
Sidenita	Wolframita	Talco
Rodonita	Apatita	Gesso
Limonita	Cerussita	Fluorita
Corindon	Bornita	Alugita

Fonte: Adaptação da Tabela do Curso de Especialização em Tratamento de Minérios (2012)

A utilização e aprimoramento dos imãs, em particular os de terras-raras, resultando na melhoria de suas propriedades magnéticas, contribuiu para inovar na área da tecnologia de separação magnética. Outro desenvolvimento que contribuiu também para inovação tecnológica foi a introdução de matrizes (placas com ranhuras ou metal expandido, malhas, bolas, etc.), no campo magnético dos separadores. Essas matrizes, quando magnetizadas, geram um gradiente magnético local, resultando em maior força magnética que atua sobre a partícula (Svoboda e Fujita, 2003).



### 3 ESTUDO MINERALÓGICO DAS AREIAS DE MACANETA: MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo mineralógico das areias da Praia de Macaneta foi feito nos laboratórios da **Engenharia Química, Geologia e Química** e seguiram a rota descrita na figura 15.

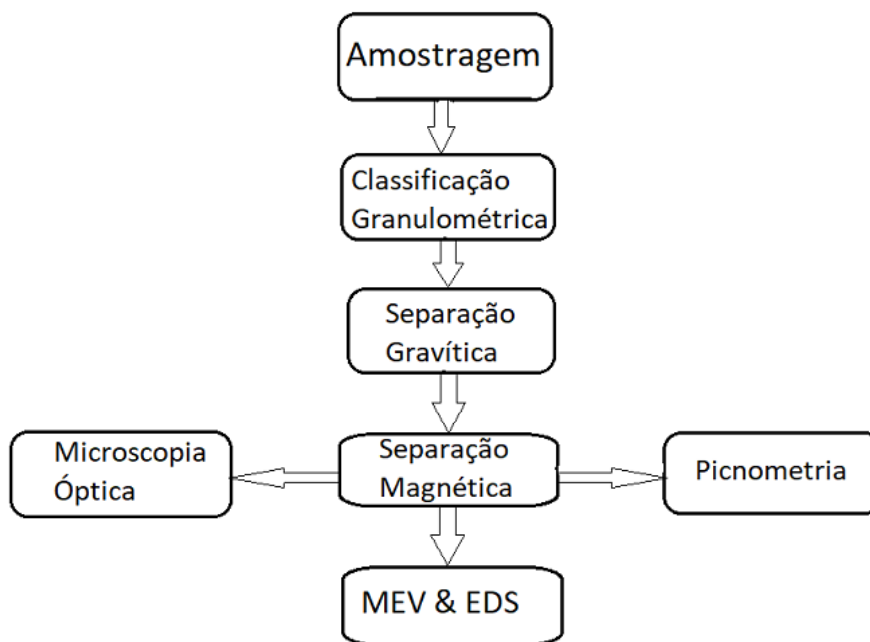


Figura 15. Rota usada para a caracterização das areias

Em seguida, seguem os materiais e métodos usados para o cumprimento da rota acima descrita.

#### 3.1 Amostragem

Segundo Corrêa (2021), amostragem é uma quantidade representativa do todo que se deseja amostrar. O método de retirada da amostra deve garantir que ela seja representativa deste todo, no que diz respeito à(s) característica(s) de interesse.

Ainda segundo Corrêa (2021) **quarteamento** é uma técnica que visa à redução de massa das amostras – divisão da amostra global em alíquotas com massa menor, para obtenção da amostra final, que se deseja trabalhar para os ensaios laboratoriais.

As amostras foram colhidas na Praia de Macaneta e postas a secar na estufa a 60°C.

Para a retirada da amostra final seguiram-se os seguintes passos:

- 1º- Dividiu-se a amostra em 10 (dez) partes aproximadamente uniformes;
- 2º- Retirou-se alternadamente 5 (cinco) partes e misturou-se as mesmas;
- 3º- Dividiu-se a amostra misturada anteriormente em 6 (seis) partes aproximadamente uniformes;
- 4º- Retirou-se 3 (três) partes alternadamente e misturou-se as mesmas;
- 5º- Dividiu-se a amostra misturada anteriormente em 4 (quatro) partes uniformes;
- 6º- Retirou-se 2 (duas) partes alternadamente e misturou-se as mesmas;
- 7º- Alimentou-se a última mistura da amostra ao quarteador do tipo *Jones* obtendo assim a amostra final. O restante ficou como amostra arquivo (cerca de 400 gramas).



Figura 16. Quarteamento da amostra



Figura 17. Quarteador do tipo Jones

### 3.2 Análise Granulométrica

A classificação granulométrica foi feita num vibrador *Tamson VS 1000* durante quinze (15) minutos, no modo contínuo e seguiu-se a série Tyler com as aberturas desde 1mm até 0,063mm. Após a vibração, pesaram-se as massas retidas nos peneiros.



Figura 18. Vibrador TAMSON VS 1000 e a série de peneiros usada

### 3.3 Separação Gravítica

A separação gravítica foi feita na mesa de *Wilfley*, onde alimentou-se 430g, 1000g e 320g correspondente às massas retida nos peneiros de 0,355mm, 0,250mm e 0,180mm respectivamente.

Como mostrado na figura 20, a mesa separa os minerais em pesados, intermédios e leves. As operações foram feitas à húmido, colheu-se as amostras como mostrado na figura 19, e após a separação, deixou-se secar as amostras na estufa a uma temperatura de 70°C durante 2 (dois) dias. Após a secagem do material recolhido, calcularam-se as perdas e a recuperação que se alcançou usando a mesa.



Figura 19. Operando na mesa de Wilfley

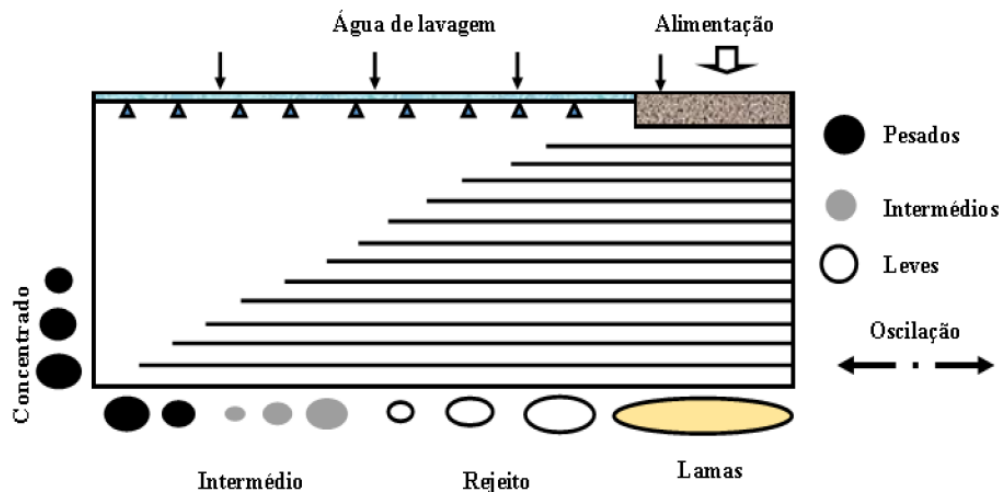


Figura 20. Esquema da mesa de separação gravítica

Fonte: Inguane (2019).

### 3.4 Separação Magnética

A experiência de separação magnética iniciou com o **estudo dos parâmetros óptimos** a operar no separador magnético, usando um planeamento factorial  $2^3$ , que mostra as combinações dos ensaios variando a frequência de vibração da calha (*chute*), a frequência de vibração da alimentação (*feed*), a granulometria e mantendo constante a intensidade (0,2A), avanço lateral ( $5^\circ$ ) e avanço longitudinal ( $0^\circ$ ). A tabela 3 ilustra os parâmetros avaliados para este experimento e a tabela 4 ilustra o plano estatístico do cruzamento dos parâmetros avaliados.

Tabela 3. Parâmetros de operação avaliados no separador magnético de Frantz

Parâmetro	Denominação	Nível superior (+)	Nível inferior (-)
<i>Chute</i>	Y1	5Hz	3Hz
<i>Feed</i>	Y2	5Hz	3Hz
Granulometria	Y3	0,250mm	0,180mm

Tabela 4. Planejamento estatístico do cruzamento de variáveis para determinação dos parâmetros ótimos de funcionamento do Separador Magnético de Frantz

Variáveis Codificadas				Variáveis Reais		
Corrida	Y1	Y2	Y3	Chute (Hz)	Feed (Hz)	Granulometria (mm)
1	+1	+1	+1	5	5	0,250
2	+1	-1	+1	5	3	0,250
3	-1	+1	+1	3	5	0,250
4	-1	-1	+1	3	3	0,250
5	+1	+1	-1	5	5	0,180
6	+1	-1	-1	5	3	0,180
7	-1	+1	-1	3	5	0,180
8	-1	-1	-1	3	3	0,180

**Após o planejamento estatístico**, fez a separação magnética operando às condições ótimas encontradas.

Alimentou-se ao separador magnético uma massa de 15g provenientes da separação gravítica para a granulometria de 180 $\mu$ m, por esta ter apresentado a maior recuperação na separação gravítica.

O separador magnético de Frantz funciona com realimentação, em que o material não magnético de uma corrida é usado como alimentação da corrida seguinte e aumenta-se a intensidade do campo magnético. Fizeram-se 5 experimentos, aumentou-se a intensidade da corrente até 0,3A e o material que não foi separado até 0,3A foi extrapolado usando 0,5A para efeitos do traçado das curvas completando assim 100% da massa adicionada.



Figura 21. Separador Magnético Frantz

A separação magnética foi feita a seco, com as inclinações longitudinal e lateral reguladas para  $5^{\circ}$  e  $0^{\circ}$ , respectivamente e as vibrações de *chute* e *feed* para 3Hz e 5Hz respectivamente, antes e depois do tratamento térmico.

Vários estudos com o objectivo de otimizar os beneficiamentos das areias vêm sendo feitos e um dos métodos é aquecendo a areia tentando assim alterar as propriedades magnéticas.

Com vista avaliar o efeito do aquecimento da areia no beneficiamento da mesma, foram usados os parâmetros do ensaio C3 proposto por Cumbane (2000) para o **tratamento térmico**, que têm como condições de temperatura à  $750^{\circ}\text{C}$ , durante 10 (dez) minutos. Foi usada para o aquecimento da areia a mufla *termolab*.



Figura 22. Mufla Termolab

### 3.5 Análise da Microscopia Óptica

A análise microscópica foi feita usando o microscópio óptico binocular da marca *Nikon SMZ1270*, para as granulometrias desde 0,063 até 0,355mm, usando a luz natural e artificial, dependendo da melhor visão e ajuste no aparelho. As imagens foram ampliadas em cem (100) vezes.



Figura 23. Microscópio binocular Nikon SMZ1270



### 3.6 Análises MEV & EDS

As análises no Microscópio Eletrônico de Varredura e as análises referentes à Espectroscopia por Energia Dispersiva foram feitas em simultâneo, pois o equipamento da MEV está acoplado ao da EDS. As análises foram feitas usando o equipamento *JSM-IT100 series SEM*. Foram usadas AT e ANT à 0,1A para avaliar o efeito do tratamento térmico e AT à 0,1A e 0,3A para identificar os elementos presentes. Foi usado *Air Duster Ewent* para fixar as amostras no porta amostras.

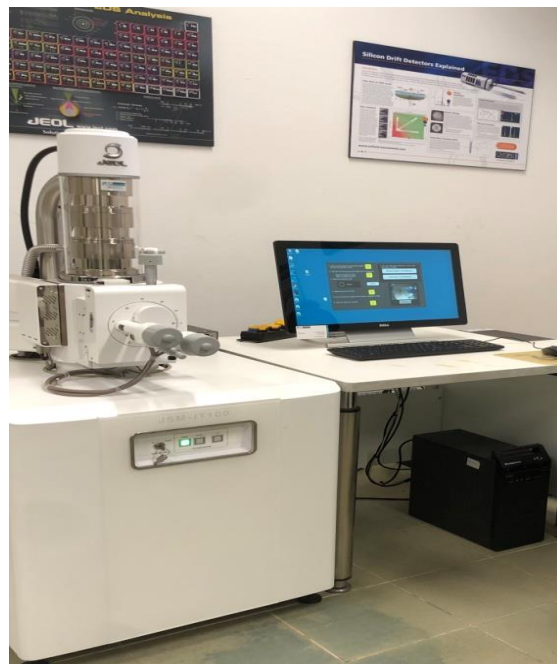


Figura 24. Aparelho JSM-IT100 series SEM

### 3.7 Análise Picnométrica

Para determinar a densidade da areia, usou-se o método do picnômetro.

O picnômetro de vidro é um equipamento do laboratório que serve para o cálculo da densidade de substâncias, sendo composto de um frasco de vidro pequeno, uma tampa com orifício capilar longitudinal – tampa essa que pode se apresentar tanto em vidro como em outros materiais, como o alumínio e, em alguns modelos, um termômetro embutido.

Foi usado um picnómetro do tipo “*Reischauer*”, com 25ml de volume e fizeram-se os ensaios para a granulometria de 180µm usando os concentrados das intensidades de 0,1A, 0,15A, 0,2A, 0,25A e 0,3A para AT e ANT respectivamente.

Mediu-se a massa do picnómetro vazio (*A1*), massa do picnómetro com a amostra dentro (*A2*), massa do picnómetro com a amostra e água dentro (*A3*) e a massa do picnómetro com água dentro (*A4*).

De acordo com Sampaio & Da Silva (2001), pode-se calcular a densidade relativa dos sólidos usando a fórmula (1).

$$ds = \frac{A2-A1}{(A4+A2)-(A1+A3)} \quad (1)$$

3 (três) ensaios foram feitos, usando as massas provenientes da separação magnética com e sem tratamento térmico. Posto isto, foram calculadas as densidades relativas assim como os desvios padrões.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise Granulométrica

O traçado da curva cumulativa indica a fracção da granulometria que mais acumulou areia em determinado peneiro e a curva de distribuição de frequência é um tipo de estatística descritiva representada como um gráfico que demonstra a frequência da ocorrência de uma variável, que neste caso é a abertura do peneiro.

Tabela 5. Resultados do peneiramento da amostra

Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa retida no peneiro (%)	% de agregado que passou	% de agregado retido
1	220	4.78	95.22	4.78
0.5	835	18.15	77.07	22.94
0.355	430	9.34	67.72	32.28
0.250	2465	53.58	14.13	85.87
0.180	325	7.07	7.07	92.94
0.125	262.42	5.71	1.36	98.64
0.09	15	0.33	1.03	98.97
0.063	0.2	0.005	1.004	99.1

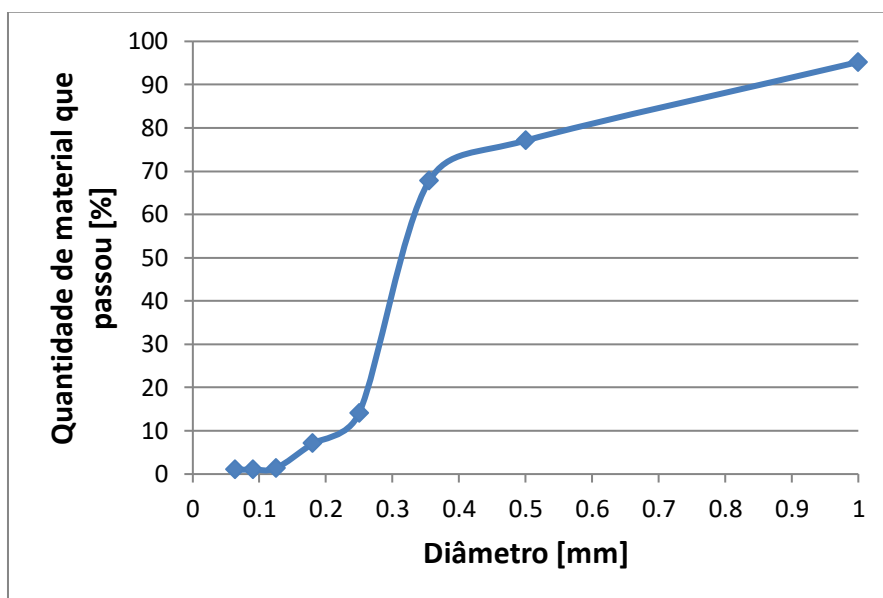


Gráfico 1. Curva Cumulativa da Classificação Granulométrica

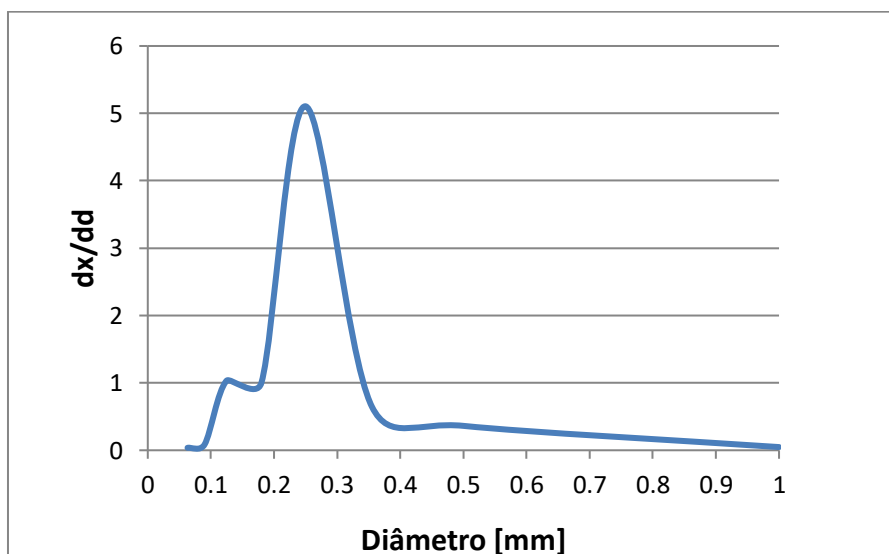


Gráfico 2. Curva Diferencial da Classificação Granulométrica

A partir dos gráficos 1 e 2, observa-se que o peneiro de 0,250 mm acumulou a maior quantidade de material (85,87%) sendo a classe modal. O peneiro de 0,063mm foi o que teve o menor valor de frequência, sendo este o peneiro com a menor quantidade e as curvas apresentam uma concentração à esquerda, entre aproximadamente 0,2mm e 0,4mm.

## 4.2 Concentração Gravítica

Para a mesa de concentração gravítica, foram usadas as massas retidas nos peneiros de 355, 250 e 180µm respectivamente. As massas dos restantes peneiros não foram usadas devido a terem sido demasiado reduzidas para o ensaio de concentração gravítica usando a mesa de *Wilfley*, sob o risco de se perder toda massa, visto que a operação esteve a decorrer à húmido. Pela fórmula nº2, calculou-se a percentagem de recuperado e posteriormente calcularam-se as percentagens da ganga e das perdas devido ao arraste provocado pela água da mesa.

$$\%recuperado = \frac{Massa\ Recuperada \times 100\%}{Massa\ total} \quad (2)$$

Tabela 6. Resultados para a Mesa de Wilfley

<b>Diâmetros do peneiro</b>	<b>Massa adicionada[g]</b>	<b>Recuperado [%]</b>	<b>Ganga[%]</b>	<b>Perdas [%]</b>
355µm	430	32,56	48,84	18,6
250µm	1000	46,8	33,1	20,1
180µm	325	51,04	24,64	24,32

Nota-se, pela percentagem do recuperado, que à medida que o diâmetro diminui, a percentagem de material recuperado e as perdas aumentam e, por sua vez, com o aumento do diâmetro a quantidade de ganga também aumenta. Mabilane (2019) obteve comportamento semelhante quanto à recuperação mássica e quanto à quantidade de rejeito para a amostra do tipo C proveniente do distrito de Nicoadala.

### 4.3 Estudo dos Parâmetros Óptimos do Separador Magnético de Frantz

Para o estudo dos parâmetros óptimos do separador magnético de *Frantz*, foi usada a massa de 15g *não tratada termicamente* nos 8 (oito) ensaios. Foi calculada a percentagem de recuperação e das perdas.

A separação é condicionada pela intensidade do campo magnético, inclinação lateral da calha, inclinação longitudinal da calha (define a velocidade de escoamento das partículas e o tempo que estas ficam sujeitas ao campo magnético) e a intensidade da vibração (relaciona-se com a quantidade de material que atravessa o campo) (Parfeneff, 1970).

A tabela 7 ilustra as percentagens de recuperação mássica e perdas para cada ensaio. O ensaio sete (nº7) apresenta a maior recuperação. Embora não tendo o valor mais baixo de perdas, foram os parâmetros do ensaio nº7 (sete) usados para as experiências à posterior de separação magnética com e sem tratamento térmico respectivamente.

Tabela 7. Resultados do planeamento estatístico

<b>Ensaio</b>	<b>% recuperado</b>	<b>%perdas</b>
1	16,798	0,72
2	13,149	0,547
3	16,134	0,597
4	16,184	0,546
5	12,85	0,1311
6	12,06	0,282
7	29,067	0,65
8	18,01	0,873

#### 4.4 Separação Magnética

Os minerais apresentam diferentes propriedades magnéticas, sucessivas separações magnéticas do material, a diferentes intensidades de campo magnético, permitem obter vários lotes constituídos por menor variedade de minerais facilitando a identificação dos mesmos nas fases seguintes.

Separaram-se 15g de material com a granulometria de 180 $\mu$ m proveniente da separação gravítica. Foi usada a granulometria de 180 $\mu$ m por ter apresentado maior recuperação no ensaio na mesa de *Wilfley*.

De seguida, fez-se o traçado da curva cumulativa e da curva diferencial para a amostra tratada e não tratada.

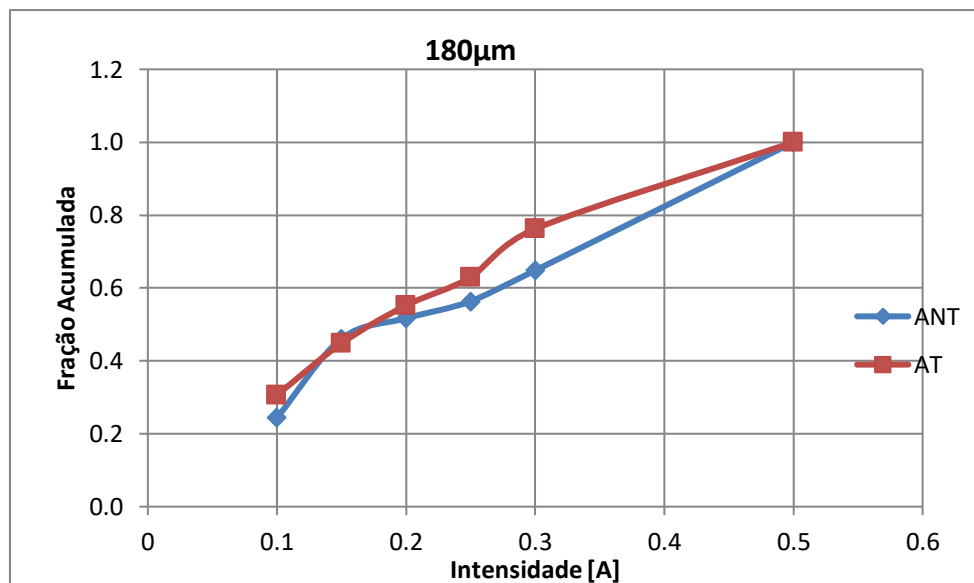


Gráfico 3. Curva Cumulativa para 180  $\mu$ m

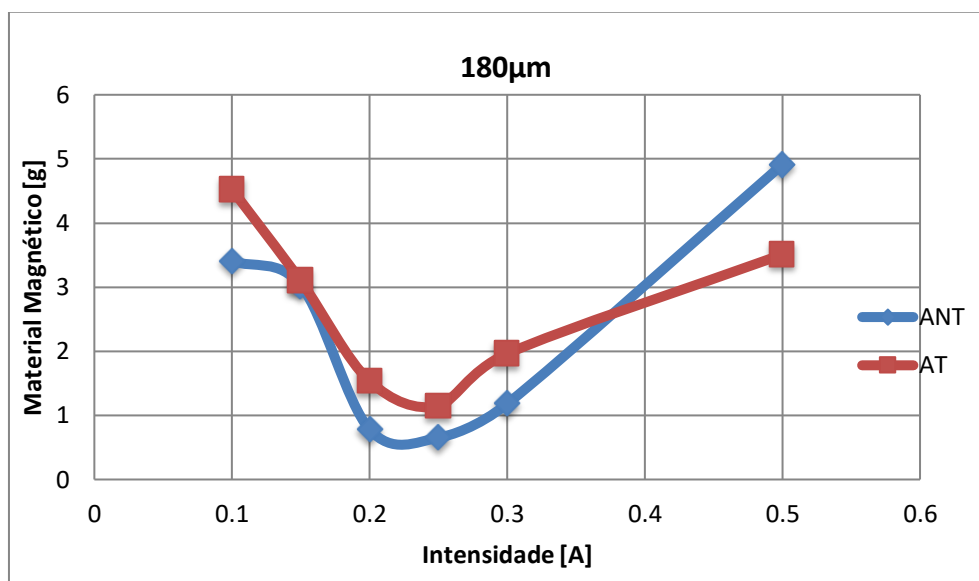


Gráfico 4. Curva Diferencial para 180µm

Pelas curvas traçadas, observa-se que para a granulometria de **180µm**, após o tratamento térmico, obteve-se uma maior recuperação nos 5 valores de intensidades.

Isto deve-se ao facto de durante o tratamento térmico, a areia ter sofrido um *oxidising roasting process* (processo de torrefacção oxidante) e com isso, propriedades físicas da areia são alteradas.

Grüner (1878) definiu a torrefacção como a oxidação à alta temperatura, por meio do ar, de matéria mineral triturada.

Se o “oxidante por excelência” é o ar, a oxidação não depende exclusivamente da sua ação. O ar, basicamente, raramente age sozinho e mesmo em situações em que o ar parece agir sozinho, a oxidação também ocorre indirectamente, por óxidos ou certos ácidos ou sais.

Parte dos minerais de ganga sofre uma pequena lixiviação. A lixiviação consiste, tipicamente, na remoção do metal de valor de modo a separá-lo da massa de ganga com um beneficiamento mínimo do minério (Heck, 2007). Contornam-se assim, os custos associados ao tratamento do minério e o procedimento segue com processos extractivos hidrometalúrgicos.



Deste modo, com o tratamento térmico, a quantidade de ilmenita é recuperável à uma intensidade mais baixa que em relação à sem o aquecimento, como mostrado nos gráficos 3 e 4, pois parte dos minerais ganhou propriedades magnéticas após o aquecimento.

Não obstante, ter usado um “*cross belt magnetic separator*”, manufacturado pela “*BoxMag Rapid Limited*” e intensidades entre 0 e 3A, Cumbane (2000) após o aquecimento das amostras do distrito de *Chibuto*, obteve um acréscimo na recuperação em todos os pontos das intensidades que trabalhou.

Resultados similares foram encontrados por Westcott e Parry em 1968 quando estudavam concentrados de ilmenita da *Austrália*. Os mesmos autores afirmam que aquecendo a areia a uma temperatura entre 700°C e 750°C faz com que a susceptibilidade magnética aumente em um factor de 4 a 5 comparando ao material que não sofreu o aquecimento.

#### **4.5 Análise Picnométrica**

Brod (2003) afirma que densidade relativa é característica para cada mineral, e depende basicamente de dois factores: os elementos químicos que constituem o mineral e a maneira como estes elementos estão arrançados na estrutura cristalina.

Deste modo analisou-se a densidade dos concentrados provenientes da separação magnética com e sem o tratamento térmico, seguindo a rota definida na figura 15.

Os resultados dos cálculos das densidades para AT e ANT apresentam-se maiores em relação ao quartzo (2.65) o que sugere a presença de minerais pesados. Operando à intensidade de 0.1A para a AT de 180µm obteve-se a maior densidade média.

À intensidade de 0.1A e 0.15A espera-se recuperar maioritariamente a ilmenite. Para as intensidades de 0.2A e 0.25A espera-se recuperar o rútilo e a ilmenite e para a intensidade de 0.3A espera-se recuperar maioritariamente o zircão, a magnetite, a ilmenite e outros minerais, seguindo a ordem teórica do valor das densidades.

Verifica-se um aumento da densidade das areias com o tratamento térmico em relação à sem tratamento térmico, o que é um indicador de otimização no beneficiamento através do aquecimento da areia.

Tabela 8. Resultados do Cálculo das Densidades Médias Relativas

<b>Intensidade (A)</b>	<b>Densidade</b>	<b>Amostra</b>
0.1	2.7937±0.005	AT
0.1	2.7832±0.009	ANT
0.15	2.7899±0.008	AT
0.15	2.7792±0.004	ANT
0.2	2.7803±0.04	AT
0.2	2.7783±0.006	ANT
0.25	2.7790±0.018	AT
0.25	2.7771±0.012	ANT
0.3	2.7222±0.018	AT
0.3	2.7089±0.009	ANT

#### 4.6 Análise no Microscópio Óptico

A análise na microscopia óptica foi feita em relação à influência do tamanho dos grãos na observação dos minerais presentes.

Os minerais pesados observados na lupa binocular ocorrem nas faixas granulométricas mais finas, em que abundam maioritariamente a ilmenite e o zircão.

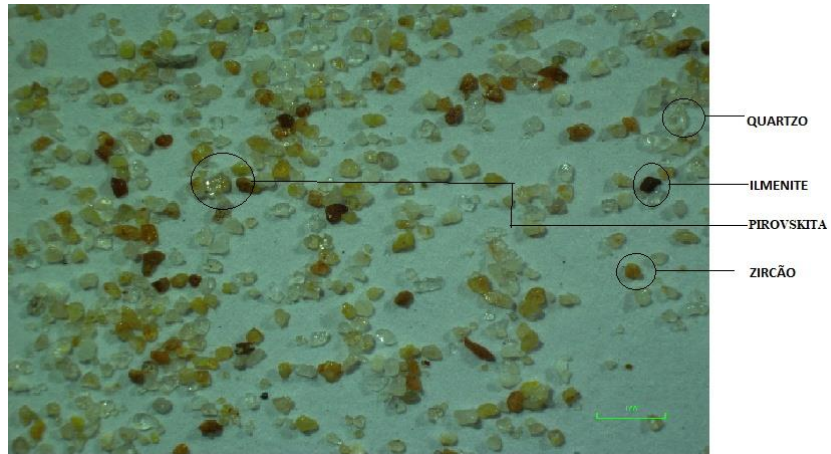


Figura 25. Minerais observados para 355µm

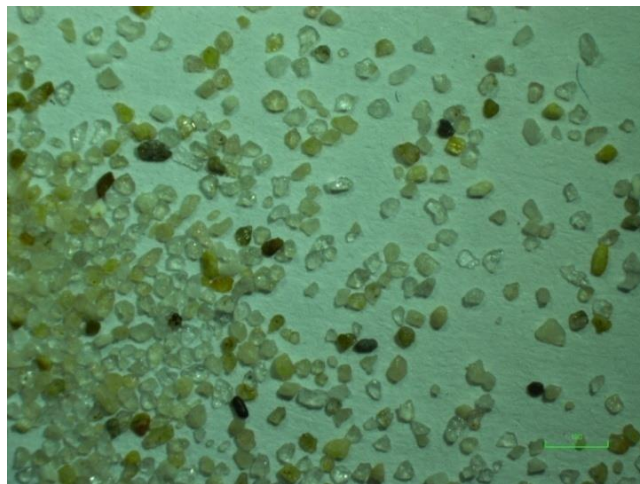


Figura 26. Minerais observados para 250µm

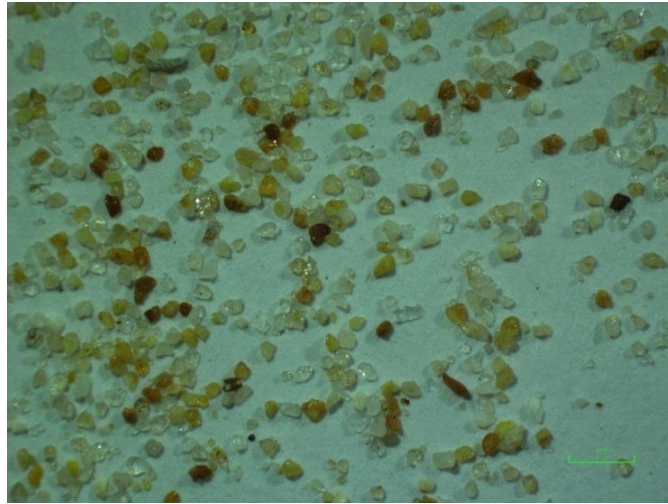


Figura 27. Minerais observados para 180µm

Observa-se a presença acentuada do rútilo, embora que a sua melhor observação dependeu do uso da luz artificial (luz do próprio microscópio) o que sugere que tenha um brilho relativamente reduzido para esta areia.

Os grãos do quartzo ocorrem em todas granulometrias. Este composto foi o mais abundante observado no microscópio. Observou-se também, embora que extremamente reduzida, a presença da perovskita ( $\text{CaTiO}_3$ ), que é um mineral raro mundialmente

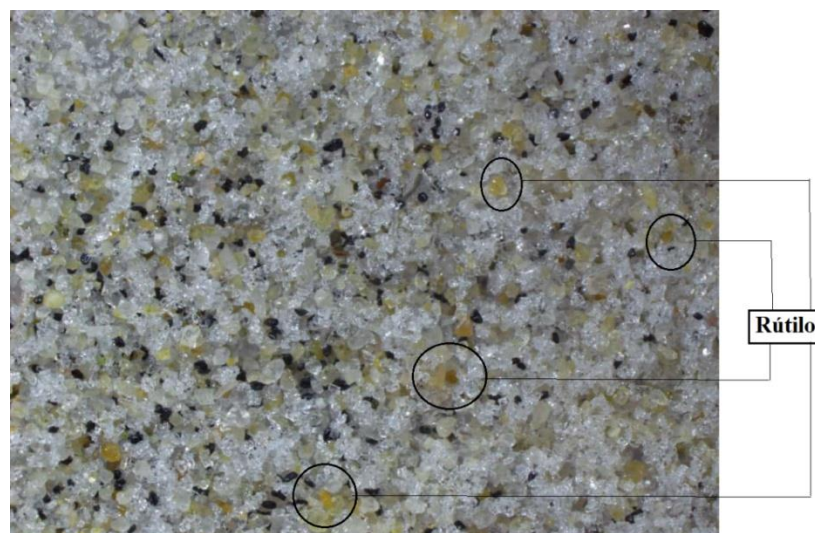


Figura 28. Minerais observados para 90µm

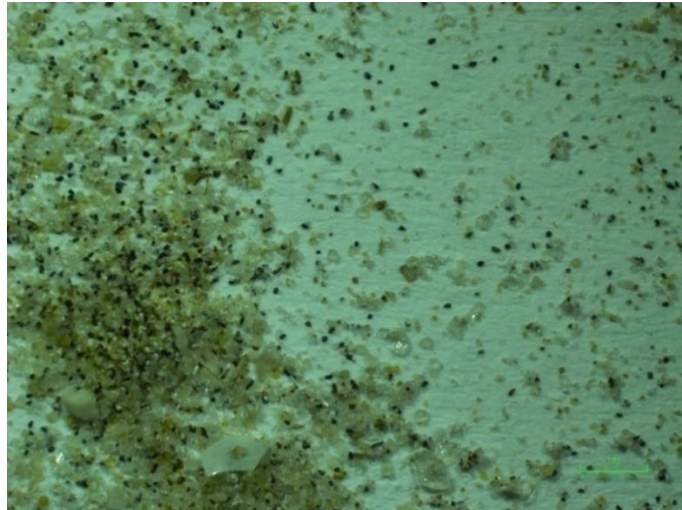


Figura 29. Minerais observados para 63µm

#### 4.7 Análises MEV & EDS

As análises por MEV e EDS foram feitas analisando os elementos presentes nas amostras, a morfologia e a análise semi-quantitativa do efeito do tratamento térmico para AT e ANT.

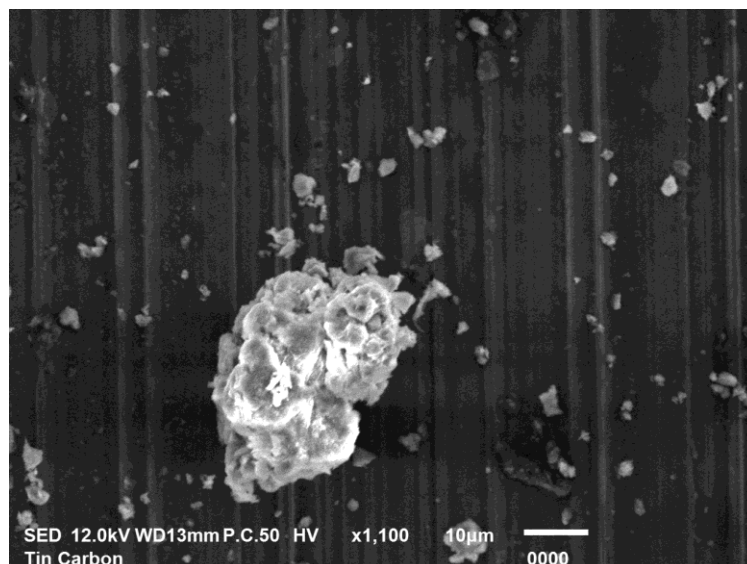


Figura 30. Microestrutura da ilmenite da AT para 0,3A.

Kaminsky, Etsell, Ibey e Omotoso (2007), investigando as areias de *Athabasca* (Canada), afirmaram que existe um grande número de diferentes minerais presentes nas areias e muitos dos quais têm picos sobrepostos, dificultando tanto na identificação quanto a quantificação.

Os mesmos autores, devido à essa dificuldade (de identificar os minerais de interesse), fizeram ajustes nos parâmetros de rede e nos fatores de escala para cada mineral identificado.

Baseando-se nisso, ajustes dos parâmetros e do local de análise foram feitas e a figura 30 foi a qua melhor permitiu a visualização da ilmenite que se assemelha à obtida por Ramakokovhu (2020). É possível observar na figura 30 a aparição de poros e microfissuras na microestrutura da ilmenite devido ao processo de aquecimento da areia.

Avaliando os resultados dos elementos na forma de óxido (figuras 31 e 32), nota-se que para AT à 0,1A tem-se percentagens mássicas de 9.11% para TiO<sub>2</sub> e 33.61% para FeO, enquanto para a ANT à mesma intensidade (0.1A) tem-se 3.52% para TiO<sub>2</sub>, o que indica que maior parte da ilmenita e/ou rútilo concentrou-se na amostra tratada termicamente confirmando o efeito do tratamento térmico.

Tabela 9. Resultados da EDS da AT para 0,1A.

Fórmula	Mass%	Mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
Mg	nd	Nd	-	-	-	-	K
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46,59	37,17	9,72	8,83	127	0,0000296	K
Si	nd	Nd	-	-	-	-	K
CaO*	10,69	15,50	2,03	8,54	19	0,0000101	K
TiO <sub>2</sub>	9,11	9,28	1,21	12,39	8	0,0000057	K
FeO*	33,61	38,05	4,97	18,76	15	0,0000222	K
Zr	nd	Nd	-	-	-	-	L
Total	100,00	100,00	17,93				

Tabela 10. Resultados da EDS da ANT para 0,1A.

Fórmula	Mass%	Mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
Na <sub>2</sub> O*	9,55	12,10	5,47	1,28	281	0,0000783	K
Mg	nd	nd	-	-	-	-	K
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	0,28	0,21	0,10	0,7	8	0,0000018	K
SiO <sub>2</sub> *	1,60	2,09	0,47	0,83	40	0,0000099	K
K	nd	nd	-	-	-	-	K
Ca	nd	Nd	-	-	-	-	K
TiO <sub>2</sub> *	3,52	3,45	0,78	1,16	45	0,0000314	K
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	0,20	0,10	0,05	1,23	2	0,0000020	K
Fe	nd	nd	-	-	-	-	K
CuO*	82,21	81,11	18,33	3,69	1878	0,0008254	L
Zr	nd	nd	-	-	-	-	L
PbO*	2,64	0,93	0,21	2,11	48	0,0000271	M
Total	100,00	100,00	25,41	-	-	-	-

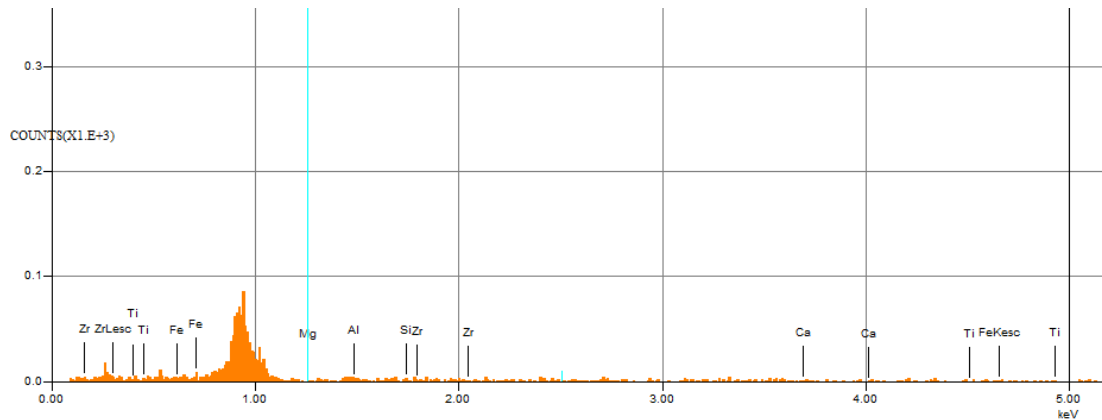


Gráfico 5. Elementos Seleccionados na EDS da AT para 0,1A.

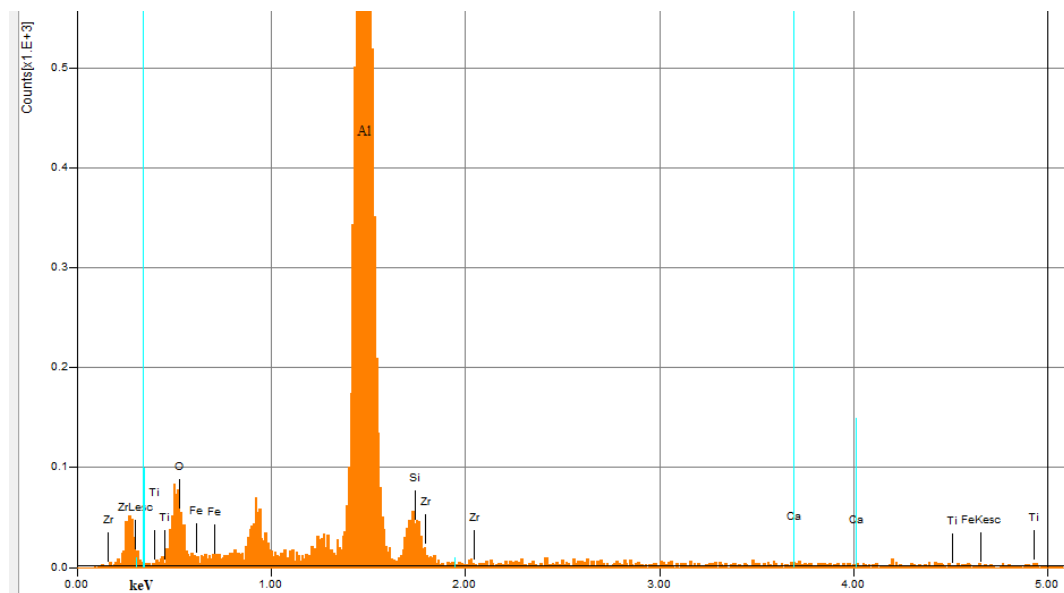


Gráfico 6. Elementos Seleccionados na EDS da AT para 0,3A.

Os ensaios da EDS dos gráficos 5 e 6 apresentam os seguintes elementos selecionados: Zr, Ti, Pb, Cr, Fe, Mg, Al, Si, Ca, O. A aparição de certos elementos indicadores de minerais pesados foi observada e indicam a presença de minerais como: ilmenita e rútilo com a presença de ferro (Fe), titânio (Ti) e oxigênio (O); zircão com a presença de zircônio (Zr) e silício (Si); perovskita com a presença de cálcio (Ca) e titânio (Ti).



## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

De acordo com os objectivos traçados no presente trabalho de licenciatura, concluiu-se que:

- a) A classificação granulométrica tem característica assimétrica positiva (possui concentração à esquerda) entre 0,18mm & 0,37mm, com o peneiro de 0,25mm a acumular maior quantidade de material (85,9%);
- b) Na separação gravítica, nota-se que quanto menor for o diâmetro dos grãos, mais difícil se torna a separação e mais perdas obtemos. Há maior quantidade de ganga com o aumento do tamanho dos grãos;
- c) Para a granulometria de 180µm, a amostra tratada apresenta maior recuperação nos 5 (cinco) valores de intensidade e existem diferenças significativas na susceptibilidade magnética entre a amostra aquecida e não aquecida. Parte do material é recuperado a uma intensidade menor quando a amostra é aquecida;
- d) Verifica-se um aumento da densidade das areias com o tratamento térmico em relação à sem o tratamento térmico e as amostras possuem densidades relativas médias ligeiramente superiores à do quartzo, o que sugere a presença de minerais pesados;
- e) Na microscopia óptica, nota-se que quanto menor for a granulometria, melhores são vistos os minerais e observou-se que os minerais que mais abundam são o quartzo, a ilmenite e o zircão;
- f) A observação do rútilo foi condicionada pelo uso da luz artificial (luz do próprio microscópio) e notou-se a presença, embora que pequena, da perovskita que é um mineral raro com larga aplicação em sistemas fotovoltaicos;
- g) As análises por MEV e EDS mostram a existência de minerais pesados, sendo os identificados a ilmenita, o rútilo, o zircão e a perovskita. A amostra tratada termicamente apresentou maior quantidade de minerais pesados em comparação com a amostra não tratada.

## 5.2 Recomendações

Para futuros trabalhos visando dar continuidade e melhoramento a este trabalho de licenciatura ou outros similares recomenda-se:

- Fazer a comparação das eficiências entre os métodos de concentração física por meio denso e por separação magnética;
- Realização dos ensaios de FRX;
- Fazer o estudo do impacto ambiental de uma possível exploração das areias pesadas de Macaneta.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abrão, A. (1994). *Química e Tecnologia das Terras-Raras*, CETEM/CNPq, Rio de Janeiro, 1994.
2. Alvarez, F. F., Boaventura, C. & Alves, E. (2013). *Medida de Densidade Aparente de Sólidos (Picnometria)*, UNIPAC, Uberlândia, Minas Gerais, 2013.
3. Alves, P.H., da Silva, T.P., Figueiredo, M.O., & Ramalhal, F.J.S. (2011). Contribuição para o conhecimento de formações lateríticas da Guiné-Bissau, LNEG.
4. Bertolino, L. C., Dos Santos, W. H. & Dos Santos, A. C. (2010). *Caracterização Mineralógica de Minérios*, CETEM, São Paulo, 2010.
5. Brod, J. A. (2003). *Propriedades Físicas dos Minerais*, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.
6. Corrêa, A. (2021). *Amostragem na Mineração: O que é, qual é sua importância e quais são os passos recomendados*, Belo-Horizonte, Brasil, Abril de 2021, disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/amostragem-na-mineracao-o-que-e-qual-e-sua-importancia>, acesso em 9 de Maio de 2022.
7. Cumbane, A. J. (2000). *An investigation of thermal treatment in the magnetic beneficiation of Chibuto beach sands*, Reino Unido, 2000.
8. Dawson et al. (1977). *The Marid (mica-amphibole-rutile-ilmenite-diopside) suite of xenoliths in kimberlite*, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, Vienna, 1997;
9. Da Luz, A. B., & Linis, F. A. (2010). *Introdução ao Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.
10. W. Denk & H. Horstmann. (2004). *Serial Block-Face Scanning Electron Microscopy to Reconstruct Three-Dimensional Tissue Nanostructure*, *PLoS Biol.*, vol. 2, n. 11, p. e329, Out. 2004.
11. Duarte, L. C., et al. (2003). *Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros*. *Pesquisas em Geociências*, 30(2), 3-15.
12. Egerton R. F. (2005). *Physical Principles of Electron Microscopy*, Boston, MA: Springer US, 2005.

13. Ferrer-Eres, M. A. et al. (2010). *Archaeopolymetallurgical study of materials from an Iberian culture site in Spain by scanning electron microscopy with X-ray microanalysis, chemometrics and image analysis*. *Microchemical Journal*, 95, 298-305.
14. Filho, V. N. (1999). *Técnicas Analíticas Nucleares*. Rio de Janeiro, 1999
15. Filho, L. (1995). *Influência do estado de agregação da polpa na flotação de quartzo, apatita e calcita*, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995;
16. Furmanski, L. M., Benedet, C. M. & Machado, M. (2015). *Produção de Sulfato Ferroso Mono Hidratado a Partir Carepa*, Universidade Extremo Sul Catarinense, Campinas, 2015;
17. Galvão, Raulim de Oliveira (2017). *Aplicação de um fatorial na recuperação da liga metálica (FeSiMn) de escória empregando-se a mesa oscilatória Wilfley*, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017;
18. Grüner, E. L. (1878). *Tratado de metalurgia - metalurgia geral*, Inspenção Geral de Minas, Paris.
19. Hannover, A. (2018). *Resource Sector Mozambique*. Maputo: Cooperação Alemã-BGR.
20. Heck, N. C (2007). *Metalurgia dos Metais Não-Ferrosos II*, UFRGS, Rio Grande do Sul, 2007
21. Hutton, A. T.; Connelly, N. G.; Hartshorn, R. M.; Damhus, T. (2017). *Nomenclatura de Química Inorgânica - Recomendações da IUPAC de 2005* (tradução da versão original em inglês produzida pela divisão de Nomenclatura Química e Representação de estruturas em colaboração com a Divisão de Química Inorgânica da IUPAC. Tradutores: Faria, R. B.; Serra, O. A.; Cardoso, J.; Costa, J. A. L.; Garcia, M. H.; Henriques, R. T.; Herold, B. J.; Magalhães, M. C. F.; Marçalo, J.; Pellegrino, O.); Sociedade Portuguesa de Química: Lisboa, 2017.
22. Hitchman S. P. et al. (1984). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, nº17, pp(39-55), Reino Unido ,1984.

23. Hitchman, A. P. (2018). *Australian Resource Reviews: Mineral Sands 2017*. Canberra: Geoscience Australia, 2018.
24. Inguane, N. E. (2019). *Processamento e Caracterização Mineralógica das Areias Pesadas de Morrumbala-Zambézia*, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, 2019.
25. Jalo, I. (2018). *Caracterização Mineralógica e Avaliação do Potencial Mineiro das Areias Pesadas do Depósito de Varela, Guiné-Bissau*, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2018.
26. J. I. Goldstein, D. E. Newbury, P. Echlin, D. C. Joy, C. E. Lyman, E. Lifshin, L. Sawyer, e J. R. Michael.(2003). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Boston, MA: Springer US, 2003.
27. Kaminsky, A.W., Etsell, T.H., Ivey, D.G & Omotoso, O. (2007). *Characterization of heavy minerals in the Athabasca oil sands*, Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Canada, 17 July 2007.
28. King, H. M. (2007). *Hazard City: Assignments in Applied Geology (stand-alone Version, 3<sup>rd</sup> edition*, California, 2007.
29. King, H. M. (2022). *Geology and Earth Science News and Information*, California, Março, 2013, Disponível em: <https://geology.com/minerals/>, Acesso em: 10 de Abril de 2022;
30. K. Jahn, D. Barton, e F. Braet, *Correlative Fluorescence- and Scanning, Transmission Electron Microscopy for Biomolecular Investigation*, Mod. Res. Educ. Top. Microsc., pp. 203– 211, 2007.
31. Klein, Cornelis & Dutrow, Barbara. (2012). *Manual de ciência dos minerais*, Porto Alegre : Bookman, 2012;
32. Laplante, A.R, Yianatos, J.B. & Finch, J.A. (1987). *Cleaning action in column flotation froths*, Institute of Mining and Metall., Section C : Mineral Process Extration Metal., Vol. 96, pp. C199-C205, 1987.
33. Mabilane, M. J. (2019). *Caracterização de minerais pesados de Nicoadala*, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, 2019;
34. Marinho, F. (2020). *Análise granulométrica do solo*, Brasil, 07 de Maio, 2020, Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/analise-granulometrica-solo/>, acesso em: 21 de Abril de 2022;

35. Mastelaro, V. R. (2007). *Caracterização de monocristais*, Instituto de Física e Química de São Carlos, São Paulo, 2007;
36. MELO Jr, A. S. (2007). *Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron. Tese (Doutoramento em Química)*, Unicamp, Campinas, São Paulo, 2007
37. Moreira, C., (2013). *Microscópio ótico*, Revista de Ciência Elementar, Porto, Volume 1, nº7, Fevereiro de 2012;
38. Navarro, G. R. B., Zanardo, A., Montibeller, C. C., da Conceição, F. T., de Morisson Valeriano, C., Leme, T. G., Simões, L. S. A. (2017). *Proveniência dos Metassedimentos do Grupo Araxá na Região de Rio Quente-Caldas Novas*, Instituto de Geociências, São Paulo, 2017;
39. Neumann, R., Shneider, C. L., & Neto, A. A. (2004). *Caracterização Tecnológica de Minérios*. in J. Sampaio, A. Da Luz, & D. A. Salvador, *Tratamento de Minérios* (4th ed.). Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004;
40. Ramakokovhu, M. M. et al (2020). *Mineralogical and Leaching Characteristics of Altered Ilmenite Beach Placer Sands*, Institute for NanoEngineering Research, Department of Chemical, Metallurgical and Materials Engineering, Tshwane University of Technology, Pretoria 0001, South Africa, 2020.
41. Rhuan, Duarte Carvalho (2015). *Caracterização e Aproveitamento de Minerais Pesados de Depósitos Litorâneos da Bahia*, Escola de Química-UFRJ, Rio de Janeiro: PIBIC/CETEM, 2015.
42. Rodbari, R. J. & Jamshidi, L. C. L. (2015). *Characterization of Ilmenite Using X-Ray Diffraction and Scanning Electron Microscopy*, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2015;
43. Sampaio, J. A., & Da Silva, F. A. (2001). Determinação das Densidades de Sólidos e Polpas. In *Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais*. CETEM/MTC, Brasília, 2001

44. Schnellrath, J.; Monte, M. B. M.; Veras, A.; Rangel Júnior, H. & Figueiredo, C. (2001.) *Minerais Pesados: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil* in Sampaio, J.A.; Luz, A.B.e Lins. s.l. : F.A.F. (Editores) CETEM, 2001
45. Schulz, Klaus J., et al. 2017. *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. Virginia : U.S. Geological Survey, 2017
46. Silva, L. N. (2017). *Sistema Para Fechamento de balanços de massas Complexos e Reconciliação de Dados*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.
- Skoog, D., Holler, J., & Nieman, T. (2002). *Princípios de análise instrumental* (5th ed.). Bookman.
47. Svoboda, J. et al. (2003). *Recent Developments in Magnetic Methods of Material Separation*. *Minerals Engineering*, 16, 785-792. [http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00212-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00212-7)
48. Tyler, R. M. & Minnitt, R. C. (2004). *A review of Sub-Saharan heavy minerals sand deposits: Implications for new projects in southern Africa*. s.l. : The Journal of The South Africa Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
49. Westcott, M. F. & Parry, L. G. (1968). *Magnetic properties of some beach sand ilmenite particles*, *Journal of Geophysical Research*, 15<sup>th</sup> February 1968.
50. Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Elsevier Science & Technology Books, Amsterdão, 2006