



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS PLÁCERES POR CONCENTRAÇÃO
GRAVÍTICA – UMA ABORTAGEM AO USO DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS**

Autora: Timóteo, Stela Rosalina Jacinto

Supervisor: Prof. Doutor António Cumbane, Eng^o

Maputo, Outubro de 2023



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS PLÁCERES POR CONCENTRAÇÃO
GRAVÍTICA – UMA ABORDAGEM AO USO DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS**

Autora: Timóteo, Stela Rosalina Jacinto

Supervisor: Prof. Doutor António Cumbane, Eng^o

Maputo, Outubro de 2023

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o(a) estudante finalista _____ entregou no dia ___/___/2023 as 4 cópias do relatório do seu trabalho de licenciatura com a referência _____ intitulado: **BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS PLÁCERES POR CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA – UMA ABORDAGEM AO USO DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS.**

Maputo, ___ de _____ de 2023

A Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Stela Rosalina Jacinto Timóteo, declaro por minha honra que o presente trabalho de Licenciatura é da minha autoria e fruto da minha pesquisa, e não foi submetido nesta e em outras instituições do ensino superior para obtenção de qualquer grau acadêmico. Todas as formulações e conceitos utilizados quer adotados literalmente ou a partir das suas ocorrências originais encontram-se devidamente citados e identificados.

(Stela Rosalina Jacinto Timóteo)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a duas pessoas muito importantes em minha vida, ao meu pai Jacinto Timóteo pelo apoio e amor incondicional e a minha finada mãe Ludovina Augusto Nhatuve pelo incentivo e por sempre ter acreditado no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecer a Deus pelo dom da vida, pela saúde e força ao longo deste percurso.

Ao meu pai, Jacinto Timóteo pelo incentivo e por estar sempre ao meu lado. Aos meus irmãos, Túlia, Célia, Felícia, Pedro e Rui pelo suporte e por sempre acreditarem no meu potencial. Ao Mauro da Graça pelo carinho, incentivo e apoio incondicional. A minha sobrinha Sara Francisca por ser minha luz em todos os momentos.

O meu profundo agradecimento vai ao meu supervisor Prof. Dr. António Cumbane pelo aprendizado, orientação e pela paciência que teve na realização deste trabalho.

A todos os meus professores pelos ensinamentos, acompanhamento e por sempre estarem disponíveis para qualquer dúvida.

Ao Instituto Nacional de Minas-INAMI por conceder-me a oportunidade de concretizar um passo importante na minha vida profissional e académica. Em especial ao Sr. André pelo apoio e ensinamentos sobre mineralogia, ao Sr. Gonçalves, a dra Irene, ao dr. Nguenha pelo apoio e monitoria durante a realização dos ensaios. Ao Sr. Leonel do laboratório de sedimentologia no departamento de geologia pelo acompanhamento durante a realização deste trabalho.

Ao melhor grupo de estudos de sempre, grupo Dream team, Jéssica, Daniela, Ébe, Francisco, Yunus, Chris, Alex e José, vai o meu profundo agradecimento, pelo apoio, amizade, carinho e por sempre estarem dispostos a ajudar.

A todos meus colegas, em especial ao Manuel Cândido, Raúl Raposo, João Magul, Herisson Mate, Ivan Nhacuahe, Felizarda Romão e Zenilda Uchavo.

A todos que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado!

RESUMO

A mineração em Moçambique desempenha um papel importante na economia do país, contribuindo para a geração de receita, emprego e desenvolvimento económico. No entanto, é crucial garantir que a actividade seja conduzida de maneira responsável, respeitando os aspectos ambientais e sociais, e que os benefícios sejam compartilhados de maneira equitativa com as comunidades locais. Para a mitigação dessa problemática, é fundamental adoptar práticas responsáveis e utilizar tecnologias mais limpas e seguras.

Este trabalho centra-se no beneficiamento de minérios pláceres, provenientes da província de Niassa utilizando a mesa Wilfley como ferramenta principal. O estudo avaliou a eficácia da mesa na separação de minerais de pláceres (minerais pesados com potencial uso na indústria de processamento) dos minerais de baixa densidade. A eficiência do processo foi por meio de análises nos concentrados e rejeitos produzidos, em função da variação de três parâmetros da mesa, nomeadamente: a granulometria ($-500 + 250$ e $-1000 + 500\mu m$); o ângulo de inclinação da mesa (2° e 6°) e o caudal de água ($0,126$ e $0,132 L/s$). Com os resultados da concentração fez-se um estudo comparativo em termos da recuperação do mineral de interesse e teve-se melhores recuperações nas duas faixas granulométricas para o ângulo de 6° e o caudal $0,126 L/s$. Em suma os resultados revelaram baixa recuperação metalúrgica para o ouro, em contrapartida resultados contrários (óptimos) observaram para os demais minerais pesados, como o caso do titânio que apresentou recuperações metalúrgicas altas em função da quantidade da amostra tratada.

Palavras-chave: minérios pláceres, caracterização, beneficiamento, taxa de recuperação.

ABSTRACT

Mining in Mozambique plays a significant role in the country's economy, contributing to revenue generation, employment, and economic development. However, it is crucial to ensure that this activity is conducted responsibly, respecting environmental and social aspects, and that the benefits are shared equitably with local communities. To address this issue, it is essential to adopt responsible practices and employ cleaner and safer technologies.

This work focuses on the beneficiation of placer ores from the Niassa province using the Wilfley table as the primary tool. The study assessed the table's effectiveness in separating gold (including other heavy minerals) from low-density minerals (gangue). The process efficiency was monitored through analyses of the produced concentrates and tailings, based on variations in three table parameters: particle size ($-500 + 250$ and $-1000 + 500\mu m$); table tilt angle (2° and 6°), and water flow rate (0.126 and $0.132 L/s$). Concentration results were compared in terms of the recovery of the target mineral, and higher recoveries were obtained in both particle size ranges at an angle of 6° and a flow rate of $0.126 L/s$. The research results indicated a need for improvement in the gold's mineralogical conditions, as metallurgical recovery levels were low compared to other metals of the same nature. This led to the conclusion that the gold's liberation degree was low, thereby affecting the recovery performance.

Keywords: placer ores, characterization, beneficiation, recovery rate

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	xii
1.1	INFORMAÇÃO CONTEXTUAL.....	xiv
1.2	OBJECTIVOS	xvi
1.2.1	Geral.....	xvi
1.2.2	Específicos	xvi
1.3	JUSTIFICATIVA.....	xvi
1.4	METODOLOGIA	xvii
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1	MINÉRIOS PLÁCERES	1
2.1.1	Usos e aplicações	1
2.1.2	Depósitos pláceres e sua ocorrência.....	1
2.2	BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS.....	4
2.2.1	Cominuição ou fragmentação.....	5
2.2.2	Peneiramento	5
2.2.3	Concentração dos minerais.....	6
2.2.4	Principais minerais obtidos na concentração de minérios pláceres.....	6
2.3	MINERALOGIA APLICADA AO BENEFICIAMENTO DE MINERIOS PLÁCERES.....	8
2.3.1	CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS	8
2.3.2	Caracterização macroscópica	9
2.3.3	Classificação granulométrica.....	10
2.3.4	Caracterização mineralógica	11
2.3.5	Microscopia óptica.....	14
2.4	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	14
2.5	MÉTODOS FÍSICOS DE CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS	15
2.5.1	CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA.....	15
2.5.2	SEPARAÇÃO MAGNÉTICA	25

2.5.3	FLOTAÇÃO	25
3	PARTE EXPERIMENTAL	27
3.1	MATERIAIS.....	27
3.2	MÉTODOS.....	27
3.2.1	Preparação da amostra	27
3.2.2	Caracterização granulométrica	28
3.2.3	Pesagem e análise química das fracções retidas.....	29
3.2.4	Configuração da mesa Wifley.....	29
3.2.5	Parâmetros óptimos e execução da mesa Wifley	30
3.2.6	Planeamento estatístico de ensaios para a determinação de parâmetros óptimos de operação	31
3.2.7	Concentração gravítica com mesa Wilfley.....	33
3.2.8	Secagem e pesagem dos produtos da separação	33
3.2.9	Análise química dos produtos da concentração	34
3.2.10	Separação magnética dos concentrados.....	34
3.2.11	Análise mineralógica dos produtos da concentração gravítica	35
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	36
4.1	Florescência de raios-X (XRF)	36
4.2	Caracterização granulométrica	38
4.3	Composição química das fracções retidas na classificação granulométrica.....	38
4.4	Produtos da concentração gravítica na mesa Wilfley.....	42
4.4.1	Recuperação mássica	45
4.4.2	Caracterização mineralógica dos concentrados	46
	Principais minerais constituintes dos concentrados.....	48
4.4.3	Visão geral do desempenho da mesa Wilfley como resposta ao uso de técnicas sustentáveis.....	48
5	CONCLUSÃO	51
6	RECOMENDAÇÕES	52

7	BIBLIOGRAFIA.....	53
7.1	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
7.2	REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos depósitos de minérios auríferos.....	2
Figura 2: Ilmenite ($FeTiO_3$) é um óxido natural de ferro e titânio; de magnetismo fraco; de cor preta com brilho submetálico à metálica.....	6
Figura 3: Magnetite ($Fe_2 + +Fe_2O_3 + +O_4$)	7
Figura 4: Zircão ($ZrSiO_4$).	7
Figura 5: Hematite ($\alpha - FeO_3$)	8
Figura 6: Esquema do processo de caracterização de minérios, adaptado	9
Figura 7: curva de frequência e curva de distribuição granulométrica cumulativa....	11
Figura 8: A esquerda tem-se o XRF de mesa; a direita tem-se o XRF portátil (Lab. de química - INAMI)	13
Figura 9: Modelo icônico de uma lupa binocular OPTIKA.....	14
Figura 10: Faixa operacional das operações unitárias na separação gravítica.....	16
Figura 11: Faixas de granulometria adequadas para recuperação eficiente em equipamentos de concentração gravítica	17
Figura 12: Efeitos da aceleração diferencial sobre as partículas na concentração gravítica.	17
Figura 13: Efeitos da sedimentação retardada sobre as partículas na concentração gravítica.	18
Figura 14: Efeito do mecanismo da velocidade diferencial em escoamento laminar.	18
Figura 15: Efeito da consolidação intersticial sobre as partículas.	19
Figura 16: Mesa oscilatória Wilfley (Lab. Geologia-Feng).	22
Figura 17: Tipos de mesas concentradoras	23
Figura 18: Desenho esquemático dos principais Jigues usados na concentração de minérios	24
Figura 19: Esquema ilustrativo de um hidrociclone	25
Figura 20: Células de flotação	26
Figura 21: Esquema de quarteamento.	28
Figura 22: Equipamento usado para classificação granulométrica (INAMI).	28
Figura 23: A esquerda temos a balança analítica SHIMADZU AUW220 (Lab. Geologia-Feng); A direita temos XRF-Portátil X-MET8000 (INAMI).....	29

Figura 24: Mesa Wilfley, (Lab. de geologia-Feng).....	29
Figura 25: Zona de alimentação antes do ajuste dos parâmetros de operação da mesa Wilfley.....	31
Figura 26: Zona de alimentação depois do ajuste dos parâmetros de operação na mesa Wilfley (Lab. Geologia-Feng).....	31
Figura 27: Perfil de separação pôs atingir o regime de separação gravítica na Mesa Wilfley.....	33
Figura 28: A esquerda, produtos obtidos na concentração com a mesa Wilfley; a direita estufa Yamato DVS602 (Lab. Geologia - FENG).	34
Figura 29: Iman de mao usada na experiêcia.	34
Figura 30: Lupa binocular OPTIKA ITALY usada na experiêcia.	35
Figura 31: Resultados do XRF de mesa da amostra inicial.	36
Figura 32: Resultados do XRF-portátil na amostra inicial.	37

Lista de Tabelas

Tabela 1: Significado do critério de concentração gravítica (CC)	19
Tabela 2: Variáveis e níveis usados no teste para separação gravítica usando mesa Wilfley.....	32
Tabela 3: Planeamento estatístico e parâmetros usados para ensaios na mesa Wilfley.....	32
Tabela 4: Teores dos concentrados.....	44

LISTA DE SIGLAS & SÍMBOLOS

ASTM	American Society for Testing and Materials
B.S.	British Standard
CC	Critério de Concentração
DRX	Difracção de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
I.M.M.	Institute of Mining and Metallurgy
INAMI	Instituto Nacional de Minas
MAPE	Mineração Artesanal e de Pequena Escala
OMS	Organização Mundial da Saúde
ppm	Partes por milhões
LCA	Life Cycle Assessment
Rmt (%)	Recuperação Metalúrgica Percentual
Rms (%)	Recuperação Mássica Percentual
S/L	Razão sólido/líquido
g	Aceleração de gravidade (m/s^2)
ρ_P	Densidade do mineral pesado (g/cm^3)
ρ_L	Densidade do mineral leve (g/cm^3)
v	Velocidade da partícula (m/s)

1 INTRODUÇÃO

Minérios pláceres tem constituído uma fonte importante de minerais valiosos ao longo da história, e a mineração desses depósitos continua sendo uma actividade econômica significativa em muitas partes do mundo. Esta classe de minérios são encontrados em locais específicos, geralmente associados a bacias hidrográficas onde a erosão, transporte e deposição ocorrem. A sua extração é frequentemente realizada por métodos de mineração plácer, que podem variar de garimpo manual a operações de grande escala que utilizam maquinaria pesada (Almeida, 1987).

Após a extração, o material passa por processos de beneficiamento para separar os minerais valiosos dos resíduos. O beneficiamento permite o uso mais eficiente dos recursos minerais, maximizando a recuperação dos minerais valiosos. O é essencial em depósitos pláceres, onde a concentração dos minerais valiosos é frequentemente baixa.

No entanto, as práticas tradicionais desta actividade de recuperação dos minerais valiosos podem ter impactos ambientais negativos, como a degradação do solo, a contaminação de corpos de água e a destruição de habitats naturais. Nesse contexto, a busca por técnicas sustentáveis de extração de ouro tem-se tornado uma prioridade. A concentração gravítica, como uma abordagem sustentável, tem-se destacado como uma alternativa viável e ecologicamente correcta para a recuperação de minerais pesados incluindo o ouro. Essa técnica se baseia na diferença de densidade entre os minerais presentes na amostra e utiliza a força da gravidade para separar as partículas valiosas da matriz mineral.

O presente trabalho surge na perspectiva de se investigar a eficiência e as características da concentração gravítica para o beneficiamento de minérios pláceres utilizando a Mesa Wifley. Serão abordados aspectos como a granulometria da amostra e composição da matriz mineral, pois, a compreensão desses factores é essencial para otimizar o processo de concentração e maximizar a recuperação do ouro. Ao compreender as limitações e os pontos críticos relacionados à concentração gravítica de ouro aluvionar usando mesa vibratória, será possível desenvolver estratégias eficientes para melhorar a recuperação do ouro e maximizar os resultados econômicos. Além disso, o estudo contribuirá para a compreensão mais aprofundada desse método de concentração e sua aplicabilidade na mineração de ouro aluvionar.

No decorrer deste trabalho, serão apresentados os princípios básicos da concentração gravítica, as características da Mesa Wifley como equipamento de concentração, os principais desafios enfrentados nesse processo e as abordagens e estratégias utilizadas para otimizar a recuperação dos minerais valiosos contidos na assembleia mineralógica. Por meio de análises e experimentos práticos, buscar-se-á contribuir para o avanço do conhecimento e das práticas na área de concentração gravítica de ouro aluvionar utilizando mesa vibratória.

Ao contrário de métodos tradicionais que envolvem o uso de produtos químicos, a concentração gravítica não utiliza substâncias tóxicas ou poluentes, reduzindo assim os riscos de contaminação ambiental. Além disso, essa técnica requer menos energia e água em comparação com métodos convencionais de extração de ouro, contribuindo para a preservação dos recursos naturais.

A aplicação da concentração gravítica como uma técnica sustentável para a extração de minerais de pláceres pode contribuir significativamente para a preservação do meio ambiente, reduzindo os impactos negativos associados à mineração. Espera-se que os resultados que advirão do presente trabalho possam incentivar a adoção de práticas mais responsáveis e sustentáveis na indústria da mineração, promovendo a conciliação entre a busca por recursos minerais e a preservação do meio ambiente.

1.1 INFORMAÇÃO CONTEXTUAL

Moçambique é rico em recursos minerais, e sua geologia abriga uma variedade de depósitos valiosos. Uma das principais formações geológicas são os depósitos pláceres. Depósitos pláceres ou depósito de minerais pláceres são formações geológicas onde minerais valiosos são encontrados concentrados, geralmente em leitos de rios, praias e áreas aluvionares. Os depósitos pláceres são uma importante fonte de minerais valiosos, e a mineração em tais depósitos é uma prática comum. Alguns exemplos de minerais frequentemente encontrados em depósitos pláceres incluem: o Ouro; Ilmenite; Rutilo; Zircão; Paládio; Estanho e Rutênio (Vicente, 2000). No nosso país um dos principais atractivos nestas formações geológicas tem sido a mineração de ouro. A mineração em Moçambique tem raízes históricas que remontam desde a época do comércio de ouro com o Império Mwenemutapa. No entanto, a mineração moderna começou a ganhar destaque nas últimas décadas, com um foco crescente na exploração de depósitos auríferos (Marrufo, Chilengue, & Silva, 2020).

Moçambique é conhecido por possuir depósitos de minérios pláceres em regiões tais como, Tete, Niassa, Manica, Sofala. A exploração desses minérios abrange tanto, operações formais e industriais assim como a mineração artesanal e de pequena escala (MAPE) que em termos gerais é a exploração de pequenos depósitos de ouro por indivíduos, pequenos grupos ou pequenas cooperativas, geralmente com nenhuma ou limitada mecanização e com baixos índices de recuperação. Como qualquer actividade extractiva, pode ter impactos sociais e ambientais significativos. A mineração artesanal, em particular, pode apresentar desafios relacionados à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como à gestão adequada dos recursos naturais (Bihale, 2016).

A MAPE representa uma fonte primária e adicional de renda, particularmente em regiões rurais onde as alternativas económicas à agricultura são limitadas. Estima-se que o sector de MAPE contribua com cerca de 25% da produção global de ouro no mundo (Marrufo, Chilengue, & Silva, 2020).

Os perigos para a saúde relacionados com a MAPE podem ser classificados em químicos (por exemplo, mercúrio, cianeto, arsénico, chumbo), biológicos (por exemplo, água), biomecânicos (por exemplo, traumas, esforço excessivo), físicos (por exemplo, ruído, baixos níveis de oxigénio) e perigos psicossociais (por exemplo, o

stress) (Bihale, 2016). Muitos países estão a tomar medidas activas para reduzir e, sempre que possível, eliminar o uso de mercúrio no processo de MAPE. No entanto, devido ao seu baixo custo, fácil uso e ampla disponibilidade, a amalgamação com mercúrio continua a ser o método preferido empregue na MAPE para extrair ouro. Consequentemente, o mercúrio é usado na MAPE em mais de 70 países, representando o maior sector de procura global de mercúrio, com aproximadamente 1.600 toneladas por ano. Estima-se também que a MAPE seja a maior fonte de emissões antrópicas de mercúrio no meio ambiente (Persaud & Telmer, 2015).

A MAPE é uma actividade comum em Moçambique, e muitas comunidades locais dependem dela para a subsistência. No entanto, essa prática trouxe consigo uma série de impactos sociais, ambientais e económicos, tanto positivos quanto negativos. Segundo Marrufo, Chilengue, & Silva (2020) o principal desafio na mineração artesanal é o uso de técnicas não sustentáveis que trazem consigo sérios impactos ambientais e sociais. Nomeadamente:

- **Impactos Ambientais:** A mineração artesanal muitas vezes ocorre sem o devido controlo ambiental, o que pode resultar em danos significativos ao meio ambiente, incluindo desmatamento, poluição da água e erosão do solo;
- **Riscos para a Saúde:** A exposição a produtos químicos tóxicos, como mercúrio, que é frequentemente usado para extrair ouro, pode ter efeitos adversos na saúde dos mineiros e das comunidades circundantes; O mercúrio é hoje reconhecido pela OMS como um dos dez produtos ou grupo de produtos químicos que colocam problemas específicos de saúde pública (OMS, 2017).
- **Impactos Sociais:** Além dos impactos ambientais, a mineração não sustentável também pode resultar em impactos sociais negativos, incluindo o deslocamento de comunidades locais, conflitos por terra e recursos e condições de trabalho precárias.

Para promover a mineração sustentável de minérios plácidos, é fundamental adoptar práticas responsáveis e utilizar tecnologias mais limpas e seguras. Isso inclui a implementação de técnicas de processamento mais eficientes, o gerenciamento adequado de resíduos tóxicos, a reabilitação de áreas mineradas e a consulta e envolvimento das comunidades locais.

1.2 OBJECTIVOS

1.2.1 Geral

- Realizar o beneficiamento de minérios pláceres e analisar a viabilidade ambiental do uso da técnica da concentração gravítica com mesa Wifley.

1.2.2 Específicos

- Caracterizar quimicamente a amostra principal e os produtos da concentração;
- Fazer a classificação granulométrica da amostra;
- Fazer a separação gravimétrica das diferentes fracções granulométricas;
- Determinar o conteúdo de minerais de valor económico.

1.3 JUSTIFICATIVA

A mineração desempenha um papel importante na economia de Moçambique, oferecendo oportunidades de emprego e contribuindo para o desenvolvimento do país. Moçambique é um país rico em recursos minerais, incluindo carvão, titânio, gás natural, ouro, pedras preciosas e outros minerais (Bihale, 2016). A indústria mineira tem atraído investidores estrangeiros e contribuído para o crescimento económico do país. No entanto, é fundamental que a actividade seja conduzida de forma responsável, com consideração aos impactos ambientais e sociais, visando a sustentabilidade a longo prazo.

Moçambique enfrenta desafios relacionados à prática desta actividade ilegalmente e aplicando técnicas de operação artesanal de beneficiamento utilizando a amalgamação que apresenta diversos desafios ambientais, de saúde pública e de eficiência na recuperação no que concerne a exploração de minérios desta natureza.

Este trabalho encontra uma justificativa à medida que pretende propor alternativas de exploração mais sustentáveis ao meio ambiente e eficientes para o processo de beneficiamento de minérios pláceres em nosso país. Fornecendo, informações tecnológicas e técnica de beneficiamento sustentáveis ao meio ambiente para a recuperação dos minerais valiosos contidos na assembleia mineralógica.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para a realização deste trabalho, está descrita nos pontos discriminados a seguir:

- Pesquisa bibliográfica e revisão de conteúdos relevantes ao tema em estudo;
- Ensaio laboratoriais para caracterização química das amostras;
- Planeamento estático de ensaios na mesa Wilfley;
- Apresentação e discussão dos resultados obtidos em laboratório;
- Apresentação das conclusões e recomendações para trabalhos futuros no tema em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MINÉRIOS PLÁCERES

Pláceres são acumulações sedimentares formadas pela concentração mecânica de minerais detríticos originados a partir da decomposição, transporte e sedimentação de rochas. São minérios que podem ter composição mineralógica muito diversa, e assim, conter diferentes minerais ou metais valiosos em função da sua alta densidade (entre 2,9 e 21g/cm³) superior à do quartzo (2,65 g/cm³) (Silva, 2001).

Segundo Emerye Noakes (1968), os pláceres são compostos por minerais pesados “pesados” (densidade entre 6,8 e 21 g/cm³), por minerais pesados “leves” (densidade entre 4,2 e 5,3g/cm³) e por gemas (densidade entre 2,9 e 4,1g/cm³). Os pesados “pesados” são transportados apenas por curtas distâncias e englobam principalmente o ouro, a platina e a cassiterita. Os pesados “leves” chegam mais comumente às zonas costeiras, concentrando-se em ambientes de deposição de alta energia. Eles compreendem principalmente a ilmenita, o rutilo, o zircão, a monazita, a magnetita. Entre as gemas destaca-se o diamante, que se concentra principalmente em aluviões, mas também em praias e na plataforma continental.

2.1.1 Usos e aplicações

Minerais de pláceres têm várias aplicações em diferentes sectores. Aplicações comuns dos minerais de pláceres são:

- Fonte de minerais pesados, como ilmenita, rutilo e zircão, usados na produção de ligas metálicas, cerâmica e abrasivos;
- A ilmenita, um mineral de plácer, é a principal fonte de titânio, que é usado em ligas metálicas, pigmentos brancos e produtos cerâmicos;
- Uma fonte de ouro. O ouro é amplamente utilizado na cunhagem, joalheira, eletrônica e como reserva de valor.

2.1.2 Depósitos pláceres e sua ocorrência

Os depósitos pláceres são uma classe de depósitos auríferos e encontram essa denominação em resposta ao modo de ocorrência e natureza dos minérios auríferos. Minérios auríferos são depósitos minerais que contêm ouro em concentrações economicamente viáveis de serem extraídos (Kautzmann, 1999).

Mandsen & House (1992) propõem classificar depósitos auríferos segundo suas características mineralógicas, focando no tipo de processamento mineral necessário, a recuperação do ouro, nomeadamente: *depósitos pláceres* (ouro livre em forma de partículas), tratados por processos gravimétricos; minérios que exigem cominuição para liberar o ouro, subdivididos de acordo com a mineralogia da matriz, ou seja com matrizes quartzosas, polimetálica rica em Prata, de sulfetos metálicos, carbonosa e de minerais de teluretos.

As diversas formas de ocorrência dos minérios auríferos acabam por direcionar as alternativas de processo para sua extração. Uma classificação feita por premissas quanto à resposta do minério aos processos de beneficiamento e extração hidrometalúrgica vem ilustrada no esquema a seguir (figura 1):



Figura 1: Classificação dos depósitos de minérios auríferos

(Costa & Nery, 2016).

2.1.2.1 Depósitos Pláceres

Depósitos pláceres, também conhecidos como depósitos de minerais pláceres, são formados pela concentração de minerais valiosos, com valor económico. São concentrados devido a processos naturais de erosão, transporte e sedimentação. Geralmente os minerais que se acumulam nessas formações são mais densos que os comuns e são conhecidos como *minerais pesados*, pois eles apresentam uma

densidade entre 2.9 g/cm^3 a 21 g/cm^3 . Esses depósitos ocorrem em ambientes de baixa energia hidráulica, como rios, praias e leitos de cursos de água, onde os minerais densos são depositados à medida que a água perde velocidade. Os minérios plácidos podem conter uma variedade de minerais valiosos, como ouro, diamantes, platina, estanho, titânio, ilmenita, zircão (Klein & Dutrow, 2012).

No entanto, segundo Emery e Noakes (1968) os minerais pesados podem ser divididos em três classes. Nomeadamente:

- Gemas: o principal minério encontrado neste tipo de depósitos é o diamante;
- Minerais pesados “leves”: ilmenita, rutilo, zircão, monazita e magnetita;
- Minerais pesados “pesados”: ouro, cassiterita e platina.

A exploração desses minérios geralmente envolvem técnicas de mineração aluvionar, onde os sedimentos que contêm os minerais valiosos são extraídos e processados.

2.1.2.2 Depósitos Free-Milling

Minérios de ouro “free-milling” são definidos como aqueles onde mais de 90% do ouro pode ser recuperado por lixiviação via cianetação convencional (Costa & Nery, 2016).

Os minérios típicos do tipo free-milling possuem partes de ouro não liberado, estando encapsulado em sulfetos ou associados a minerais de ganga como silicatos, o que requer processos de cominuição para que se possa atingir um nível de liberação adequado para a sua recuperação (Elomaa, 2020).

2.1.2.3 Depósitos Refractários

São comumente denominados de minérios com ouro “invisível” onde o ouro ocorre incluso em uma solução sólida ultrafina numa matriz de minerais de sulfetados. O termo refractário é definido pela mineralogia do minério baseada pela sua susceptibilidade de extração do ouro contido por cianetação directa (sem pré-tratamento) (Marsden & House, 2006 apud Elomaa, 2020).

Minérios refratários apresentam uma baixa recuperação de ouro com a utilização significativa de reagentes ou processos mais complexos de tratamento (como a ustulação) com impacto no custo do beneficiamento.

2.1.2.4 Depósitos Complexos

Os minérios complexos ocorrem associados a sulfetos, o que pode afectar a seleção do processo ou as condições operacionais. Esses minérios apresentam alto consumo de cianeto, podendo ocorrer na presença de material carbonoso que adsorve o Ouro dissolvido na cianetação, acarretando a queda na recuperação (Costa & Nery, 2016).

2.2 BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS

O beneficiamento mineral engloba o conjunto de operações que são realizadas no minério bruto a fim de obter um produto valioso (Totou, 2010 apud Pedrosa, 2019). Consiste em operações aos bem minerais visando a cominuição, classificação e a concentração dos minerais de interesse, sem ocasionar a alteração em seus parâmetros químicos ou físicos ao final minimizando perdas e custos (Luz & Linz, 2004 apud Pedrosa, 2019).

O beneficiamento de minérios pláceres pelo modo de ocorrência condiciona forçosamente o tipo de metodologias de tratamento. Os factores que influenciam na escolha do método de tratamento dessa classe mineralógica não são diferentes daqueles usados em outro tipo de minérios, a granulometria de ocorrência e a natureza dos minerais de ganga. Em geral a escolha respectiva é feita com base nas limitações técnicas-económicas e as características intrínsecas do minério (Almeida, 1987).

Gardner & Johnson apud Da Luz, Sampaio, & França (2010) listam as maiores considerações a se tomar em conta, na escolha do método de tratamento dos minerais pláceres, a saber:

- A densidade dos minerais de pláceres: ouro, que pode variar entre 15.5 a 19.3 g/cm^3 ; A ilmenita, um mineral de titânio e ferro, possui uma densidade aproximada de 4,72 g/cm^3 ; a densidade do zircão varia geralmente entre 4,6 a 4,7 g/cm^3 ; A densidade da magnetita é mais alta em comparação com a maioria dos minerais com 5,1 g/cm^3 . Enquanto os minerais de ganga raramente ultrapassam a densidade de 4 g/cm^3 (o quartzo com cerca de 2.7 g/cm^3 (anexo 2).
- Caracter hidrofóbico do ouro, que lhe confere uma excelente fluatuabilidade a qual, contudo, se limita às partículas de mais reduzidas dimensões pelo

elevada densidade do metal e, conseqüentemente, pela dificuldade de encontrar bolhas gasosas com suficiente capacidade de sustentação e persistência. Como também se associa frequentemente a sulfuretos e estes são facilmente flutuáveis, imediatamente se conclui que a flutuação é um processo indicado na obtenção de concentrados quando o ouro ocorre finamente disseminado. Apesar de ser mais nobre dos metais viu-se que o ouro (e grande parte das espécies auríferas) não é quimicamente inactivo e que, afinal, se combina com halogéneos, com o cianogénio e alguns outros radicais;

- Teor do minério e o valor do ouro face aos restantes minerais. Pois, teores muito baixos são impeditivos da aplicação de métodos muito dispendiosos.

2.2.1 Cominuição ou fragmentação

Há casos em que a liberação já existe naturalmente, por exemplo, nos materiais aluvionares de minerais leves e pesados. A grande maioria dos minérios, no entanto, ocorrem sob a forma de associações de minerais consolidados, sendo indispensáveis etapas de britagem e moagem do material, para liberação total do mineral valioso. O ouro se associa a uma série de minerais, e, para recuperá-lo, isto é, extraí-lo, é preciso que ele se apresente liberado ou parcialmente liberado desses minerais, para que qualquer processo físico ou químico de extracção seja eficiente (Veiga, 1992; Neumann et al., 2004). Assim, a operação de fragmentação, no campo de beneficiamento de minérios, agrupa um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir por acção mecânica, um sólido de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor. Esta operação, visa liberar os minerais valiosos dos minerais de ganga (Figueira et al., 2010).

2.2.2 Peneiramento

Nos circuitos de preparação de minérios plácemes são empregadas peneiras vibratórias convencionais, constituídas por um mecanismo accionador do movimento vibratório e um, dois ou três suportes para as telas ("deques") (Chaves & Peres, 1999 apud Peres et al., 2002). As peneiras são dispositivos simples e amplamente utilizados para classificar partículas sólidas de diferentes tamanhos. Elas consistem em uma tela com aberturas de tamanho específico. O material a ser classificado é passado através das peneiras, e as partículas maiores que não passam pelas aberturas são retidas (Peres et al., 2002).

2.2.3 Concentração dos minerais

A concentração dos minerais é um processo usado na mineração para separar minerais valiosos de minerais indesejados e outros materiais não desejados. Isso é feito com o objectivo de enriquecer o minério, tornando-o mais viável economicamente para processamento posterior. Existem várias técnicas de concentração de minerais, cada uma adequada a diferentes tipos de minerais e minérios. As técnicas mais comuns incluem: a concentração gravítica; separação magnética; flotação; cianetação. A escolha da técnica de concentração depende das características do minério, das metas de recuperação, das condições da operação e dos recursos disponíveis. Muitas vezes, várias técnicas são usadas em combinação para alcançar os melhores resultados de concentração.

2.2.4 Principais minerais obtidos na concentração de minérios pláceres

ILMENITE



Figura 2: Ilmenite ($FeTiO_3$) é um óxido natural de ferro e titânio; de magnetismo fraco; de cor preta com brilho submetálico à metálica (Cairncross, 2004).

- A Ilmenite, apresentada na figura 3, é uma das principais fontes de Titânio, um metal estratégico utilizado em diversas aplicações, incluindo na fabricação de ligas metálicas, pigmentos, revestimentos e componentes aeroespaciais;
- O óxido de titânio obtido a partir da ilmenite é um dos pigmentos brancos mais amplamente utilizados em tintas, plásticos, revestimentos e produtos químicos, devido à sua alta capacidade de opacidade e brilho;
- Usada na produção de elétrodos de soldagem, onde ajuda a melhorar a qualidade das juntas soldadas devido à sua alta resistência ao calor;

- O óxido de titânio da ilmenite é usado na produção de vidro, onde actua como um agente de branqueamento e ajuda a melhorar a qualidade óptica do vidro.

MAGNETITE

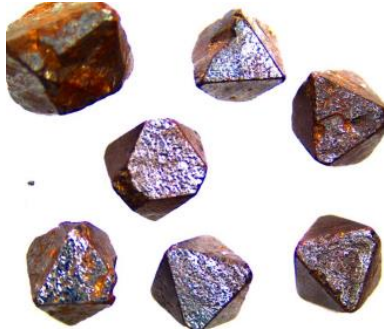


Figura 3: Magnetite ($Fe^{2+} + Fe_2^{3+} + O_4$) (Peixoto *et al.* 2016).

Com o auxílio da figura 4 encontra-se um óxido de ferro, altamente magnético e possui propriedades ferromagnéticas; é geralmente de cor preta a cinza-escura e tem um brilho metálico

- A Magnetite é uma importante fonte de minério de ferro, e a maior parte do ferro é utilizado na produção de aço;
- A Magnetite é utilizada em processos de tratamento de água e efluentes para remover partículas sólidas e iões metálicos;
- Devido à sua cor escura, a Magnetita também pode ser usada como um pigmento em tintas e revestimentos

ZIRCÃO

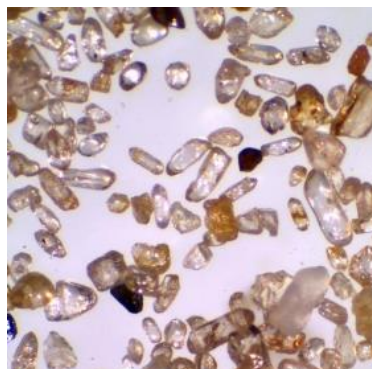


Figura 4: Zircão ($ZrSiO_4$).

Na figura 5 vem ilustrado o mineral Zircão, que é um óxido de zircônio produzido como produto de extração de minerais de titânio.

- Uma importante matéria-prima para a indústria de cerâmica como opacificante e composto de fritas para azulejos decorativos de paredes e pavimentos e artigos sanitários (Kenmare Resources plc, 2020)

HEMATITE



Figura 5: Hematite ($\alpha - FeO_3$) (Cairncross, 2004).

Um óxido de ferro, com densidade de específica de 5,26, com um brilho metálico à submetálico. É um mineral relativamente comum que pode ocorrer em forma de grãos finamente disseminados. O ferro da hematita é usado para o fabrico de aço e ligas de ferro (Cairncross, 2004).

2.3 MINERALOGIA APLICADA AO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS PLÁCERES

2.3.1 CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS

Os minérios apresentam algumas características que os tornam peculiares, como a composição mineralógica, distribuição aleatória de mineral-minério, a granulometria de interesse e a interação dos minerais com a ganga (Santos, 2018).

A caracterização de minério desempenha um papel fundamental no beneficiamento de minérios, pois, é a partir dela que obtém-se informações sobre a assembleia mineralógica e o seu comportamento frente aos processos de concentração mineral. Com isso, ela fornece informações fundamentais para o aproveitamento dos recursos minerais de forma otimizada, ou ainda, permite visualizar condições que otimizam

o processo (Sampaio, Oliveira, & Da Silva, 2009). A seguir (figura 7) encontram-se ilustradas as etapas referentes ao processo de caracterização mineralógica.

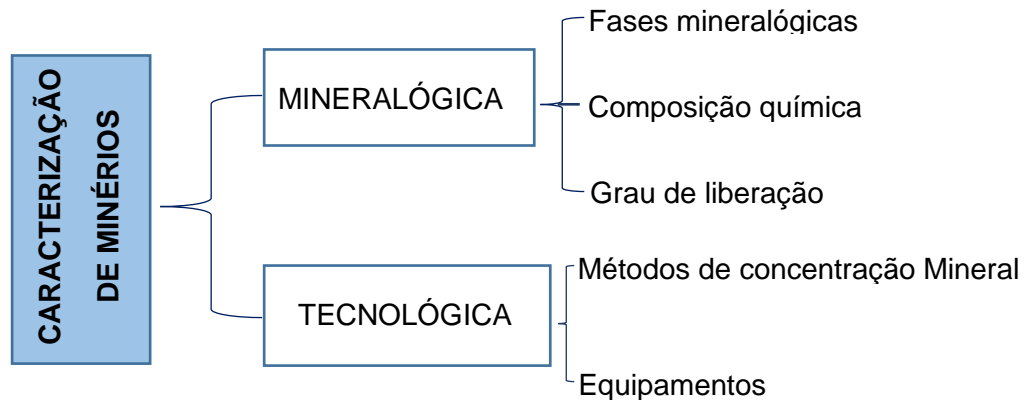


Figura 6: Esquema do processo de caracterização de minérios, adaptado (Santos, 2018).

Como vem ilustrado na figura 7, a caracterização de minérios engloba a caracterização tecnológica que é uma etapa determinante na escolha dos equipamentos para o processamento dos minérios segundo as características inerentes de cada minério.

2.3.2 Caracterização macroscópica

A caracterização física ou macroscópica dos minérios envolve a análise das propriedades físicas dos minerais e das amostras de minério para entender sua composição, tamanho de partícula, densidade, textura e outras características relevantes. Essa caracterização é de extrema importância, pois, auxilia na avaliação da viabilidade do processamento, o comportamento durante a separação e a concentração, além de influenciar a seleção de equipamentos e métodos de extração e beneficiamento (Santos, 2018).

2.3.2.1 Propriedades físicas dos minerais

As propriedades físicas dos minerais são uma consequência da composição química e da estrutura cristalina característica de cada mineral. Segundo Klein & Dutrow (2012) estas propriedades estão agrupadas de acordo com: aparência (forma cristalina); interação com a luz (brilho, cor, traço, luminescência); propriedades mecânicas (dureza, tenacidade, clivagem, fractura e partição); massa (peso

específico e densidade relativa) e outras propriedades como magnetismo, radioactividade.

2.3.2.2 Cor

A cor de um mineral é facilmente observada. Para alguns minerais ela é uma característica diagnóstica e serve como uma propriedade distintiva. Muitos minerais são reconhecidos com base apenas da sua cor. Em outros minerais, a cor é variável e não é confiável como uma propriedade diagnóstica, devido às impurezas que os mesmos possuem e as imperfeições estruturais que a estrutura cristalina apresenta. Por exemplo, a Hematita (Fe_2O_3), Quando pulverizada, tem cor vermelha de sangue mas em massa ou cristais apresenta uma cor cinzenta ou preta.

2.3.2.3 Propriedades eléctricas e magnéticas

Poucos minerais apresentam magnetismo. A força magnética nos minerais pode variar desde ser suficientemente forte para levantar barras de aço, ou apenas capaz de deflectir ou ainda estar ausente. Muitos minerais não experimentam atracção por campo magnético; esses minerais são chamados de *diamagnéticos*. Alguns minerais podem ser atraídos por um campo magnético enquanto o campo estiver presente; estes são conhecidos como *paramagnéticos*. E aqueles minerais que são mais magneticamente activos são chamados de ferromagnéticos (Klein & Dutrow, 2012).

2.3.3 Classificação granulométrica

Esta técnica é considerada padrão e obrigatória, pois é através dela que os demais estágios serão possíveis. É nesta etapa da caracterização de minérios que ocorre a britagem e moagem da amostra de forma a adequar as partículas para a realização dos testes subsequentes. Para o sucesso desta técnica usam-se as técnicas de peneiramento ou sedimentação para partículas muito finas. Peneiramento, trata da separação de uma mistura de materiais sólidos granulares de diversos tamanhos em duas ou mais fracções, cada uma delas mais uniformes em tamanhos que a mistura original. É uma operação mecânica que ocorre por separação através de uma superfície perfurada chamada peneiro ou crivo. O material retido na tela do peneiro é denominado oversize e o passante, undersize. As partículas retidas em cada peneira são removidas e pesadas. E as massas das partículas em cada peneira são

convertidas em fracções mássicas ou em percentagem da amostra total e em função do diâmetro das partículas constroem-se as curvas apresentadas na figura 8.

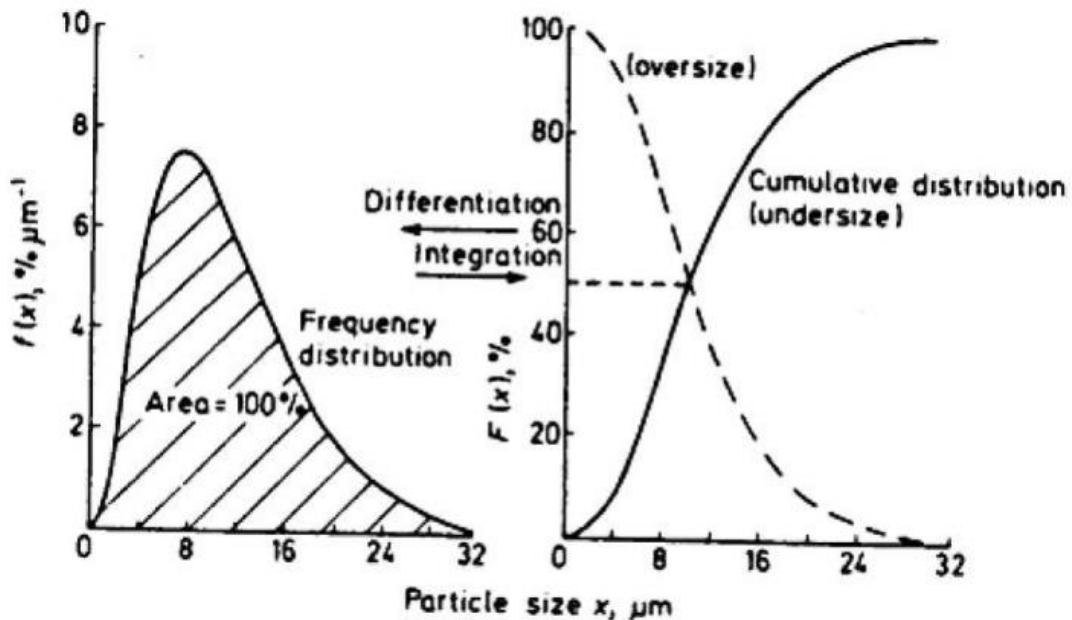


Figura 7: curva de frequência e curva de distribuição granulométrica cumulativa.

Este processo é conduzido por meio de peneiros, agitados manual ou mecanicamente (15 a 20 min) sem compressão. As peneiras são padronizadas, existindo as séries: B.S (British Standard); I.M.M. (Institute of Mining and Metallurgy) e a Série Tyler.

2.3.4 Caracterização mineralógica

A caracterização de minerais é baseada nas propriedades que o definem como mineral, ou seja, composição química, estrutura, e propriedades físicas decorrentes. Se a amostra já foi previamente processada por densidade e susceptibilidade magnética, já há alguns dados sobre propriedades físicas disponíveis. Para a caracterização, normalmente se trabalha em escala microscópica, apesar das observações em escala manoscópica (amostras de mão) serem muito úteis, permitindo a identificação de boa parte dos minerais mais importantes. Os métodos mais empregados para identificação dos minerais nesta escala são as microscopias ópticas (lupa, microscópio estereoscópico, microscópio petrográfico de luz transmitida e de luz refletida) e electrónica, e a difração de raios X (Da Luz, Sampaio, & França, 2010). O conhecimento das características principais dos minerais contidos em amostras representativas é feito sobre fragmentos de rochas, e/ou em amostras e produtos granulares representativos. Esse procedimento auxilia o engenheiro de

processo com informações que estejam relacionadas directamente ao desenvolvimento e optimização das técnicas de beneficiamento mineral para fins metalúrgicos.

Os minérios apresentam, em geral, características e peculiaridades próprias e, devido a isto, frequentemente, processos tecnológicos adequados para um dado minério, nem sempre poderão ser efectivos para um minério similar. Sabendo-se que em um determinado depósito podem ocorrer variações e alterações na,

- (i) Composição mineralógica devido a distribuição aleatória do mineral-minério no depósito;
- (ii) Na granulometria do mineral de interesse;
- (iii) Na sua relação dos minerais de ganga, e entre outros

Os resultados das investigações mineralógicas qualitativas e quantitativas juntamente com aquelas fornecidas pelas análises químicas devem ser suficientes para orientar o planeamento das sequências e/ou etapas adequadas ao beneficiamento.

A identificação dos minerais pode ser feita em alíquotas representativas, normalmente moídas em granulometrias abaixo de $1,68\text{mm}$. Para tamanhos de grãos entre $1,68\text{ mm}$ e $208\ \mu\text{m}$, os estudos podem ser feitos em lupa binocular. O material de granulometria entre $208\ \mu\text{m}$ e $37\ \mu\text{m}$ é geralmente examinado ao microscópio óptico polarizante. A fração inferior a $37\ \mu\text{m}$ pode ser examinada ao microscópio óptico com cuidados especiais, complementando-se com estudo de DRX e análises químicas (Da Luz, Sampaio, & França, 2010).

Espectrometria de fluorescência de Raio-X

É uma técnica de análise elementar através da indução e transições electrónicas entre os orbitais mais internos dos átomos utilizando radiações electromagnéticas de energia adequada (raio-X e raios gama). Essas transições podem resultar na emissão de radiações X de energia características que permitem a identificação da espécie atómica envolvida na transição e a sua quantificação. Esta técnica é capaz de realizar análises qualitativas e quantitativas, possui uma ampla capacidade de deteção, cobrindo um número considerável de elementos em concentrações que variam de alguns ppm a 100% (Dutra, 1984). Como este processo envolve níveis de energia que são característicos de cada elemento, a radiação emitida para cada transição é

também característica. Desta maneira, a energia da radiação emitida pode ser diretamente utilizada na identificação da espécie em questão. Por outro lado, como a intensidade da radiação emitida é diretamente proporcional à concentração da espécie, a técnica também fornece informações que podem ser utilizadas para fins quantitativos (Silva, 2013).

Segundo Dutra e Gomes (1984), a caracterização mineralógica qualitativa envolve a identificação dos minerais presentes em uma amostra, sem a necessidade de quantificar suas proporções. O foco está em determinar quais minerais estão presentes e em compreender suas características físicas e químicas. As técnicas qualitativas são usadas para responder perguntas como "Quais minerais compõem a amostra?" e "Quais são os tipos de ligações químicas presentes?". Enquanto a caracterização mineralógica quantitativa envolve a determinação das proporções relativas dos diferentes minerais presentes em uma amostra. Esse tipo de caracterização é especialmente importante em estudos de exploração mineral, geologia econômica e análise de teores em depósitos minerais. Ela responde perguntas como "Qual é a quantidade de cada mineral na amostra?" e "Qual é o teor de um elemento específico no mineral?".



Figura 8: A esquerda tem-se o XRF de mesa; a direita tem-se o XRF portátil
(Lab. de química - INAMI)

Observa-se na figura 9 ilustrações de dois equipamentos usados para XRF. Os

mesmos usados nesta estudo. A esquerda vem o XRF de mesa, modelo ZETIUM MINERALS e a direita o XRF portátil modelo X-MET8000 HITACHI.

2.3.5 Microscopia óptica

A microscopia óptica é uma técnica de análise mineralógica qualitativa. Esta técnica é usada na área mineralógica para observação de grãos de minerais, superfície de metais, e mais (Goldnstein, 2015). Existem diversos tipos de microscópios ópticos, variando em função do seu fim. Uma lupa estereoscópica é um tipo de microscópio utilizado para observação de amostras de grande relevo, como grãos, partículas ou superfícies de fractura. Ela é formada por dois sistemas ópticos diferentes (estereoscópios), razão pela qual também se chama de lupa binocular, dois tubos, duas objectivas (mais próximo dos olhos) e dois oculares (mais próximas do objecto), o que permite visualizar imagens tridimensionais de objectos em relevo e profundidade, ou seja, permite uma análise macroscópica de minerais em três dimensões, possibilitando sua identificação através da cor, brilho, clivagem e fratura (Gonçalves, 2015).

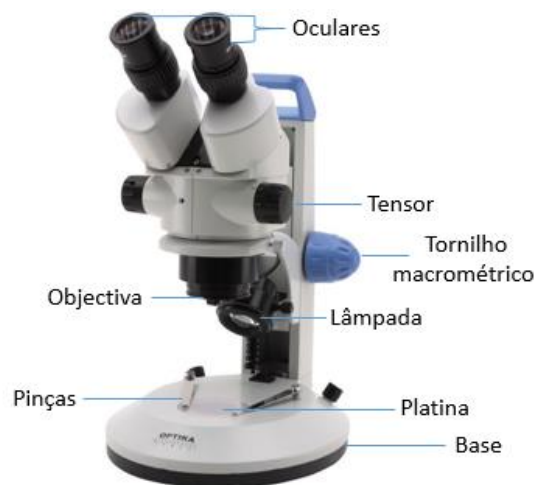


Figura 9: Modelo icônico de uma lupa binocular OPTIKA

([Lab. Mineralogia - INAMI](#)).

2.4 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

O presente estágio tecnológico consiste na execução e avaliação dos métodos de concentração do minério. Como os minérios não são iguais, os processos de concentração também não serão os mesmos e a avaliação de qual processo deve ser

utilizado resulta da caracterização mineralógica e química do minério (Neumann et al., 2010).

A escolha do processo de beneficiamento combina viabilidade tecnológica e económica, a qual é determinada por um conjunto de factores, os quais englobam o conhecimento da reserva, sua mineralogia e a riqueza do minério, até a avaliação dos aspectos de infraestruturas e mercado, passando pelos estudos de caracterização tecnológica (Santos, 2018).

Segundo Veiga e Porphírio (1982), caracterização tecnológica consiste na avaliação das propriedades de um minério com o objectivo de colher dados para estabelecer o fluxograma do processo. Para os minérios plácemes é importante o conhecimento de uma série de propriedades e características, entre elas:

- Riqueza dos minérios;
- Distribuição granulométrica e a forma das partículas de ouro ou mineral de ouro presente (ouro nativo, teluretos, ouro associado a sulfetos, ouro associado a silicato, etc.).

Informações sobre a composição e textura do minério são obtidos recorrendo-se a combinação de metodologias e análises instrumentais que possibilitam avaliações qualitativas e quantitativas (caracterização química e mineralógica).

2.5 MÉTODOS FÍSICOS DE CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS

As rotas de processamento podem se restringir a uma mera adequação granulométrica do minério às etapas hidrometalúrgica subsequentes ou envolver, além da preparação, estágios de concentração. Nesse último caso as propriedades diferenciadoras exploradas são a diferença de densidade e de hidrofobicidade (natural ou induzida) entre o ouro e os minerais a ele associados mais intimamente e os minerais de ganga. As operações de preparação devem preservar as partículas de ouro livre e o beneficiamento como um todo deve priorizar a recuperação do ouro contido no concentrado e a rejeição de impurezas como objetivos secundários.

2.5.1 CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA

A concentração gravítica é um processo que envolve a separação de partículas sólidas com base em suas densidades por acção da força de gravidade ou por forças centrífugas (Taggart, 1927). As partículas livres de ouro de tamanho maiores que

200 μm podem ser recuperadas eficientemente por métodos gravíticos. Quando o ouro está associado a sulfetos, o processamento usual inclui a cominuição do minério e subsequente liberação, seguida de uma etapa de flotação antes da cianetação. Com os minérios de natureza refratária, é comum o emprego de ustulação ou lixiviação à pressão ou bacteriana previamente à cianetação (Lins, 2000 apud Santos, 2018).

Os jazigos aluvionares são a classe de ocorrência em que a concentração gravítica constitui a principal metodologia de recuperação, podendo mesmo, em termos práticos, afirmar-se que é a única técnica de concentração utilizada (Da Luz, Sampaio, & França, 2010). Os aparelhos mais usados nesta técnica de separação são as jigas, as mesas vibratórias (ou oscilatórias) e os concentradores centrífugos. Nas figuras (2 e 3) vem ilustrado as faixas operacionais para cada tipo de equipamento na separação gravítica.

De forma genérica os equipamentos usados nesta técnica de concentração estão divididos em dois grupos, nomeadamente:

- 1) **Processos hidromecânicos:** que são aqueles realizados em meio húmido, geralmente a água, como por exemplo as mesas concentradoras;
- 2) **Processos pneumáticos:** são aqueles realizados em meio seco (ar) e são de menor utilização.

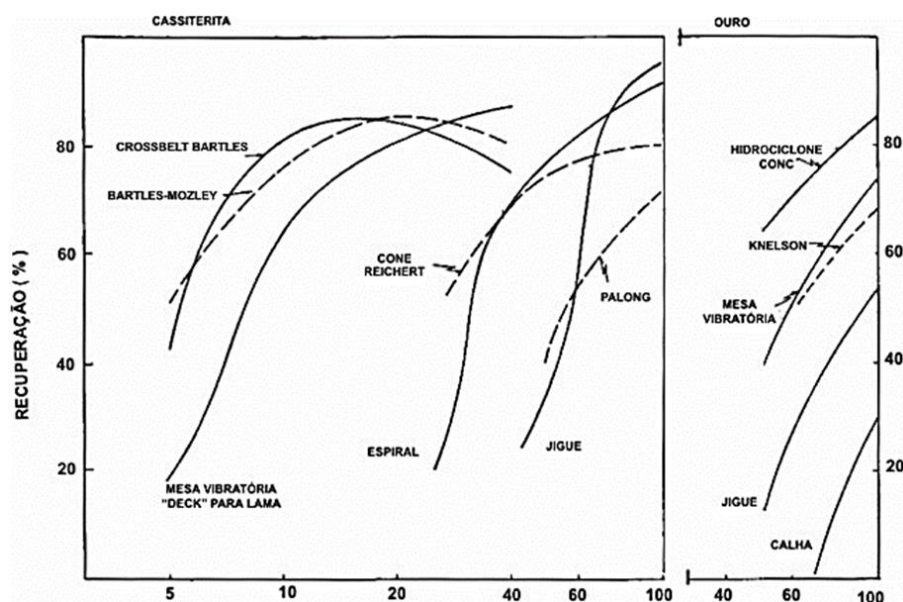


Figura 10: Faixa operacional das operações unitárias na separação gravítica (Da Luz, Sampaio, & França, 2010).

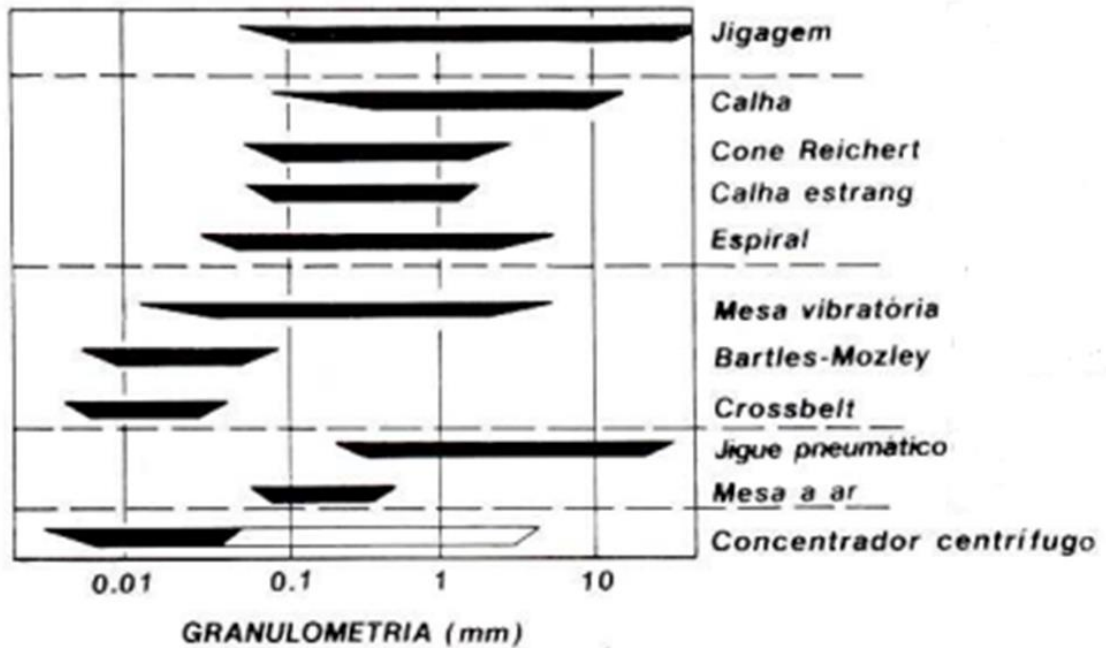


Figura 11: Faixas de granulometria adequadas para recuperação eficiente em equipamentos de concentração gravítica (Linz et al., 1992).

2.5.1.1 Mecanismos actuantes na separação gravítica

Segundo Carrisso & Chaves (2002), para a realização da concentração gravítica, existem múltiplos mecanismos que influenciam no processo de separação. São eles:

- i. **Aceleração diferencial:** diz que em um ambiente no qual as partículas estão em queda livre por uma duração bastante curta, a distância percorrida pela partícula é mais afectada pela sua densidade do que pelo seu tamanho, separando então as partículas pelas suas densidades.

$$m \frac{dv}{dt} = mg \left(\frac{\delta - \rho}{\delta} \right) - \frac{1}{2} Q A v^2 \rho \quad (1)$$

Considerando o instante em que a partícula é colocada no fluido a sua velocidade é zero, a equação 1 fica:

$$a_i = \frac{dv}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\delta} \right) \quad (2)$$

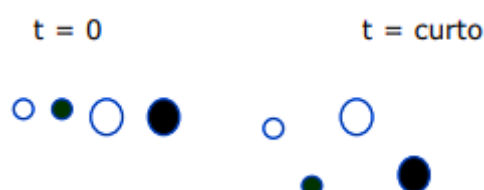


Figura 12: Efeitos da aceleração diferencial sobre as partículas na concentração gravítica.

- ii. **Sedimentação retardada:** Este mecanismo ocorre quando há formação de uma polpa (água + minério), permitindo que as partículas se sedimentam mais lentamente, provendo melhor divisão das partículas por tamanho.

Como resultado, as partículas maiores e as mais pesadas irão se depositar primeiro, com as menores e as mais leves acima delas.

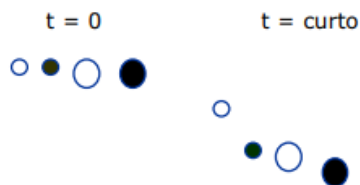


Figura 13: Efeitos da sedimentação retardada sobre as partículas na concentração gravítica.

- iii. **Velocidade diferencial em escoamento laminar:** o movimento de partículas dentro de um fluido em escoamento livre e laminar é afectado pela inclinação da superfície onde ocorre o movimento, pela espessura da camada do fluido, pelo coeficiente de atrito entre as partículas e a superfície de escoamento, pela densidade e forma das partículas e pela rugosidade da superfície. O princípio de escoamento laminar baseia-se no facto de que uma partícula de água flui sobre uma superfície inclinada e lisa.



Figura 14: Efeito do mecanismo da velocidade diferencial em escoamento laminar.

- iv. **Consolidação intersticial:** desde que partículas de diferentes tamanhos ou densidades não percorrem a mesma distância num período curto de tempo, elas irão se depositar num substracto em diferentes instantes. As partículas grossas, as se depositarem, deixam entre si espaços vazios (interstícios) que serão percorridos por partículas menores até que fiquem retidas nestes interstícios.

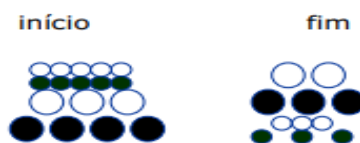


Figura 15: Efeito da consolidação intersticial sobre as partículas.

- v. **Acção de forças cisalhantes:** quando uma polpa concentrada está sujeita a esforços de cisalhamento, uma força de dispersão actua entre as partículas como resultado da colisão entre as partículas, gerando pressão no plano de cisalhamento e no plano perpendicular a ele.

Este fenômeno foi estudado primeiramente por Bagnold (1954) apud Carrisso & Chaves (2002).

2.5.1.2 Critério e eficiência de concentração gravítica

O critério de concentração (CC) é usado em uma primeira aproximação e fornece uma ideia da facilidade de se obter uma separação entre minerais através de processos gravíticos, desconsiderando o factor de forma das partículas minerais. O critério de concentração foi originalmente sugerido por Taggart, com base na experiência industrial aplicado à separação de dois minerais em água. É definido como segue (Da Luz, Sampaio, & França, 2010):

$$CC = (\rho_p - 1)/(\rho_L - 1)$$

Onde ρ_p é a densidade do mineral pesado e ρ_L é a densidade do mineral leve, considerando a densidade da água igual a 1,0. Os níveis e os seus respectivos significados vem apresentados a baixo (tabela 1), como segue:

Tabela 1: Significado do critério de concentração gravítica (CC)

(De Figueiredo & Chaves, 1998)

CC	Significado
> 2,5	Separação eficiente até $74\mu m$
2,5 – 1,75	Separação eficiente até $147\mu m$
1,75 – 1,50	Separação possível até $1,4 mm$, porém difícil
1,70 – 1,20	Separação possível até $6 mm$

O CC pode ser muito útil se a forma das partículas for considerada; caso contrário, surpresas desagradáveis quanto à eficiência do processo podem se verificar na prática. De qualquer modo, a tabela acima indica a dificuldade de se alcançar uma separação eficiente quando tratando frações abaixo de 200 malhas ($74 \mu\text{m}$) (Bart apud De Figueiredo & Chaves, 1998).

2.5.1.3 Equipamentos para separação gravítica

2.5.1.3.1 Mesa Oscilatória

Uma mesa oscilatória, também conhecida como mesa vibratória, é um dispositivo mecânico que utiliza vibração controlada para separar materiais com base em suas densidades. Ela consiste de uma superfície plana retangular, chamada de *deque*, que é coberta por estruturas chamadas *rifles*. A mesa possui uma inclinação que pode variar de 0 a 8° em relação à horizontal. Essa superfície é submetida a um movimento oscilatório paralelo aos rifles, enquanto a água de lavagem é distribuída por toda superfície. O material que será concentrado é alimentado na extremidade superior, próxima à alimentação da água, e se espalha sobre a mesa graças ao movimento oscilatório e à corrente de água. A água escoar perpendicularmente em relação aos rifles formando uma fina película que serve como um meio para diferenciar as densidades e assim separar as partículas. As partículas leves não submergem na corrente de água e por isso são mais suscetíveis à acção da mesma. Assim, elas vão para a extremidade da mesa e são descarregadas na superfície lisa da mesa. Já as partículas pesadas são descarregadas na secção oposta à das partículas leves uma vez que elas ficam submersas e não sofrem acção do escoamento da água. E dessa forma, obtém-se dois produtos, o material de maior densidade (concentrado) e o material de menor densidade (rejeito) (Costa & Nery, 2016).

Este tipo de equipamentos são amplamente empregues na indústria mineral para concentrar minerais pesados, como ouro e estanho a partir de minérios com uma certa faixa granulométrica. Existem vários tipos de mesas oscilatórias usadas em processos de separação gravítica na indústria mineral, baseadas nas características específicas de cada material e projectadas para atender a diferentes necessidades de separação e concentração de minerais. Seguem-se os principais tipos de mesas:

a) Mesa Wilfley

A principal característica da mesa Wilfley é o recobrimento parcial do deque com ressaltos chamados rifles, paralelos ao eixo longitudinal, o que permite o tratamento de espécies grossas e o aumento da capacidade de tratamento. O revestimento do deque pode ser linóleo, goma natural e sintética, uretano, metano impregnado de zircão ou fibra de vidro.

A inclinação da mesa Wilfley no sentido transversal ao eixo longitudinal pode ser controlada, variando entre 0° e 3° (manualmente até 6° ou 10°). O aumento da inclinação lateral reduz as necessidades de água de lavagem, porém estreita as faixas das diferentes fracções (concentrados, médios e rejeitos) dificultando-se o corte, o qual é aceitável para operações de desbaste e não em operações de limpeza (cleaner).

O limite superior em tamanho de partículas tratadas em mesa vibratória está entre 2 e 3mm (15mm para carvão).

A água de lavagem é adicionada na parte superior da mesa, através de uma calha perfurada. Na extremidade próxima ao mecanismo de vibração contem a caixa de alimentação.

É uma das variações da mesa oscilatória mais comum. Projectada para aplicações específicas de concentração de minerais, especialmente a recuperação de minerais. Ela tem uma inclinação lateral tampo plano inclinado e é geralmente usada para a concentração de minerais a partir de minérios moídos. A mesa de Wilfley tem um mecanismo de oscilação controlado por um motor e é frequentemente usada em operações de mineração. A mesa Wilfley é uma mesa vibratória com uma inclinação lateral que consiste de um deque de madeira revestido com material com alto coeficiente de fricção (borracha ou plástico), parcialmente coberto com material com ressaltos e sujeito a um movimento assimétrico na direcção dos ressaltos, por meio de um mecanismo que provoca um aumento da velocidade no sentido da descarga do concentrado e uma reversão súbita no sentido contrário, diminuindo suavemente a velocidade no final do curso (Lins, 1998 apud Costa, Nery, Ulsen, & Kahn, 2017). A seguir (figura 17) passo a apresentar a mesa oscilatória Wilfley e sua respectiva descrição.

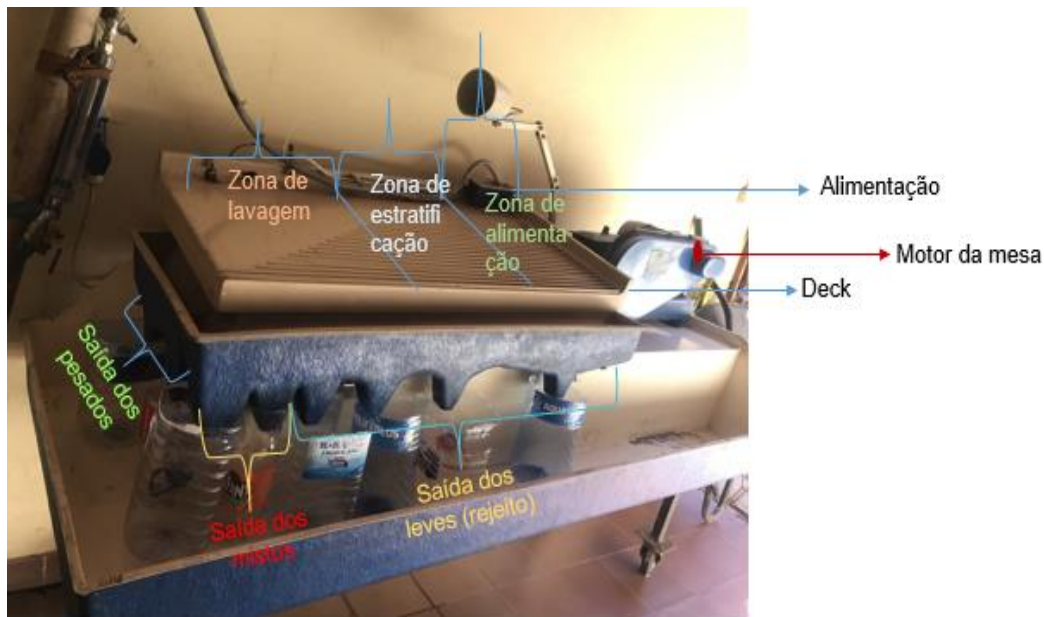


Figura 16: Mesa oscilatória Wilfley (Lab. Geologia-Feng).

b) Mesa Deister e Concenco:

As mesas Deister e Concenco são similares às mesas Wilfley em termos de aplicação e funcionamento. Elas são amplamente usadas na concentração de minerais pesados e podem ser configuradas para atender a diferentes requisitos de separação. As mesas Deister são conhecidas pela construção robusta e pela durabilidade.

c) Mesa Gemeni:

A mesa Gemeni é uma variante das mesas oscilatórias e é projetada para a recuperação de minerais valiosos, como ouro fino. Ela é caracterizada por ter duas placas oscilatórias independentes, o que permite um melhor controle da separação de minerais de diferentes densidades.

d) Mesa Holman:

As mesas Holman são usadas principalmente na concentração de minerais pesados e são conhecidas por sua eficácia na separação de minerais como estanho, tungstênio e minerais de terras raras.

e) Mesa Bartles-Mozley ou Holman de lamas:

Esta é uma mesa oscilatória de alta intensidade que é usada em aplicações especiais que envolvem minerais finos ou difíceis de separar. Ela utiliza uma ação oscilatória de alta frequência para separação.

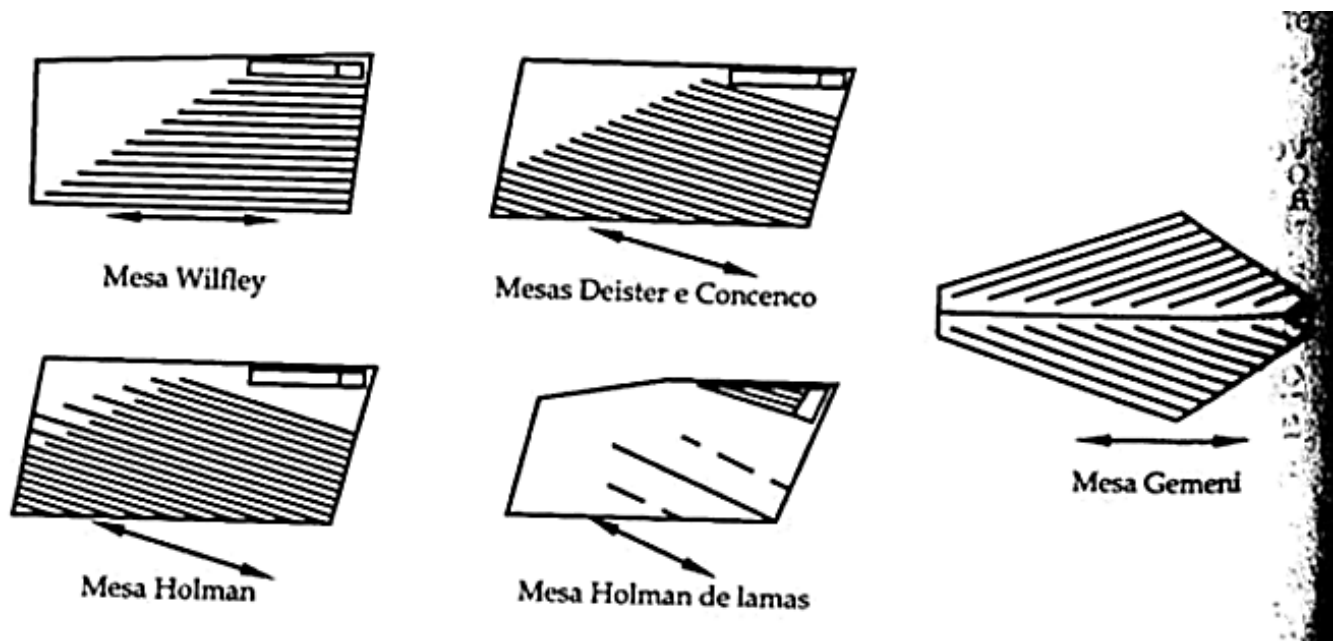


Figura 17: Tipos de mesas concentradoras (*Almeida, 1987 apud Hoffmann*).

Esses são apenas alguns exemplos dos tipos de mesas oscilatórias usadas na indústria mineral. A escolha do tipo de mesa depende das características do minério a ser processado, das necessidades de separação e das condições operacionais específicas de uma instalação de mineração ou processamento mineral. Cada tipo de mesa tem suas vantagens e limitações, e a seleção adequada é fundamental para a eficiência do processo de separação.

2.5.1.3.2 Jigagem

A jigagem é um processo de concentração gravítica que envolve a separação de minerais com base em suas densidades. A jigagem utiliza um equipamento chamado jig que é uma caixa retangular com uma peneira na parte superior e um fundo perfurado. No processo usando Jigue, a separação dos minerais de densidades diferentes é realizada em um leito dilatado por uma corrente pulsante de água, produzindo a estratificação dos minerais (Lins, 1998 apud Almeida, 1987).

Ela é particularmente útil quando se deseja uma recuperação eficiente de minerais densos e quando se trabalha com minérios de granulometria grossa. A jigagem é amplamente usada na mineração de aluvião, onde os minerais são extraídos de depósitos aluviais, e também em operações de mineração subterrânea e de superfície.

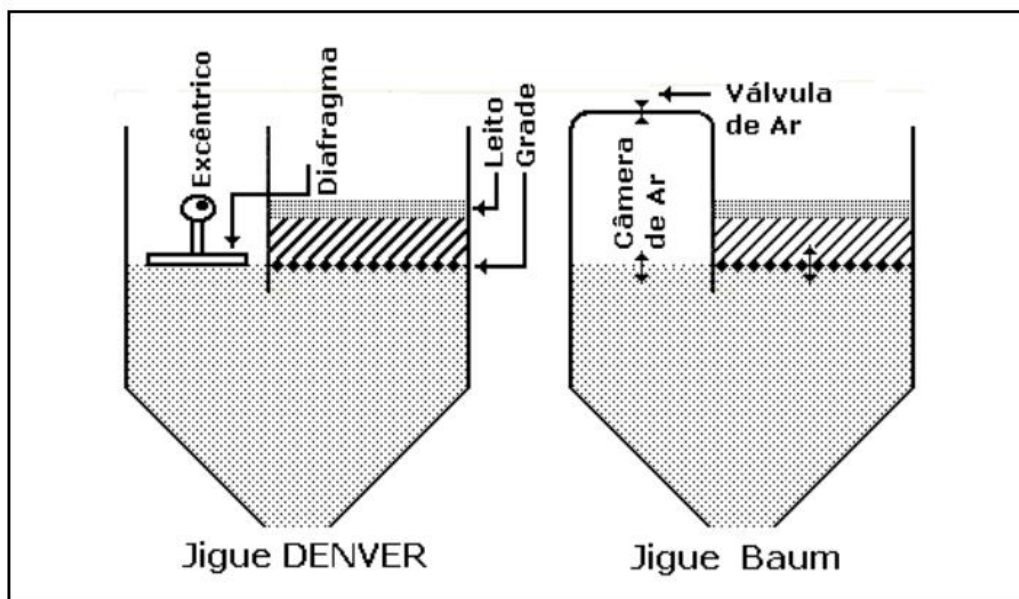
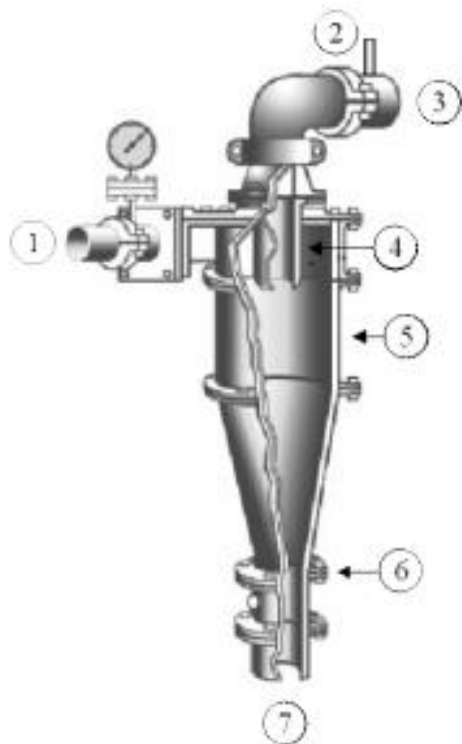


Figura 18: Desenho esquemático dos principais Jigues usados na concentração de minérios (Da Luz, Sampaio, & França, 2010)

2.5.1.3.3 Hidrociclone

O hidrociclone é um equipamento projectado para separação sólido-líquido. É projectado para minimizar o efeito de classificação e maximizar a influência da densidade das partículas. Quando comparado com o ciclone classificador, apresenta maior diâmetro e comprimento do vórtex finder e com ângulo do ápex bem superior. Quando a polpa é alimentada tangencialmente, sob pressão, um vórtex é gerado em torno do eixo longitudinal. A força centrífuga, inversamente proporcional ao raio, é bastante grande perto do vórtex e causa a estratificação radial das partículas de diferentes densidades e tamanhos (por aceleração diferencial). As partículas pesadas, sendo mais sujeitas a uma acção da força centrífuga, dirigem-se para a parte superior da parede cônica, com a formação de um leito por sedimentação retardada, no qual as partículas leves e grossas situam-se mais para o centro do cone e as finas, por consolidação intersticial, preenchem os espaços entre os minerais pesados e grossos. As partículas grossas e leves, primeiro, e as mistas ou de densidade intermediária, depois, são arrastadas para o overflow pelo fluxo aquoso ascendente, enquanto o leito estratificado se aproxima do ápex. Próximo ao ápex, as partículas finas e leves são também carregadas para o overflow pela corrente ascendente e as pesadas, finas e grossas, são descarregadas no ápex.



- 1- Injetor (alimentação);
- 2- Suspiro;
- 3- Overflow;
- 4- Vortex finder;
- 5- Secção cónica;
- 6- Ápex;
- 7- Underflow.

Figura 19: Esquema ilustrativo de um hidrociclone (*Sampaio, Oliveira, & Da Silva, 2009*).

2.5.2 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Poucos minerais apresentam magnetismo, mas para os que apresentam, o magnetismo pode ser uma propriedade diagnosticável. A força nos minerais pode variar desde a ser suficientemente forte para levantar barras de aço, ou apenas ser capaz de defletir a agulha de uma bússola, ou, ainda, simplesmente estar ausente. Muitos minerais não apresentam atracção por campo magnético, esses minerais são referidos como diamagnéticos. Alguns minerais podem ser atraídos por um campo magnético enquanto o campo estiver presente, estes são conhecidos como paramagnéticos.

2.5.3 FLOTAÇÃO

As unidades de flotação são usadas para a concentração de minerais não ferrosos, como sulfetos de metais. Elas exploram a capacidade dos minerais de se ligarem a bolhas de ar e flutuarem na superfície da polpa. A flotação é um método de separação entre partículas sólidas que explora diferenças superficiais baseadas no facto das mesmas poderem apresentar caracter polar (hidrofilicidade) ou apolar (hidrofobicidade). Segundo o princípio de afinidade entre espécies ambas polares ou ambas apolares, em uma máquina de flotação as entidades hidrofílicas seguem o

fluxo de água e as hidrofóbicas aderem às bolhas de ar. Superfícies de ouro puras e limpas são naturalmente hidrofílicas. Entretanto, menos de uma monocamada de contaminante carbonáceo, depositado a partir do ar ou da solução é suficiente para tornar a superfície hidrofóbica (Marsden & House, 1992 apud da Luz, Sampaio, & França, 2010).

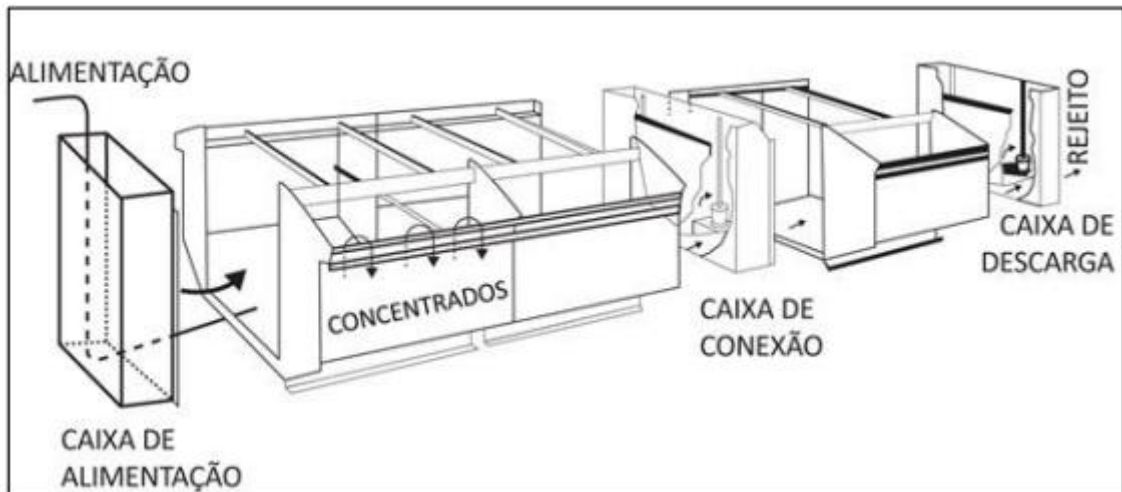


Figura 20: Células de flotação (Da Luz, Sampaio, & França, 2010).

3 PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo, descrevem-se os materiais e métodos usados para a realização do presente trabalho. A parte experimental foi realizada no Instituto Nacional de Minas (INAMI) e no Laboratório de geologia da FE-UEM e envolveu as seguintes etapas principais:

- Preparação da amostra
- Análise mineralógica quantitativa por Fluorescência de Raios X (XRF) das fracções obtidas após a caracterização granulométrica;
- Concentração dos minerais usando a mesa Wifley, o que incluiu a pesagem, separação magnética e separação com a lupa binocular dos concentrados obtidos;

3.1 MATERIAIS

Foi estudada uma amostra de minérios pláceres do tipo sedimentos de corrente proveniente da província de Niassa, no norte de Moçambique. Esta amostra foi seleccionada segundo características mineralógicas do depósito e tendo em vista o objectivo do estudo pelo laboratório de tecnologia mineira do INAMI.

A amostra consistia de um sedimento de corrente, amostra sedimentar colhida ao longo do curso de um rio (amostra aluvionar do tipo plácer).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparação da amostra

A amostra inicial de 20kg foi inicialmente submetida a uma etapa de secagem à temperatura ambiente e posteriormente enviada para a etapa de caracterização química para averiguação preliminar do possível comportamento da assembleia mineralógica tendo como base a composição química da amostra. De seguida, procedeu-se a classificação granulométrica usando uma série de peneiros de 2 a 0.063 mm da amostra inicial dividida em 10 alíquotas por forma a viabilizar o processo de classificação granulométrica. Finda a etapa de classificação granulométrica, procedeu-se à pesagem e análise química por FRX de cada fracção de retidos, para a averiguação da fracção com maior ocorrência dos minerais de interesse. Feita análise química de cada fracção de retidos, as fracções com ocorrência do mineral valioso serviram como base para o presente estudo. Para

devidos efeitos, as amostras foram submetidas ao processo de quarteamento, onde, combinou-se dois quartos opostos e descartou-se os dois restantes. Supondo que o tamanho das partículas é constante ou quase constante, a massa foi reduzida á metade. O processo é repetido varias vezes até que a massa original se reduza até a quantidade mínima necessária para o estudo.

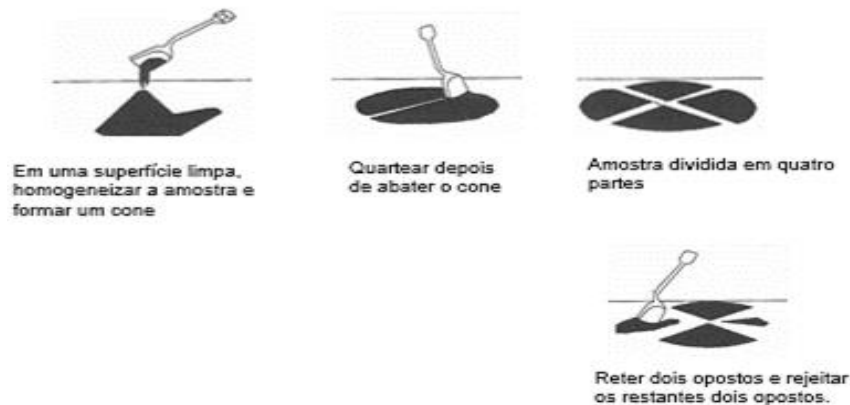


Figura 21: Esquema de quarteamento.

3.2.2 Caracterização granulométrica

Após a preparação da amostra de minerais de pláceres, secagem, pesagem e divisão em 10 lotes da amostra inicial, devido a quantidade da amostra primária ser grande. Enviou-se a amostra para a classificação granulométrica usando uma série de crivos ASTM com aberturas variando de 2000 μm a 63 μm (Tyler) com o auxílio do agitador de crivos TAMNISON VS 1000 por 20 minutos, por lote, a uma frequência de vibração de 60 *Hz*.



Figura 22: Equipamento usado para classificação granulométrica (INAMI).

3.2.3 Pesagem e análise química das fracções retidas

Após a caracterização granulométrica da amostra principal, procedeu-se a pesagem e a análise química das fracções retidas através de um equipamento de XRF portátil X-MET8000. Esta etapa foi determinante na escolha da fracção com maior ocorrência de minerais valiosos, incluindo o ouro, respeitando os critérios ilustrados na figura 6-7 para a escolha da técnica de concentração gravítica.



Figura 23: A esquerda temos a balança analítica SHIMADZU AUV220 (Lab. Geologia-Feng); A direita temos XRF-Portátil X-MET8000 (INAMI).

3.2.4 Configuração da mesa Wifley

Como vem ilustrado na figura 25, a configuração da mesa Wifley consistiu na montagem do sistema para o suprimento de água (mangueiras) à mesa; colocação de recipientes de colecta dos concentrados, os mistos e os leves (rejeitos) nas 8 (oito) saídas da mesa; montagem de um sistema para colecta de águas residuais. Por fim, a higienização do deque, alimentação e dos recipientes de colecta dos concentrados e rejeitos.



Figura 24: Mesa Wifley, (Lab. de geologia-Feng).

3.2.5 Parâmetros óptimos e execução da mesa Wifley

Esta etapa consistiu no ajuste dos parâmetros óptimos da mesa. Sendo esta uma técnica de processamento empírica e que em alguns casos a prática constitui uma vantagem na sua operação, existem procedimentos práticos de operação que auxiliam nos testes com mesa Wifley.

- *Alimentação*: a alimentação ideal seria aquela em que há formação de uma monocamada na superfície da mesa. A otimização da taxa (kg/h) de alimentação é realizada durante o teste e depende, entre outros factores, da habilidade e experiência do operador.
- *Sólido/líquido*: a S/L da polpa deve permanecer constante, e a água de lavagem deve favorecer a formação de uma lâmina de água sem turbulência sobre a superfície da mesa.
- *Amplitude e a velocidade de pulsação ou frequência*: são variáveis interdependentes. Quando se alimenta minério com granulometria grossa, exige-se maior amplitude na pulsação com menor velocidade; a situação oposta é utilizada para minérios com granulometria fina. Quando há pouca diferença de densidade, entre os minerais pesados e leves, em torno de 1 ou menos, recomenda-se a operação com menor amplitude. Os equipamentos mais avançados permitem a operação com maior velocidade, resultando em maior mobilidade das partículas sobre a mesa, maior capacidade (kg/h) e aumento da eficiência da separação.
- *Inclinação do deque*: a inclinação do deque deve ser ajustada pelo operador, de modo a obter boa distribuição do minério sobre a mesa. Entretanto, o seu aumento excessivo provoca maior descarga de minério na área de colecta do rejeito, bem como baixa a eficiência do processo. Somente os ensaios práticos e a habilidade do operador são capazes de determinar a inclinação óptima da mesa. No entanto, cada situação possui suas singularidades.

Para avaliar a influência dos parâmetros de funcionamento da mesa se conduziu uma série de experimentos para a determinação dos parâmetros óptimos de operação da mesa onde se variou o ângulo de inclinação do deque, a granulometria do material a alimentar, e os caudais de água de lavagem. Para isso, elaborou-se um estático de ensaios nos níveis superior e inferior das variáveis de operação



Figura 25: Zona de alimentação antes do ajuste dos parâmetros de operação da mesa Wilfley (Lab. Geologia-Feng).

É possível observar pela figura 26, a influência que os parâmetros operacionais tem sobre as partículas. A quantidade de material arrastada para a zona de colecta de rejeito é maior, podendo haver fuga de materiais valiosos.



Figura 26: Zona de alimentação depois do ajuste dos parâmetros de operação na mesa Wilfley (Lab. Geologia-Feng)

Em contrapartida, neste caso o processo é conduzido de tal forma que após a alimentação da mesa, o material forma estratificados para a separação das partículas de acordo com as suas densidades relativas. Permitindo deste modo que a concentração seja conduzida de forma a fornecer resultados com um alto grau de eficiência.

3.2.6 Planeamento estatístico de ensaios para a determinação de parâmetros óptimos de operação

Nesta etapa, com o auxílio de uma das técnicas de planeamento estatístico de ensaios estudadas, analisou-se a influências de três (3) parâmetros fundamentais da mesa: a granulometria, inclinação do deque e o caudal de fornecimento de água. Para este efeito foi observado a variação do teor do concentrado e das recuperações mássica e metalúrgica. Para avaliar quantitativamente os teores do produto da

concentração gravítica com mesa Wilfley empregou-se a técnica de fluorescência de raios X (FRX).

Para os ensaios deste estudo foi utilizado um planeamento factorial 2^k , planeamento estatístico com dois níveis (máximo e mínimo) com k factores em estudo. Foram estudadas as seguintes variáveis de operação: o ângulo de inclinação do deque (2° e 6°), a granulometria do material ($-1000 + 500\mu m$ e $-500 + 250\mu m$) e o caudal de água ($0,126$ e $0,132 L/s$). Outros parâmetros, como a amplitude do deque, a frequência de oscilação e a vazão mássica dos sólidos de foram mantidas constantes.

Foi empregue o FRX para analisar, de forma quantitativa, a composição das amostras de alimentação da mesa Wilfley e das faixas concentradas do produto de cada ensaio.

A seguir, nas tabelas 2 e 3, temos os parâmetros avaliados para optimização do processo de separação gravítica usando mesa Wilfley e o planeamento de ensaios.

Tabela 2: Variáveis e níveis usados no teste para separação gravítica usando mesa Wilfley.

Factores	Designação	Nível superior (+1)	Nível inferior (-1)
Granulometria (μm)	X_1	$-1000 + 500$	$-500 + 250$
Ângulo de inclinação ($^\circ$)	X_2	6	2
Caudal (L/s)	X_3	0,132	0,126

Tabela 3: Planeamento estatístico e parâmetros usados para ensaios na mesa Wilfley.

Ensaio	Variáveis Codificadas			Variáveis Reais		
	X_1	X_2	X_3	Granulometria (mm)	Angulo ($^\circ$)	Caudal (L/s)
1	-	-	-	$-0.5 + 0.250$	2	0,126
2	+	-	-	$-1 + 0.5$	2	0,126
3	-	+	-	$-0.5 + 0.250$	6	0,126
4	+	+	-	$-1 + 0.5$	6	0,126
5	-	-	+	$-0.5 + 0.250$	2	0,132
6	+	-	+	$-1 + 0.5$	2	0,132
7	-	+	+	$-0.5 + 0.250$	6	0,132
8	+	+	+	$-1 + 0.5$	6	0,132

3.2.7 Concentração gravítica com mesa Wilfley

Os ensaios na mesa oscilatória foram realizados em duplicata, para garantir a reprodutibilidade dos ensaios. Foi utilizada cerca de 100g de amostra em cada ensaio. A tabela 3 apresenta as configurações usadas na mesa em cada ensaio. A amostra de minerais de pláceres seca, foi descarregada na mesa de forma manual. Com o auxílio de um recipiente de vidro, colectou-se os produtos da mesa Wilfley, denominadas concentrado (porção com maior concentração dos pesados) e de leve (rejeito).

Conforme a separação ia ocorrendo na mesa Wilfley, recolheram-se os produtos da concentração de forma separada em recipientes plásticos e depois depositados em recipientes de vidro para a secagem. Os resultados obtidos no processo de concentração e posteriormente secas a 60°C na estufa Yamato DVS602 passam para análise percentual de recuperação mássica e metalúrgica.



Figura 27: Perfil de separação pôs atingir o regime de separação gravítica na Mesa Wilfley (Lab. Geologia-Feng).

3.2.8 Secagem e pesagem dos produtos da separação

As saídas da mesa (dos concentrados, mistos e leves) terminado o processo de concentração, foram removidas dos recipientes de colecta para recipientes de vidro para posterior secagem na estufa Yamato DVS602 a uma temperatura máxima de 60°C por um período de 24h. Findo o processo de secagem das amostras, passou-se

para a pesagem das fracções (concentrados, mistos e leves) em uma balança analítica SHIMADZU AUW220.



Figura 28: A esquerda, produtos obtidos na concentração com a mesa Wilfley; a direita estufa Yamato DVS602 ([Lab. Geologia - FENG](#)).

3.2.9 Análise química dos produtos da concentração

A composição das faixas concentradas do produto de cada ensaio foram determinadas com o auxílio do XRF-Portátil. Os resultados da análise encontram-se na tabela AP 3.2-5 do apêndice 3.

3.2.10 Separação magnética dos concentrados

Com o auxílio de um íman de mão. Procurou-se recolher toda a magnetita e a titanomagnetite, se presentes, contidas na amostra. Em seguida, as amostras são conduzidas para análise mineralógica com auxílio da lupa binocular.

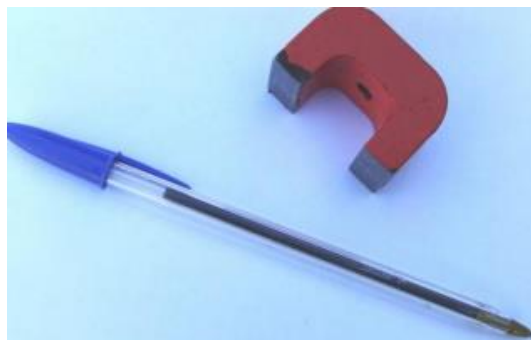


Figura 29: Iman de mão usada na experiência.



Os produtos da concentração encontram-se organizadas (I a VII) em ordem crescente das suas densidades, dos mais leves (rejeitos) para os mais pesados (concentrados 5, 6 e 7) acima. Onde é possível ter uma pré-avaliação das características dos produtos pela coloração das amostras.

Conhecidos os respectivos teores dos concentrados, foram feitas as devidas comparações com o auxílio das percentagens de recuperação metalúrgica e mássica.

3.2.11 Análise mineralógica dos produtos da concentração gravítica

Ensaio de análise mineralógica das saídas provenientes da etapa de concentração gravítica com mesa Wilfley foram feitas com auxílio da lupa binocular OPTIKA ITALY. Esta etapa tem como principal objectivo, identificar a assembleia mineralógica nas saídas dos concentrados e fazer o estudo da eficiência do processo de separação gravítica usando mesa Wilfley para o presente estudo.

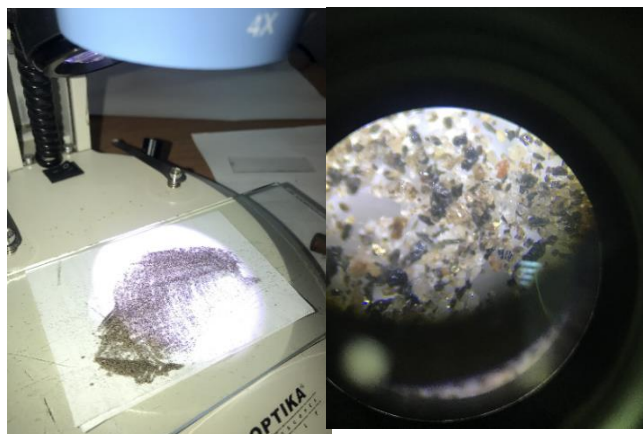


Figura 30: Lupa binocular OPTIKA ITALY usada na experiência.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Florescência de raios-X (XRF)

A técnica de XRF foi aplicada na amostra inicial com o objectivo de determinar a composição elementar da amostra. Informação fundamental para a averiguação dos possíveis constituintes da amostra, o que auxiliara na escolha do método adequado para a concentração do mineral de interesse.

Abaixo, apresentam-se graficamente os resultados obtidos na caracterização química da amostra inicial com o auxílio do XRF de mesa (figura 31) e XRF-portátil (figura 32) para efeitos de ajuste da margem de resultados fornecidos pelos dois equipamentos.

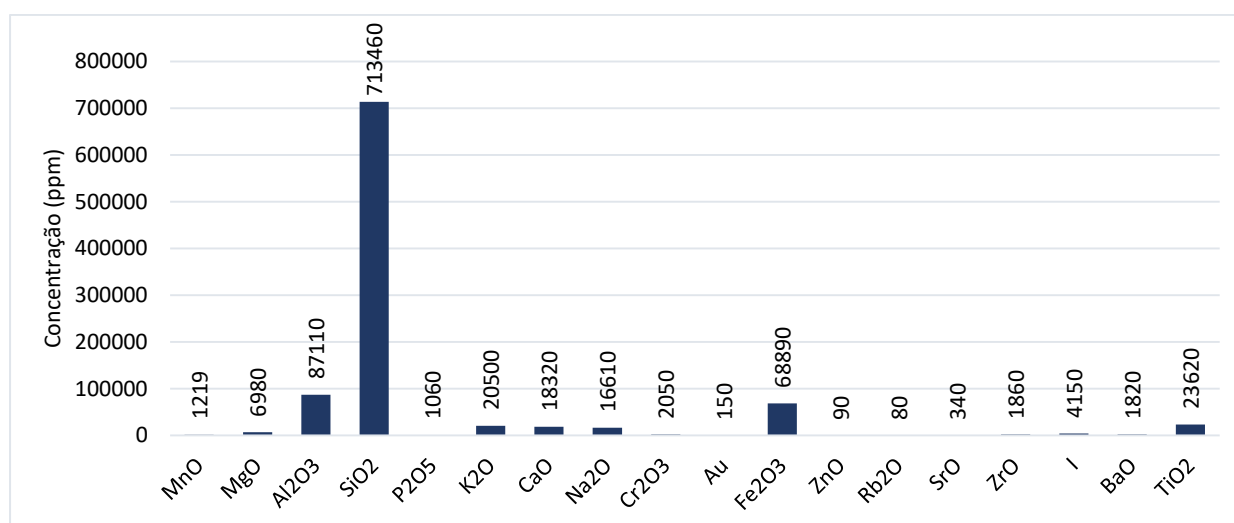


Figura 31: Resultados do XRF de mesa da amostra inicial.

A partir dos resultados arrolados a cima (Figura 31), é possível de forma preliminar afirmar que a amostra em estudo apresenta um teor significativo em ouro, titânio e zircão. O teor em ouro, em primeira mão é tido como satisfatório e atractivo para exploração, de acordo com Veiga & Lins (1992) que documentam instalações que processam minérios de ouro com teores de 0.4 ppm. O elevado teor de ouro nas amostras aluvionares é resultado dos processos de concentração natural ocorrido ao longo das margens dos rios, e este era um resultado previsto de acordo com Pryor (1965). Em suma, olhando para a figura 32, a amostra apresenta elementos como Titânio, Zircónio, Crómio, Manganês, a concentração gravitacional é uma técnica viável para exploração desses tipos de depósitos de ouro, segundo Bulatovic (2010).

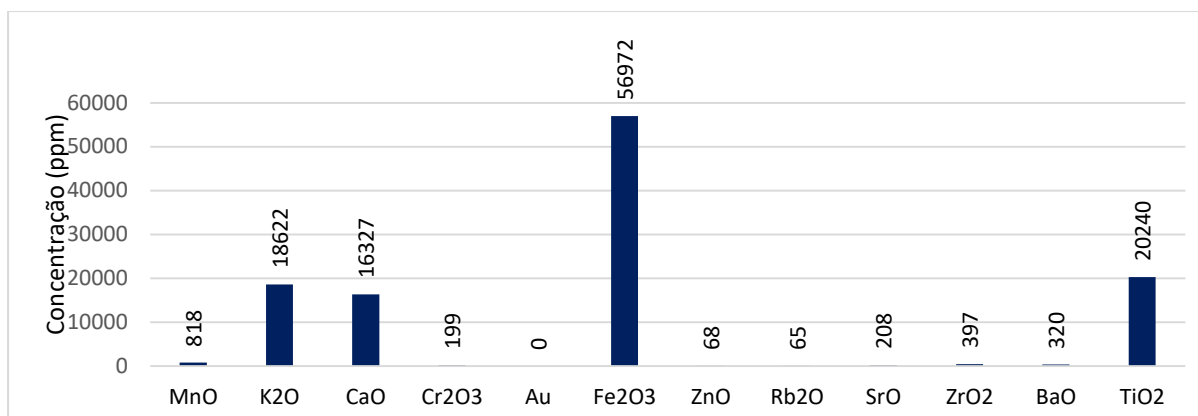


Figura 32: Resultados do XRF-portátil na amostra inicial.

Observa-se pelos resultados do XRF-portátil apresentados graficamente, figura 32, que teores de elementos como, Al (alumínio), Si (silício), Na (sódio), I (iodo) e Mg (magnésio) não foram detectados. Segundo Dutra & Gomes (1984) os XRF portáteis podem ter menor capacidade de detecção para elementos mais leves, em comparação com os equipamentos de mesa, e podem não ser tão precisos quanto equipamentos maiores de laboratório devido às suas características de fluorescência. A fluorescência gerada por esses elementos é mais fraca e mais difícil de detectar em comparação com elementos mais pesados.

Constataram-se também baixos teores dos elementos químicos comparativamente aos resultados obtidos a partir do XRF de mesa. Este facto do XRF de mesa permitir uma melhor distribuição de energia e sinal na amostra, resultando em medições mais precisas.

Em contrapartida os resultados dos dois equipamentos, sugerem a presença da mesma faixa de elementos químicos e nos dois casos os teores dos pesados são atractivos para o beneficiamento. Comportamento contrário verificou-se para o Au (ouro), que aparece em concentrações maiores (150ppm) na análise feita com XRF de mesa e sem nenhuma detecção para o XRF portátil. O que relaciona-se com a baixa homogeneidade da amostra, pois, se a concentração de ouro na amostra analisada não estiver uniformemente distribuída, o XRF-portátil pode ter feito uma medição em uma área com concentração indetectável e comportamento contrário ter se verificado no XRF de mesa.

4.2 Caracterização granulométrica

Os resultados da caracterização granulométrica da amostra vem representados abaixo (figura 33).

A classificação granulométrica revela-se como um processo de separação em si. As partículas se acumulam em classes, de acordo com o seu tamanho. Assim, para faixas granulométricas diferentes o conteúdo de minerais pesados variará.

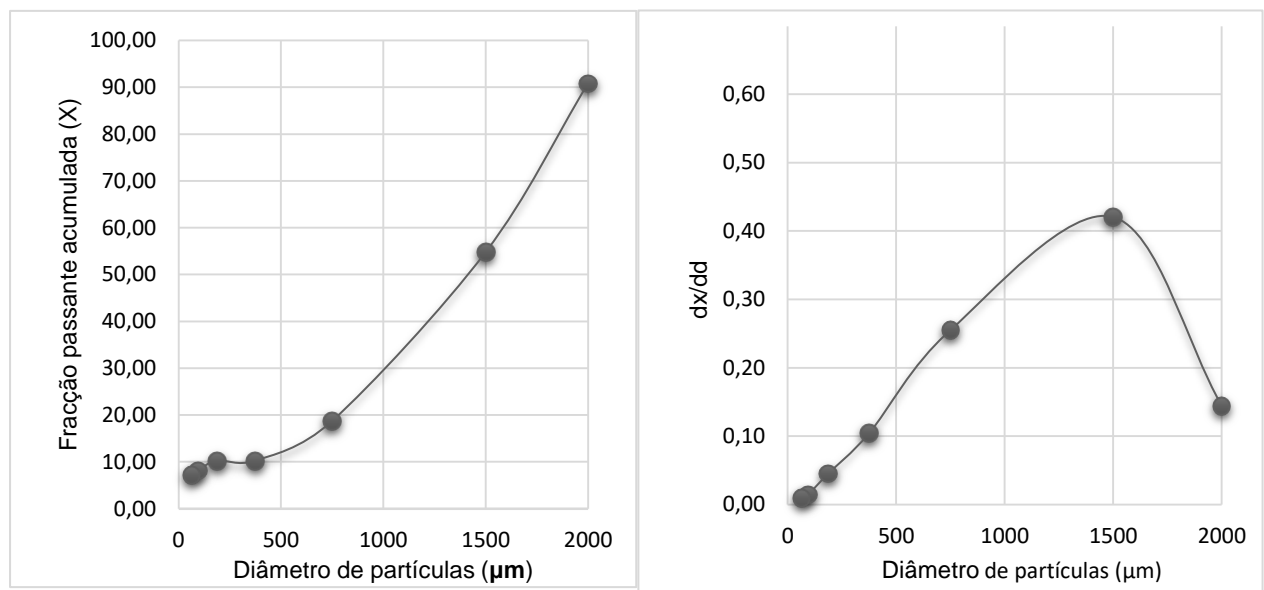


Figura 33: Curva granulométrica da amostra inicial.

A amostra apresenta um tamanho de partículas modal de 1500 μm o que significa que o tamanho de partículas que ocorre com a maior frequência na amostra, são partículas próximas com o diâmetro médio 1500 μm . Esses resultados indicam que a amostra inicial possui grande potencial para o processo de concentração gravítica, pois apresenta tamanho dos grãos dentro da faixa de tamanhos recomendados para a técnica de concentradores gravíticos, conforme ilustrado nas Figuras 10 e 11.

4.3 Composição química das frações retidas na classificação granulométrica

Feita a classificação granulométrica da amostra inicial, a caracterização química nas frações retidas mostrou-se ser crucial na identificação da faixa granulométrica com a maior ocorrência dos minerais valiosos e também com o uma técnica de pre-concentração.

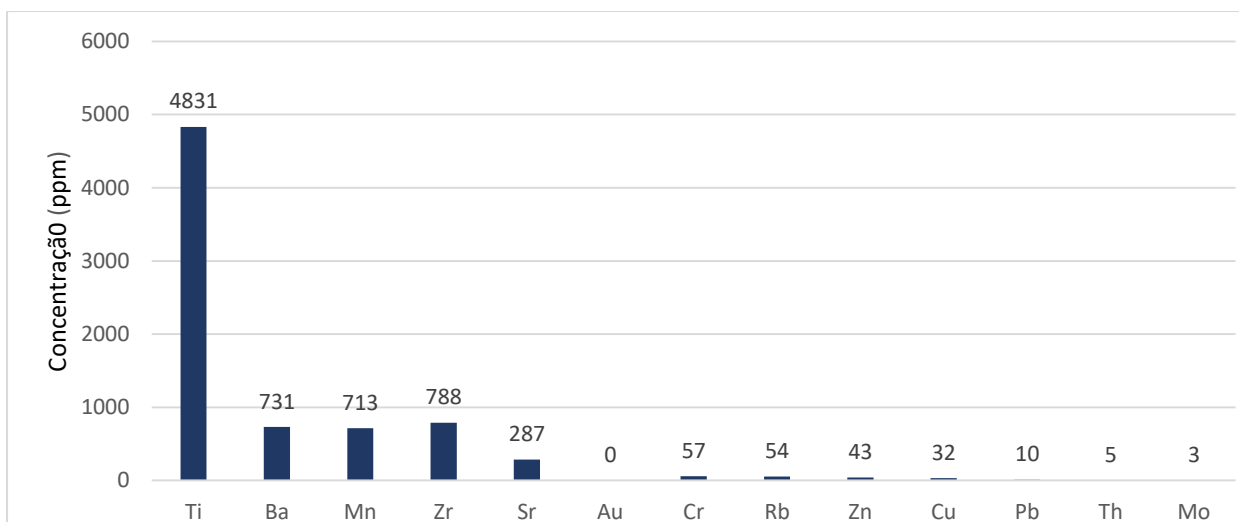


Figura 34: Composição química: fracção retida +2000 μm .

Observa-se pelos resultados apresentados graficamente na Figura 34, sobre a composição química das partículas na abertura +2000 μm , apresenta teores significativos de Titânio ($Ti = 4831ppm$); e de Zircônio ($Zr = 788ppm$) que são um grupo de elementos situados na classe de minerais pesados típicos em amostras de pláceres. Minerais pesados são minerais que têm uma densidade maior do que a maioria dos outros minerais encontrados em rochas e sedimentos. Esses minerais possuem uma densidade específica acima de 2,9 g/cm^3 .

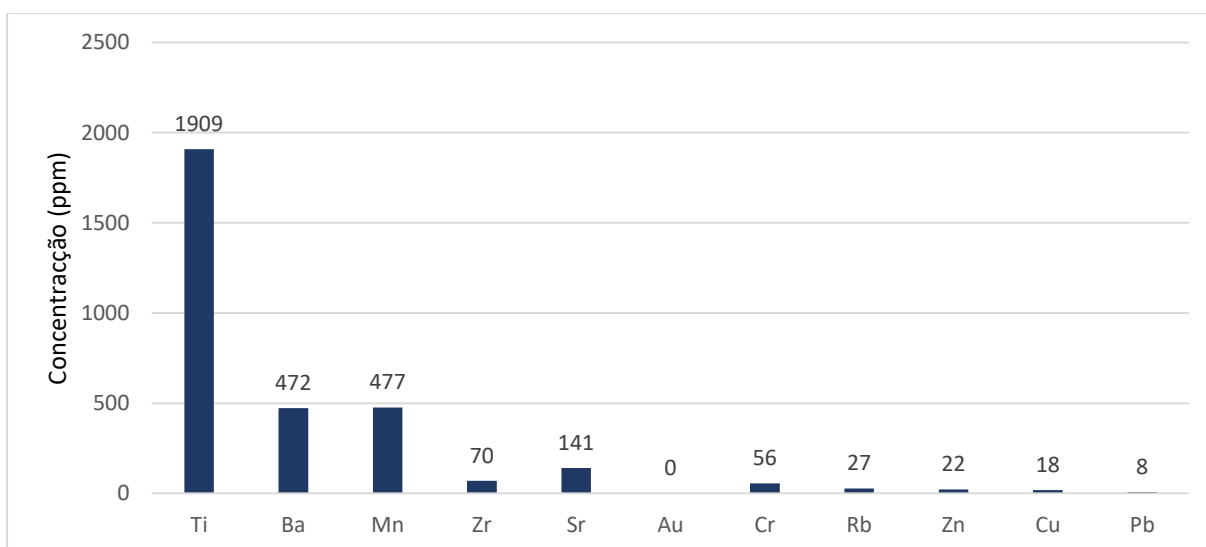


Figura 35: Composição química: fracção retida -2000 + 1000 μm .

Os resultados da composição química das partículas da faixa granulométrica (-2000 + 1000 μm) representados graficamente (figura 35) demonstram baixos teores das composições da assembleia química constituinte da amostra.

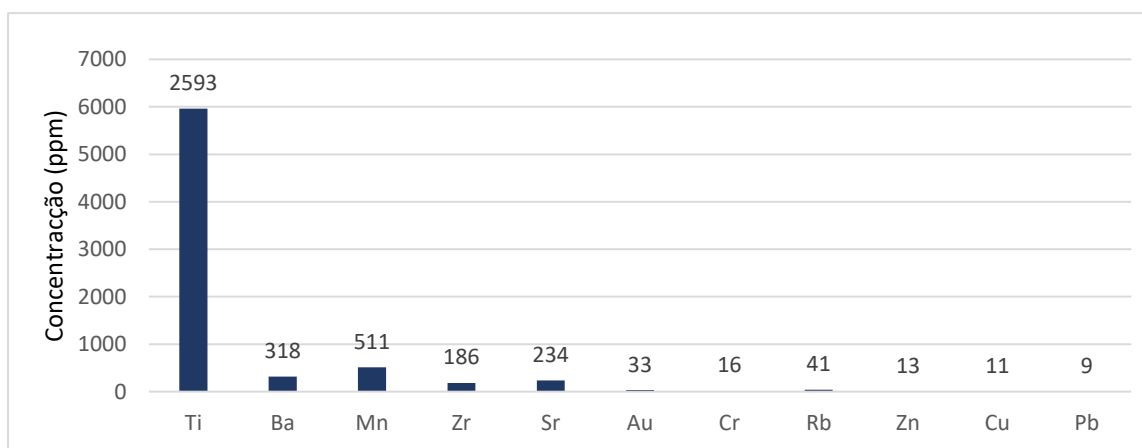


Figura 36: Composição química fracção retida $-1000 + 500\mu\text{m}$.

Observa-se pelos resultados apresentados graficamente (Figura 36) que o teor dos minerais valiosos aumentou significativamente em comparação as faixas granulométricas apresentadas nas Figuras (34 e 35).

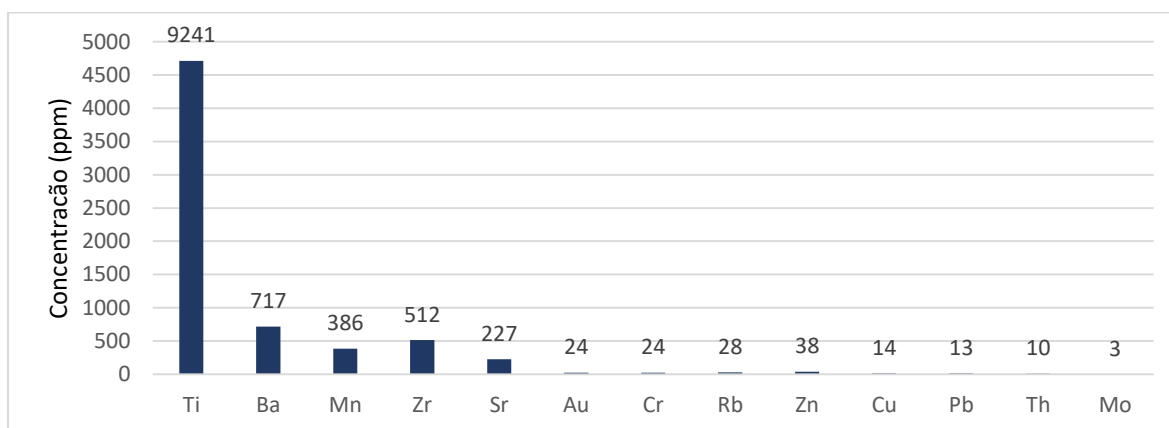


Figura 37: Composição química fracção retida $-500 + 250\mu\text{m}$.

Com o auxílio da figura 37 é possível observar que houve um aumento da concentração dos constituintes principais da amostra, para o Titânio ($Ti = 9241\text{ppm}$) e Zircão ($Zr = 512\text{ppm}$). Um comportamento contrário e não menos importante observou-se para o ouro, com uma redução do seu teor comparativamente aos resultados da faixa granulométrica anterior representados graficamente na figura 36.

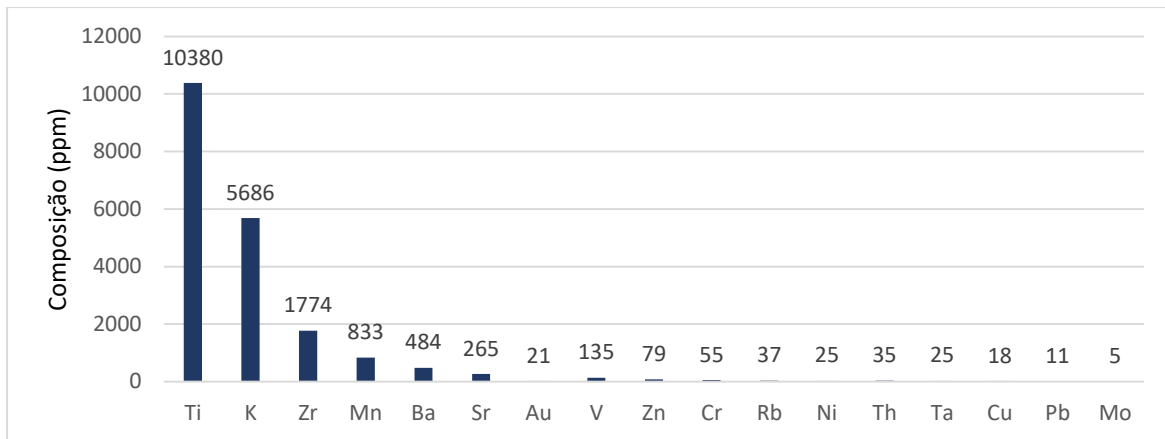


Figura 38: Composição química –250 + 125 μm .

Os resultados da análise química das partículas da abertura –250 + 125 μm representados graficamente (figura 38) demonstram teores maiores dos pesados. E uma redução no teor de Ouro (Au) para 21 ppm o que leva-nos a concluir que a amostra apresenta menor ocorrência de ouro para faixas granulométricas inferiores a –1000 + 500 μm .

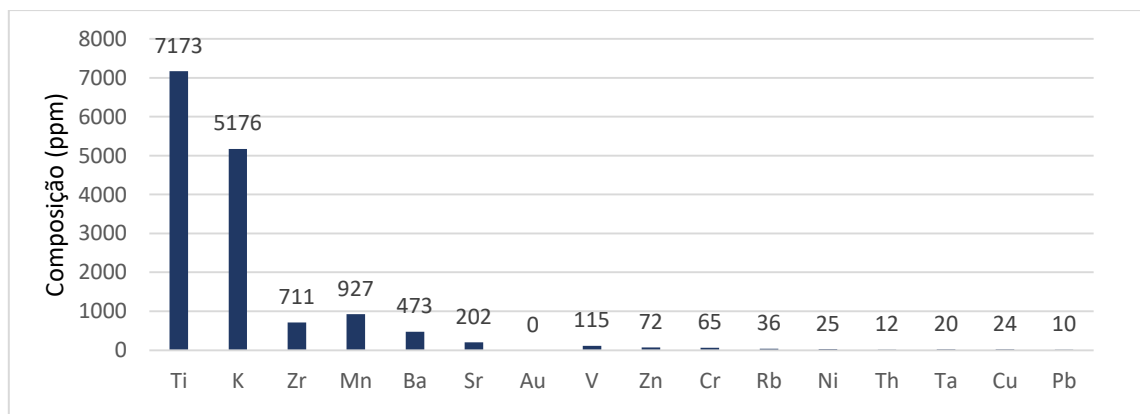


Figura 39: Composição química da base.

É possível observar pela figura 39 que valores superiores de $Ti = 7173 ppm$, $Zr = 711 ppm$. Os elementos como Bário (Ba), Potássio (K) e Estrôncio (Sr) são um dos constituintes básicos dos silicatos (grupo de minérios mais predominantes na crosta terrestre). O Manganês pode estar presente em depósitos plácenes como parte de minerais pesados que são transportados e concentrados pela acção da água. Embora o Manganês não seja tão denso quanto alguns outros minerais pesados, ele pode ser encontrado em associação com esses minerais relativamente com menor frequência em comparação a outros minerais como os minerais de Titânio e Zircão. O Manganês é um dos mais abundantes na crosta terrestre com valores o que explica a ocorrência nestas proporções na amostra em estudo.

Vale referenciar que análises químicas quantitativas dos minerais possibilitam o agrupamento dos elementos com base na sua abundância. Quando elementos químicos ocorrem em grandes quantidades ($> 1\%$ em peso), eles são considerados elementos maiores e são medidos em percentagem em peso ($1\% \text{ em peso} = 0,0001\text{ppm}$). E elementos menores ocorrem em quantidades menores ($0,1 - 1\%$ em peso). Outros elementos ocorrem em quantidades muito pequenas ($< 0,1\%$ em peso) e são chamados de elementos traço (Klein & Dutrow, 2012).

Klein e Dutrow (2012) referenciam ainda que, os elementos traço são medidos em partes por milhão (ppm) ou partes por bilhão (ppb). Apesar de sua pouca abundância, os elementos traço podem fornecer informações sobre os processos geológicos, tais como temperatura ou pressão nas quais os minerais são formados. Cobre (Cu) tem abundância de 55 ppm , o $Pb = 13 \text{ ppm}$ e o $Hg 0,08 \text{ ppm}$. Muito interessante é o Zr, elemento de uso menos comum, que é mais abundante que o Cu (com média de 165 ppm). Os elementos traços ocorrem como elementos que formam seus próprios minerais e como elementos que estão apenas dispersos ou admitidos em outros minerais.

4.4 Produtos da concentração gravítica na mesa Wilfley

Para melhor visualização do comportamento das configurações adotadas para este ensaio, as análises foram feitas de forma pareada, ou seja:

- Feito o planeamento estatístico de ensaio, observou-se um comportamento atípico para ensaios com a inclinação de 2° para as duas faixas granulométricas, a separação quase que não acontecia e o material era quase todo ele arrastado para a zona de concentração. Tendo-se desta forma descartado ensaios para esta configuração. Este aspecto é justificado pelo facto de que o ângulo de inclinação do deque afecta a taxa de sedimentação dos minerais na água que flui sobre a mesa. Ao reduzir o ângulo de inclinação e diminuir o fluxo, a capacidade da mesa de capturar partículas mais leves, como minerais de ganga, é reduzida.
- Para os ensaios (1 e 2), onde dos três parâmetros em pesquisa, apenas variou-se a granulometria da amostra, da mais fina ($-500 + 250 \mu m$) para a mais grossa ($-1000 + 500 \mu m$). Constatou-se que o material a se concentrar quase que não movia-se para a zona de estratificação para deste modo

formar perfil de separação dos materiais leves com as dos pesados. E a quantidade de material recuperado era muito menor para as duas granulometrias;

- Para ensaios (5 e 6), onde para além de variar a granulometria da amostra variou-se também o caudal de fornecimento de água de $0,126 L/s$ a $0,132 L/s$. Constatou-se uma ligeira mudança no comportamento da amostra sobre a mesa. Algumas partículas das amostras moviam-se, de forma lenta, para a zona de estratificação, pois embora a maior parte do material ficava suspensa sobre a mesa devido ao menor ângulo de inclinação do deque; Um aumento no caudal de água em uma mesa Wilfley geralmente melhora a acção de separação, pois o fluxo de água é projectado para criar uma camada fina de partículas em movimento, e um caudal maior ajuda a criar essa camada de maneira mais eficaz, permitindo uma melhor separação das partículas com base em suas densidades.
- Para os ensaios (3 e 4) observou-se um aumento da recuperação metalúrgica, ou seja, há maior recuperação de minerais valiosos sobre a amostra inicial (bruta). Observou-se uma formação mais acentuada da zona de separação. Segundo o Pedrosa (2019) um ângulo maior resulta em uma maior força de gravidade efectiva, o que é benéfico para a concentração de minerais mais pesados; pois é a partir de um ângulo de inclinação maior que se forma a estratificação das partículas. Um ângulo de inclinação maior permite que as partículas se separem com base em sua densidade com mais eficácia, à medida que se movem pela superfície da mesa e ajuda a evitar a mistura das partículas mantendo uma camada mais nítida de partículas pesadas na área de concentração;
- Por ultimo, para os ensaios (7 e 8) a formação do perfil de concentração foi rápido devido ao ângulo de inclinação e o fluxo de água serem maiores. Um ângulo muito íngreme e um fluxo de água maior faz com que as partículas mais leves sejam arrastadas junto com as mais pesadas, prejudicando a eficácia do processo. Ainda se pode aliar a isto, a influência do caudal. Nota-se que para maiores caudais as perdas de massa são maiores, pois maior é o arraste das partículas. Mantendo um caudal elevado, as perdas são maiores para ângulos

de inclinação maiores, e mantendo um caudal baixo, as perdas são maiores para um ângulo de inclinação menor.

Na tabela 4 vem arrolados os resultados da composição química dos elementos com maior valor económico, determinantes na avaliação da eficiência do processo de separação gravítica.

Tabela 4: Teores dos concentrados.

	Ensaio	Granulometria (μm)	Caudal (L/s)	Angulo ($^\circ$)	Au (%)	Ti (%)
<i>Alimentação</i>	3	-1000 + 500	0,126	6	0,0033	0,2593
<i>Concentrado</i>					0,0027	0,5944
<i>Rejeito</i>					0,0022	0,1934
<i>Alimentação</i>	4	-500 + 250	0,126	6	0,0024	0,4714
<i>Concentrado</i>					0,0014	0,8541
<i>Rejeito</i>					0,0022	0,3562

Segue-se abaixo, figura 40, a representação gráfica dos resultados referentes a recuperações metalúrgica para o Ouro e Titânio.

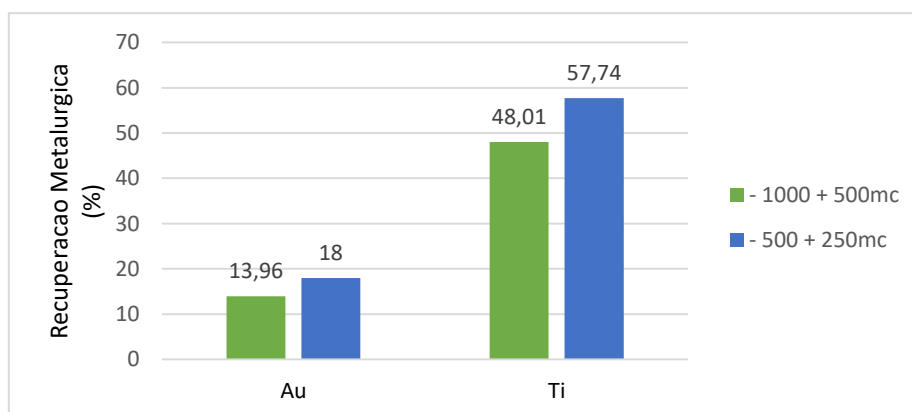


Figura 40: Resultados da recuperação metalúrgica do ouro e titânio nas duas faixas granulométricas.

A faixa granulométrica $-500 + 250 \mu\text{m}$ apresenta uma recuperação metalúrgica acentuada em decorrência do alto teor de ouro obtido no produto concentrado. O oposto verificou-se na faixa granulométrica de $-1000 + 500 \mu\text{m}$.

A recuperação metalúrgica é a percentagem do metal no minério de alimentação que é recuperada com sucesso no concentrado. Recuperações mais altas indicam uma concentração mais eficiente, enquanto recuperações mais baixas podem sugerir perdas significativas de ouro. Factores como a concentração do metal de interesse

no minério desempenha um papel significativo na recuperação. Quanto maior o teor, geralmente é mais fácil recuperar o metal; a presença de minerais indesejados e a associação entre os minerais afectam a recuperação. Alguns minerais podem ser mais facilmente separados do metal de interesse do que outros (Carrisso & Chaves, 2002). Uma consideração importante na avaliação destes resultados é o facto de que o ouro quando está totalmente livre, ou seja, quando ele não está intimamente associado a minerais de ganga e está disponível para ser facilmente capturado durante o processo de concentração resulta em recuperações mais altas, uma vez que o ouro é mais acessível para a separação. O oposto verifica-se quando o ouro está pouco liberado, é mais difícil de ser separado dos minerais de ganga. Isso resulta em recuperações mais baixas, já que parte do ouro pode permanecer presa nos minerais de ganga.

4.4.1 Recuperação mássica

Feitos os ensaios seguindo o planeamento estatístico de ensaios, efectuou-se um balanço mássico, onde se avaliou a recuperação mássica do concentrado. A recuperação mássica é um indicador de desempenho da mesa de concentração gravítica. Ela faz uma relação da massa de concentrado obtido pela massa da amostra na alimentação. Durante o processo de concentração, notou-se que uma parte considerável do mineral leve (ganga) transbordava junto com a água de lavagem que se acumulava nos colectores. Esta perda variou de acordo com os caudais, inferior e superior, o ângulo de inclinação e o tamanho das partículas. Os resultados referentes a recuperação estão apresentados graficamente na figura 40.

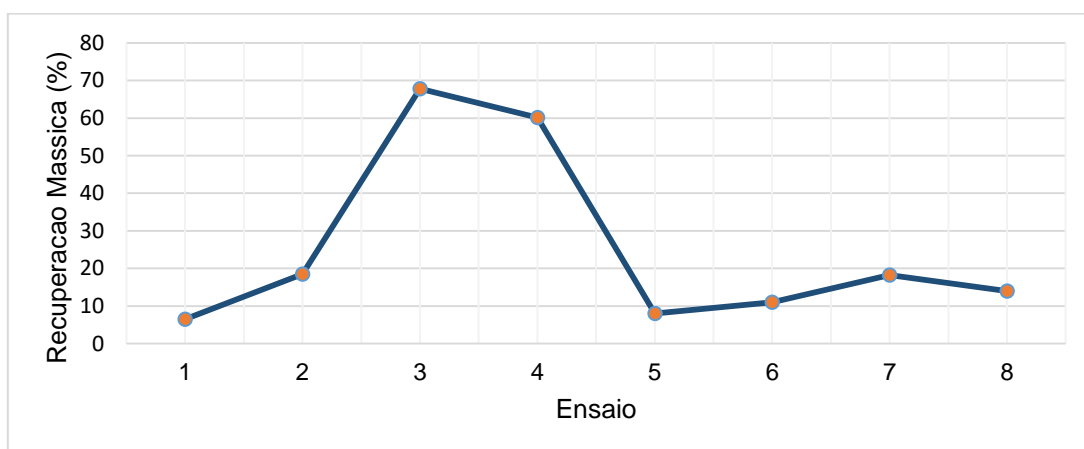


Figura 41: Gráfico de recuperação mássica.

Nota-se pelo gráfico acima (figura 41) que operações com granulometria elevada a recuperação mássica é maior, pois nestas faixas a maior concentração de minerais leves e estes são facilmente arrastados pela água de lavagem para a região de colecta. E conseqüentemente, quanto maior o caudal de água de lavagem maior é a quantidade de leves que se colecta. E nestas situações quando se mantém o caudal alto, as taxas de recuperação mássica são maiores para ângulos de inclinação maiores, e para caudais baixos a recuperação mássica é maior para ângulos de inclinação menores

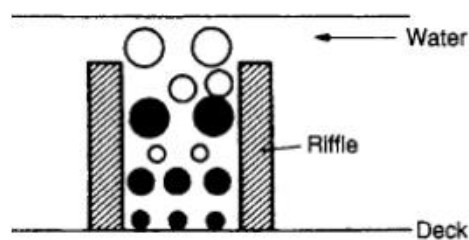


Figura 42: Mecanismo de funcionamento da mesa Wilfley (Carrisso & Chaves, 2002).

4.4.2 Caracterização mineralógica dos concentrados

Seguem imagens captadas pela lupa binocular OPTIKA ITALY dos resultados das saídas da zona de concentração gravítica na mesa Wilfley.



Figura 43: Resultados das saídas da zona de concentração na mesa Wilfley.

Foi realizada uma observação criteriosa dos constituintes da amostra usando a lupa binocular, variando o suporte sobre a placa de Petri para melhor visualização das características dos minerais.

A partir da figura 43 é possível notar a presença de partículas com coloração preta, maioritariamente constituída por partículas pretas, o que era de se esperar pois nas análises feitas anteriormente deram conta da presença de minerais como a Magnetite, e Ilmenite. Com auxílio das propriedades inerentes a cada material como a propriedade magnética, fez-se a separação desses minerais com características similares, no caso da cor.

Presença de Barrita ($BaSO_4$) que é um mineral branco, com brilho vítreo. Ocorre como um mineral de ganga em veios hidrotermais. Associada com minérios de chumbo, cobalto, manganês e antimônio; Presença de alguns silicatos.

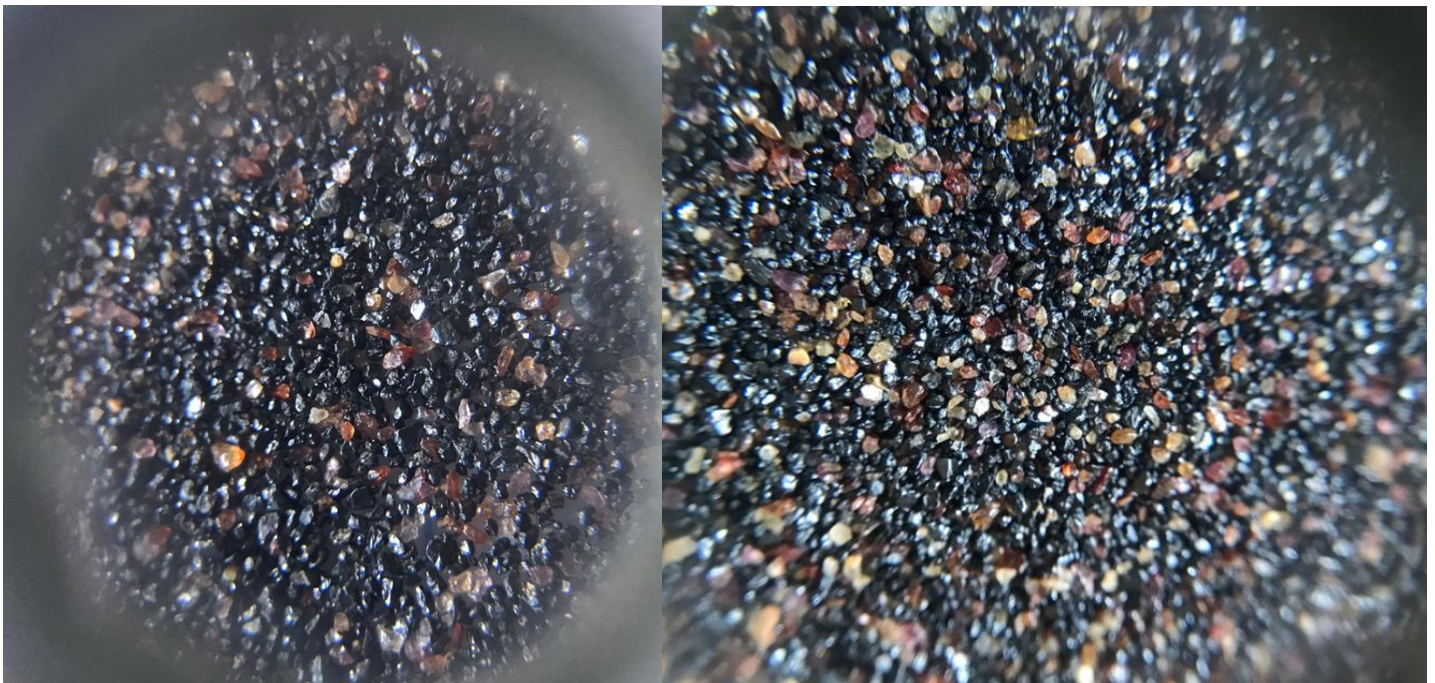


Figura 44: Imagens tirada com auxílio de uma lente da lupa binocular na amostra proveniente da concentração gravítica usando mesa Wilfley.

No geral as duas fracções granulométricas apresentaram resultados satisfatórios no concerne a separação gravimétrica, pois pelas imagens dos concentrados nota-se presença massiva de minerais pesados e o contrario observou-se em minerais com baixa densidade (leves). Embora não ter sido possível visualizar graus ou pipetas de ouro livre na amostra, a caracterização química dos concentrados mostrou a presença de ouro. Indo ao desempenho de cada faixa granulométrica, a faixa granulométrica $-500 + 250\mu m$ apresenta maior eficiência no processo de concentração gravítica. O conteúdo de minerais pesados no concentrado é tanto maior quanto menor for a

granulometria e o caudal de água de lavagem e quanto menor for o ângulo de inclinação do deque da mesa de concentração.

A figura 45 mostra resultados da separação magnética dos concentrados efectuados usando um íman de mão.

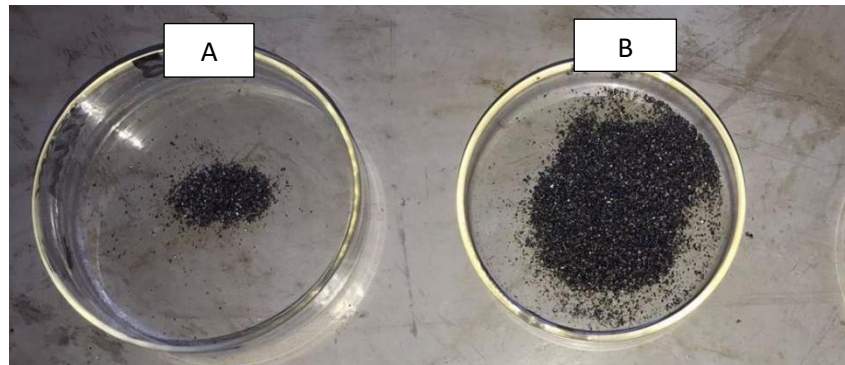


Figura 45: Resultados da Separação magnética usando íman de mão; A- corresponde a fracção dos ferromagnéticos e B- a fracção dos não ferromagnéticos.

Principais minerais constituintes dos concentrados

A amostra principal mostrou-se não ser um atractivo no que diz respeito ao ouro, em contrapartida, apresenta uma grande diversidade de minerais valiosos, como é o caso dos minérios de titânio (Ilmenite); minérios de ferro (Magnetite) e o Zircão. Que apresentam o alto valor económico e constituem o grupo dos principais atractivos na indústria exploração de minerais pesados na indústria de processamento e transformação mineiral.

4.4.3 Visão geral do desempenho da mesa Wilfley como resposta ao uso de técnicas sustentáveis

A análise da sustentabilidade do uso da mesa Wilfley, no beneficiamento de minérios como uma aposta na adopção de técnicas sustentáveis, ou seja, uma técnica de processamento de minerais que busca maximizar a eficiência na recuperação de minerais valiosos, ao mesmo tempo em que minimiza os impactos ambientais e sociais. Foi empregue o método da LCA (Life Cycle Assessment) que traduzido para português significa «Análise do Ciclo de Vida», é uma metodologia de avaliação dos impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço. Para o caso em alusão, uso da mesa Wilfley para o beneficiamento de minérios auríferos, a LCA ajuda a entender e mitigar os impactos ambientais associados ao processo.

Abaixo seguem as etapas seguidas para a elaboração da LCA para técnica de concentração gravítica usando a mesa Wilfley para o beneficiamento de minérios pláceres:

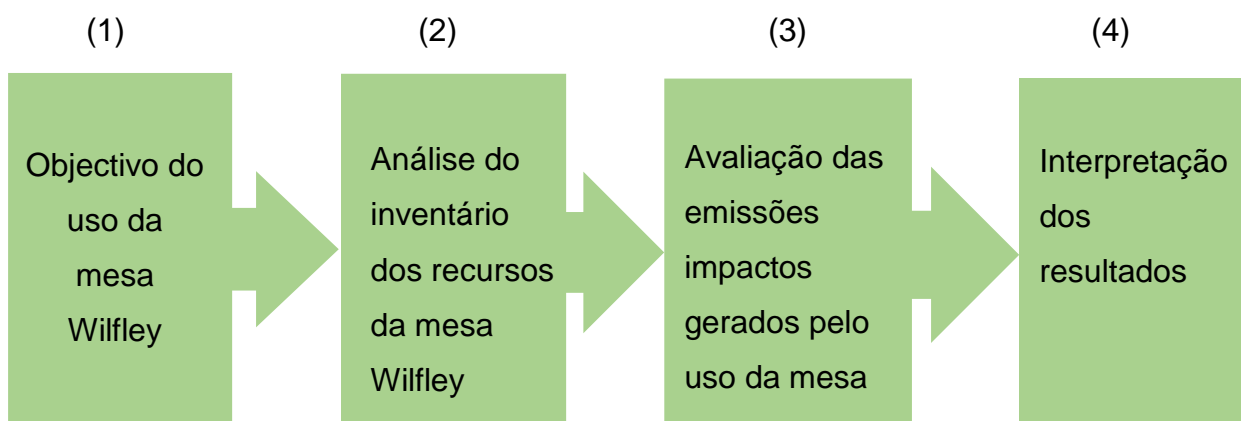


Figura 46: Etapas da LCA para a mesa Wilfley para o beneficiamento de minérios pláceres.

(1) Objectivo

O objectivo desta avaliação é de avaliar a viabilidade ambiental do uso da mesa Wilfley no beneficiamento de minérios pláceres.

(2) Análise do inventário de recursos e emissões da mesa Wilfley:

Recursos necessários:

- Electricidade: Uma Mesa Wilfley requer electricidade para alimentar o motor que ajuda na separação dos minerais. Para este ensaio foi usada uma mesa Wilfley com consumo médio de potência de $\frac{1}{4} hp$;
- Água: A água é frequentemente usada na operação da Mesa Wilfley para auxiliar na separação de minerais. A quantidade de água necessária varia dependendo do material e das configurações da mesa. O consumo de água variou de 0,126 a 0,132 l/s ;
- Minério de Alimentação: amostra de minérios pláceres proveniente da província de Niassa;
- Mão-de-obra: Um operador foi suficiente para execução deste processo, monitorar o processo, realizar manutenção e ajustar as configurações. O

equipamento é relativamente simples de operar e acessível, tornando a mineração sustentável uma possibilidade para comunidades locais;

(3) Avaliação das emissões e impactos gerados pelo uso da mesa Wilfley no beneficiamento de minérios pláceres

- Consumo de Energia: a fonte de geração de electricidade para a mesa Wilfley não envolve a queima de combustíveis fósseis, ou seja, não é gerada a partir de processos que liberam dióxido de carbono (CO_2) e outros gases de efeito estufa na atmosfera;
- Uso de Água: O uso de água na operação pode afectar os recursos hídricos locais, e a descarga de água utilizada na separação deve ser gerenciada para evitar a poluição;
- Geração de Resíduos: durante a operação da mesa gerou-se resíduos (rejeito). O descarte adequado desses resíduos foi necessário;
- A separação gravimétrica é um processo físico que não envolve o uso de produtos químicos tóxicos ou reagentes perigosos, o que contribui para a redução de resíduos químicos e a preservação do meio ambiente.

5 CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho conclui-se:

1. A caracterização química da amostra principal e dos produtos revelou a presença de *Ti* e *Zr* em proporções ótimas para o processamento. Observou-se um aumento significativo na concentração desses elementos ou minerais, demonstrando o sucesso do processo;
2. A caracterização granulométrica da amostra principal revelou um diâmetro modal de $1500\mu m$ e com auxílio dos resultados da caracterização químicas das fracções resultantes do processo de caracterização mineralógica, observou-se aumento do teor dos minerais de interesse a medida que o tamanho de partículas reduzisse;
3. O processo de beneficiamento gravítico por mesa Wilfley se mostrou eficiente para a concentração dos minerais de pláceres. Destaca-se que as três variáveis estudadas foram significativas na recuperação metalúrgica. Observou-se que os ensaios com granulometria $-1000 + 500\mu m$ e $-500 + 250\mu m$; com ângulo de inclinação de 6° e caudal de água de $0,126 L/s$ promoveram as seguintes recuperações metalúrgicas: para o Ouro 13,96% e 18% ; para Titânio 48,01% e 57,74% respectivamente; Assim pode-se confirmar a partir dos ensaios 3 e 4 ótimos resultados na recuperação metalúrgica, tanto nos ensaios com granulometrias fina e grossa;
4. A mesa Wilfley mostrou ser um meio eficaz de separação gravítica, permitindo a concentração de minerais ou partículas mais densas em comparação com as menos densas. Isso resultou em uma distribuição diferenciada das fracções granulométricas, com a concentração de Magnetite, Ilmenite, Zircão nas fracções mais pesadas.

6 RECOMENDAÇÕES

Para ocasiões futuras, recomenda-se:

- Efectuar uma análise mineralógica usando a técnica de XRD na amostra principal, com vista a conhecer os minerais presentes na assembleia mineralógica, principalmente na fase exploratória do depósito;
- Determinar o grau de liberação do ouro;

7 BIBLIOGRAFIA

7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. F. (1987). Hidrometalurgia dos minérios auríferos. Lisboa: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.

BIHALE, D. (2016). Industria Extractiva em Moçambique - perspectiva para o desenvolvimento do país. Friedrich Ebert Stiftung.

CARRISSO, R. C., & CHAVES, A. P. (2002). Mecanismos atuantes na concentração gravítica e principais equipamentos utilizados na concentração centrífuga. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

COSTA, F. R., & NERY, G. P. (2016). Caracterização das formas de ocorrência e associação de ouro por análise de imagens quantitativa. São Paulo: Tecnol metal.

COSTA, F., Nery, G., Ulsen, C., & Kahn, H. (2017). Tratamento de minérios e metalurgia extractiva. Rio de Janeiro: Belém-PA.

DA LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., & FRANÇA, S. C. (2010). Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

DAMASCENO, G. C. (2017). Geologia, Mineração e Meio Ambiente. Cruz das Almas-BA: SEAD-UFRB.

DE FIGUEIREDO, P. C., & CHAVES, A. P. (1998). Recuperação de Partículas Minerais Finas e Ultrafinas no Âmbito da Concentração Gravítica. São Paulo

DUTRA, C. V., & GOMES, C. B. (1984). A Fluorescência de Raios X na Geologia; Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia. Sao Paulo: Edgard Blücher Ltda.

EARLE, S., & PANCHUK, K. (2019). Physical Geology. VICTORIO, B.C: BCCAMPUS.

GONCALVES, T. A. (2015). Técnicas de Microscopia Ótica, Microscopia Electrónica de Varredura Automatizada e Análise de Imagens Aplicada a Diferentes Tipologias de Minérios de Ferro. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.

- KAUTZMANN, R. M. (1999). Avaliação de Resinas de Troca Iônica para o Emprego na Hidrometalúrgica de Minérios Auríferos. Porto Alegre.
- KLEIN, C., & DUTROW, B. (2012). Manual de ciência dos minerais. Porto Alegre: Artmed editora S.A.
- LINZ, F. F., COSTA, L. S., DELGADO, O. C., & GUTIERREZ, J. M. (1992). Concentrador Centrifugo: revisão e aplicações potenciais. Rio de Janeiro: CETEM/CNP.
- MARRUFO, T., CHILENGUE, H., & SILVA, F. (2020). Implementação Piloto do Novo Quadro da OMS para Apoiar o Desenvolvimento de Estratégias de Saúde Pública na Mineração Artesanal e de Pequena Escala de Ouro no Contexto da Convenção de Mina-mata sobre Mercúrio. OMS-Moçambique.
- NETO, M. T., & DA ROCHA, A. M. (2010). Noções de prospeção e pesquisa mineral para técnicos em geologia e mineração. IFRN-RN
- NEUMANN, R., SCHNEIDER, C. L., & NETO, A. A. (2010). Caracterização tecnológica de minérios. Ministério da Ciência e Tecnologia, CETEM, Rio de Janeiro.
- PERSAUD, A., & TELMER, K. (2015). Developing baseline estimates of mercury use in artisanal and small-scale gold mining communities: a practical guide. Vitoria, B.C. Artisanal Gold.
- PORPHIRIO, N. H., BARBOSA, M. I., & BERTOLINO, L. C. (2010). Caracterização Mineralógica de Minérios Parte I. CETEM, Coordenação de Processos Minerais. Rio de Janeiro: 5ed.
- RUIZ, I. Z., & GOZALES, P. A. (2018). Meio Ambiente e Mineração Artesanal em Três Distritos de Cabo Delgado: Ancuabe, Montepuez e Namuno. medicusmundi.
- SAMPAIO, J. A., OLIVEIRA, G. P., & DA SILVA, A. O. (2009). Ensaio de Classificação em um Hidrociclone. Minas Gerais: CETEM/MCT.

- SANTOS, A. A. (2018). Caracterização mineralógica e tecnológica de minério. Londrina: Educacional S.A.
- SILVA, C. G. (2001). Pláceres Marinhos. Brazil: Brazilian Journal Geophysic.
- TAGGART, A. F. (1927). HANDBOOK OF MINERAL DRESSING, Ores and Industrial Minerals. New York: John Wiley & SONS, INC.
- VICENTE, E. M. (2000). Impact of Alluvial Gold Mining on Surface Water Quality in the Revue Basin-Manica District Mozambique. Durban.

7.2 REFERÊNCIAS CONSULTADAS

- Anton Paar. (12 de 11 de 2022). Obtido de Anton Paar: <https://wiki.anton-paar.com/se-en/x-ray-diffraction-xrd/>
- ARTERIS, C. D. (2014). Redução de amostras de agregados para testes.
- BERG, R. V. (December de 2000). Inhibition of the pregrobbing phenomenon in gold ores. Cape Technikon.
- HARDING, K. G. (Novembro de 2011). An Introduction of Life Cycle Assessment (LCA). ResearchGate.
- CAIRNCROSS, B. (2004). Field Guide to Rocks & Minerals of Southern Africa. Cape Town: Struik Publishers.
- JOLLIET, O., SAADE-SBEIN, M., & SHAKED, S. (2016). Environmental Life Cycle Assessment. New York: CRC Press.
- PEDROSA, A. G. (30 de Agosto de 2019). Recuperação dos minerais de ferro. Araxa, MG.
- PEIXOTO, A., FERREIRA, D., & MATTOS, I. (2016). Catálogo de Minerais Do Laboratório de Mineralogia. Porto Alegre: Fortaleza-CE.
- SILVA, A. L. (2013). Caracterização Mineralógica Por Difração de Raios X e Determinação de Terras Raras por ICP-MS de Rochas. Belo Horizonte.

APÊNDICES

APÊNDICE 1
- ANÁLISE GRANULOMÉTRICA -

Tabela AP 1: Resultados da classificação granulométrica da amostra principal.

<i>Diâmetro médio (μm)</i>	<i>Massa retida (kg)</i>	<i>Fracção retida</i>	<i>Fracção retida (%)</i>	<i>Fracção cumulativa (%)</i>	<i>Fracção passante</i>
2000	2,89	0,15	14,53	14,53	0,85
1500	8,38	0,42	42,13	56,66	0,43
750	5,09	0,26	25,59	82,25	0,18
375	2,09	0,11	10,51	92,76	0,07
187,5	0,92	0,05	4,63	97,39	0,03
94	0,31	0,02	1,56	98,94	0,01
Base	0,21	0,01	1,06	100,00	0,00
Σ	19,89	1,00			

APÊNDICE 2
- CAUDAL DE FORNECIMENTO DE ÁGUA -

Tabela AP 2: Caudais de água de alimentação da mesa Wilfley.

<i>Medição</i>	<i>Volume (mL)</i>	<i>Tempo (s)</i>	<i>Media</i>		<i>Q ($\frac{L}{s}$)</i>
			$\bar{V} (\times 10^{-3} L)$	\bar{t}	
1	499	3,95	499.667	3.96	0,126
	500	4,02			
	500	3,91			
2	500	3,78	500	3.803	0,132
	500	3,80			
	500	3,83			

APENDICE 3

- MASSA -

Tabela AP 3.1: Massas dos produtos da concentração para faixa granulométrica – 1000 + 500 μm .

Saída		Massa (g)
1	Rejeito	3,07
2		124,03
3		356,48
4		283,80
5		131,32
6	Concentrado	64,84
7		13,29

Tabela AP 3.2: Massas dos produtos de concentração para a faixa granulométrica de – 500 + 250 μm .

Saídas		Massas (g)
1	Rejeito	10,09
2		166,44
3		280,97
4		224,31
5		208,10
6	Concentrado	100,86
7		8,97

APENDICE 4

Tabela AP 4: Resultados do planeamento estatístico de ensaios em termos de recuperação mássica.

<i>Ensaio</i>	Massa da alimentação (g)	Massa do concentrado (g)	Massa do rejeito (g)	Perdas (g)	Recuperação Mássica (%)
1	200	12,96	176,45	10,59	6,48
2	200	36,88	123,37	39,75	18,44
3	200	135,63	52,43	11,94	67,815
4	200	120,21	58,32	21,47	60,105
5	200	15,98	171,21	12,81	7,99
6	200	21,98	153,35	24,67	10,99
7	200	36,51	151,36	12,13	18,255
8	200	28	134,23	37,77	14

APÊNDICE 3

Tabela AP 3: Recuperação metalúrgica.

<i>Ensaio</i>	<i>Rmt(%) Au</i>	<i>Rmt(%) Ti</i>
3	13,96	48,01
4	18	57,74

APÊNDICE 4

- ANÁLISES QUÍMICAS -

Tabela AP 4.1: Resultados da análise de XRF da amostra principal.

<i>Óxidos</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Concentração (ppm)</i>
<i>MnO</i>	0.121	%	1210
<i>MgO</i>	0.698	%	6980
<i>Al₂O₃</i>	8.711	%	87110
<i>SiO₂</i>	71.346	%	713460
<i>P₂O₅</i>	0.106	%	1060
<i>K₂O</i>	2.050	%	20500
<i>CaO</i>	1.832	%	18320
<i>Na₂O</i>	1.661	%	16610
<i>Cr₂O₃</i>	0.205	%	2050
<i>Au</i>	0.015	%	150
<i>Fe₂O₃</i>	6.889	%	68890
<i>ZnO</i>	0.009	%	90
<i>Rb₂O</i>	0.008	%	80
<i>SrO</i>	0.034	%	340
<i>ZrO₂</i>	0.186	%	1860
<i>I</i>	0.415	%	4150
<i>BaO</i>	0.182	%	1820
<i>TiO₂</i>	2.362	%	23620
<i>Total</i>	100%		

Tabela AP 4.2: Relatório dos resultados de XRF para os produtos da classificação granulométrica da amostra principal.

Abertura do peneiro (μm)	Concentração (ppm)																						
	Ca	Fe	Ti	K	Mn	Zr	Au	Ba	Cr	Sr	Zn	V	Rb	Co	Cu	Ni	Sn	Pb	Ta	Th	Hg	Mo	As
+ 2000	9340	45866	4831	6708	713	788	-	-	57	287	43	83	54	-	32	24	38	10	18	5	5	3	-
- 2000 + 1000	4003	38269	1909	5262	477	70	-	-	56	141	22	116	27	-	18	24	-	8	17	-	-	-	-
- 1000 + 500	5104	12835	2593	5958	318	186	-	511	16	234	13	25	41	-	14	17	-	9	11	-	-	-	-
- 500 + 250	7335	23507	9241	4714	717	512	-	386	24	227	38	-	28	-	-	-	-	13	14	10	-	3	-
- 250 + 125	10844	46105	10380	5686	833	1774	-	484	65	265	79	135	37	50	18	25	-	11	25	35	-	5	3
- 125 + 63	11442	47593	7173	5176	927	711	-	478	55	202	72	115	36	-	24	25	-	10	20	12	3	-	-
Base	6180	41211	8042	6871	832	1076	-	320	772	257	36	96	54	35	24	36	50	21	20	33	-	8	-

Tabela AP 4.3: Relatório dos resultados do XRF dos produtos da concentração gravítica para abertura: - 1000 + 500.

Saída da mesa	Ca	Fe	Ti	K	Mn	Zr	Ba	Cr	Au	Sr	Zn	V	Rb	Co	Cu	Ni	Sn	Pb	Ta	Th	Hg	Mo	As
1	163217	56972	2240	2622	818	397	320	59	22	208	166	97	65	64	52	38	-	22	16	-	8	3	-
2	3815	4974	531	4545	121	51	532	-	-	230	7	-	32	-	-	-	-	9	18	-	-	-	-
3	2597	6388	1220	5071	184	71	437	12	-	142	26	-	33	-	11	-	-	8	12	-	-	-	-
4	4151	7876	560	5085	385	57	488	10	-	186	32	14	32	30	10	-	-	11	14	5	-	-	-

Tabela AP 4.4: Relatório dos resultados do XRF dos produtos da concentração gravítica para abertura: - 1000 + 500.

		Concentração (ppm)																						
Concentrado		Ca	Fe	Ti	K	Mn	Zr	Ba	Cr	Au	Sr	Zn	V	Rb	Co	Cu	Ni	Sn	Pb	Ta	Th	Hg	Mo	As
5		266119	557	4130	908	311	6301		28	-	32	44	123	3	95	60	-	-	6	20	-	10	13	8
	Ferromagnético	168580	20326	69	503	-	-		10	-	56	13	-	-	-	26	-	-	-	14	-	5	5	-
6 e 7		144833	14044	23038	1223	251	4571	-	7	27	15	29	86	-	130	35	-	-	6	19	8	7	7	4
	Ferromagnético	192160	120662	393	-	-	107	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela AP 4.5: Relatório dos resultados do XRF para as saídas da mesa, abertura do peneiro: - 500 + 250 μ m.

		Concentração (ppm)																					
Saída da mesa		Ca	Fe	Ti	K	Mn	Zr	Ba	Cr	Au	Sr	Zn	V	Rb	Co	Cu	Ni	Sn	Pb	Ta	Th	Hg	Mo
1		106130	65830	3687	3701	1009	335	395	443	21	331	192	145	73	-	55	52	-	16	34	7	9	-
2		100604	10618	3166	3166	227	34	695	14	-	375	14	-	46	-	15	21	-	15	16	-	-	-
3		6720	9514	1001	5426	219	71	614	16	-	336	29	10	35	-	-	-	-	12	13	-	-	-
4		58176	12961	506	2101	268	62	559	9	-	354	18	67	32	-	-	-	-	11	13	-	-	-
5		87122	32965	14495	1423	794	950	274	-	-	174	34	274	8	-	14	-	-	8	-	9	-	4
6		110684	47752	20441	1528	1328	4790	257	8	24	209	49	379	12	71	41	15	-	12	29	22	-	9

ANEXOS

ANEXO 1

Tabela A 1: Principais associações do ouro.

ESPÉCIES MINERAIS AURÍFERAS

Espécie	Composição	Au %	Densidade	Dureza		Cor
				Mohs	Vickers	
Ouro nativo	Au	>75	16-19.3	2.5-3	41-94	Amarela
Electrum	(Au,Ag)	45-75	13-16	2-2.5	34-44	Am.pálid
Calaverite	AuTe ₂	39.2-42.8	9.2	2.5-3	198-209	B./creme
Krennerite	Au ₄ AgTe ₁₀	30.7-43.9	8.6	2.5	117-130	B.creme
Silvanite	AuAgTe ₄	24.2-29.9	8.2	1.5-2	102-221	"
Montebrailite	Au ₂ Te ₃	38.6-44.3	9.9	2.5	198-228	"
Petzite	Ag ₃ AuTe ₂	19.9-25.2	9.1	2.5	43-74	B.acinz.
Hessite	Ag ₂ Te	<4.7	8.4	2.5-3	24-41	"
Nagiagite	Au(Pb,Sb,Fe) ₈ (S,Te) ₁₁	7.4-10.2	7.5	1.5	39-110	"
Kostovite	CuAuTe ₄	25.2	---	2-2.5	35-43	B.creme
Aurostibite	AuSb ₂	43.5-50.9	9.9	3	248-262	B.rosado
Maldonite	Au ₂ Bi	64.5-65.1	15.5	1.5-2	>110	cinz.esb

ANEXO 2

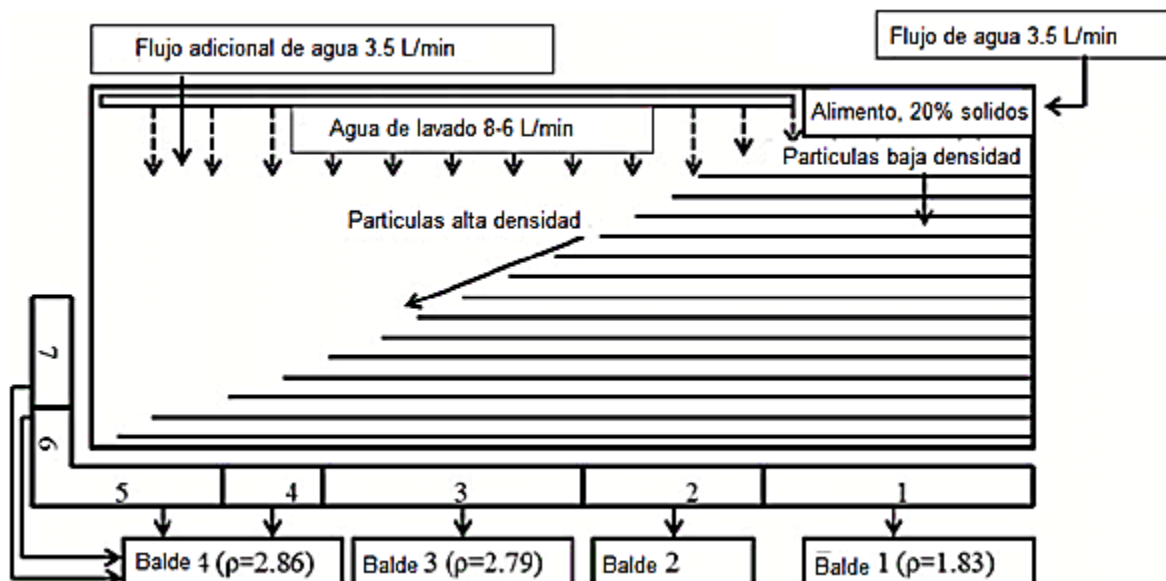


Figura A 2: Esquema da mesa Wilfley usada nos ensaios.

ANEXO 3

Tabela A 3:Clarke (abundancia) de alguns elementos químicos na crosta terrestre (Neto & Da Rocha, 2010).

Elemento	Símbolo	Concentração (ppm)	Elemento	Símbolo	Concentração em (PPM)	Elemento	Símbolo	Concentração (ppm)	Elemento	Símbolo	Concentração (ppm)
Bromo	Br	1,8	Fluor	F	600	Nióbio	Nb	20	Tântalo	Ta	2
Cadmio	Cd	0,1	Fosforo	P	900	Níquel	Ni	75	Telúrio	Te	0,002
Cálcio	Ca	33000	Gálio	Ga	26	Ouro	Au	0,003	Titânio	Ti	4400
Carbono	C	230	Germânio	Ge	2	Oxigênio	O	473000	Tório	Th	10
Cério	Ce	81	Háfnio	Hf	3	Paládio	Pd	0,01	Tungstênio	W	1
Césio	Cs	3	Ferro	Fe	46500	Prata	Ag	0,05	Uranio	U	2,5
Chumbo	Pb	10	Índio	In	0,1	Platina	Pt	0,0005	Vanádio	V	150
Cloro	Cl	130	Iodo	I	0,15	Potássio	K	25000	Zinco	Zn	2
Cobalto	Co	25	Lantânio	La	25	Rênio	Re	0,0006	Zircônio	Zr	150
Cobre	Cu	50	Lítio	Li	30	Rubídio	Rb	150			
Cromo	Cr	100	Magnésio	Mg	17000	Selênio	Se	0,1			
Escândio	Sc	13	Manganês	Mn	1000	Silício	Si	291000			
Estanho	Sn	80	Mercúrio	Hg	0,02	Sódio	Na	25000			
Estrôncio	Sr	300	Molibdênio	Mo	1,5	Tálio	Tl	0,45			

ANEXO 4

Tabela A 4: Características de equipamentos de concentração gravítica (Adaptado de Burt (1986)).

Equipamentos	Intervalo de tamanhos (mm)	Capacidade (t/h)	Custo de investimento (× 1000U\$/th)	Aplicações mais comuns					Estágios de utilização			
				C	A	M	I	R	Regular	Cleaner	Scruenger	Circuitos fechados
Ciclones MD	50 – 0,3	Até 100	Nd	X		X	X	X	X	X		
Jigues Baum	250 – 0,3	Até 800	1,2 – 2,5	X		X			X			
Jigues de diafragma	20 – 0,15	Até 5	Nd		X	X		X	X	X	X	
Jigues Circular	25 – 0,06	Até 350	1 – 1,3		X					X		
Jigues Pneumáticos	20 – 0,5	Até 20	Nd	X					X	X		
Calha Simples	25 – 0,25	Até 500	Nd		X				X		X	
Calha Estrangular	2 – 0,075	0,5 – 2	Nd		X				X		X	
Mesas Concentradoras	3 – 0,025	0,2 – 2	2,5 – 50	X		X	X	X	X	X		
Concentrador Centrifugo	0,05 – 0,005	1 - 15	1 – 25		X	X			X			X
Concentrador Falcon	6 – 0,005	Ate 100	2 – 4	X	X							X
Concentrador Kelson	6 – 0,005	0,7 - 35	1 – 25	X	X				X		X	X

- **Especificações:** C - carvão; A - minérios de aluvião; M - minerais metálicos; I - minerais industriais; R - reciclagem de materiais secundários e Nd - não disponível.

ANEXO 5

Tabela A 5: Tabela de densidades relativas dos minerais ()

Tabela de Densidades Relativas

Tantalita	5,18–8,20	Hemimorfita	3,40–3,50	Augelita	2,7
Cassiterita	6,8 –7,1	Hiperstênio	3,4 –3,5	Mármore	
Wulfenita	6,7 –7,0	Sinhalita	3,47–3,49	ônix	2,7
Cerussita	6,46–6,57	Idocrásio	3,32–3,42	Labradorita	2,69–2,7
Cuprita	5,85–6,15	Dumortierita	3,26–3,41	Coral	2,6 –2,7
Fosgenita	6,13	Epídoto	3,4	Vivianita	2,6 –2,7
Crocoíta	5,9–6,1	Rodizita	3,4	Iolita	2,58–2,66
Scheelita	5,1 –6,1	Purpurita	3,2 –3,4	Aventurina	2,65
Zincita	5,66	Peridoto	3,27–3,36	Cristal de	
Proustita	5,57–5,64	Jadeíta	3,35	rocha	2,65
Pirita	5,0 –5,2	Tanzanita	3,28–3,35	Citrino	2,65
Hematita	4,95–5,12	Diopásio	3,28–3,35	Prasiolita	2,65
Titanato de		Kornerupina	3,27–3,31	Quartzo	
estrôncio	5,13	Diopésidio	3,27–3,31	rôseo	2,65
Cromita	4,1 –4,9	Axinita	3,27–3,29	Quartzo en-	
Ilmenita	4,72	Ekanita	3,28	fumaçado	2,65
Zircão	3,90–4,71	Enstatita	3,26–3,28	Ametista	2,65
YAG	4,6	Turmalina	3,02–3,26	Feldspato	
Barita	4,5	Sillimanita	3,25	aventurino	2,62–2,65
Smithsonita	4,3 –4,5	Smaragdita	3,25	Ágata	2,60–2,65
Psilomelana	±4,35	Apatita	3,17–3,23	Eleolita	2,55–2,65
Witherita	4,27–4,35	Hiddenita	3,15–3,20	Calcedônia	2,58–2,64
Rutilo	4,20–4,30	Kunzita	3,16–3,2	Crisoprásio	2,58–2,64
Calcopirita	4,1 –4,3	Lazulita	3,1 –3,2	Peristerita	2,61–2,63
Espessartita	4,12–4,20	Fluorita	3,18	Ágata musgo	2,58–2,62
Almandina	3,95–4,20	Andaluzita	3,12–3,18	Pedra-da-lua	2,56–2,62
Vidro	3,15–4,20	Magnesita	3,00–3,12	Ortoclásio	2,56–2,60
Willemita	3,89–4,18	Euclásio	3,10	Pseudofita	2,5 –2,6
Painita	4,1	Tremolita	2,9 –3,1	Variscita	2,4 –2,6
Esfalerita	4,08–4,10	Actinolita	3,03–3,07	Obsidiana	2,3 –2,6
Coríndon	3,96–4,01	Amblygonita	3,01–3,03	Howita	2,53–2,59
Rubi	3,97–4,08	Nefrita	2,90–3,02	Sanidínio	2,57–2,58
Safira	3,99–4,00	Danburita	3,00	Amazonita	2,56–2,58
Celestita	3,97–4,00	Datolita	2,90–3,00	Tugtupita	2,36–2,57
Gahnita	3,58–3,98	Brasilianita	2,98–2,99	Leucita	2,45–2,50
Anatásio	3,82–3,95	Anidrita	2,90–2,99	Cancrinita	2,4 –2,5
Malaquita	3,75–3,95	Fenacita	2,95–2,97	Apopilita	2,30–2,50
Azurita	3,70–3,90	Dolomita	2,85–2,95	Colemanita	2,42
Periclásio	3,70–3,90	Aragonita	2,94	Haüyna	2,4
Chalibita	3,85	Prehnita	2,87–2,93	Petalita	2,40
Demantóide	3,82–3,85	Jaspe	2,58–2,91	Thomsonita	2,3 –2,4
Estaurolita	3,70–3,80	Lápis-lazúli	2,4 –2,9	Crisocola	2,00–2,40
Piropo	3,65–3,80	Berilonita	2,80–2,85	Moldavita	2,32–2,38
Uvarovita	3,77	Wardita	2,81	Hambergita	2,35
Alexandrita	3,70–3,73	Esteatito	2,70–2,80	Alabastro	2,30–2,33
Crisoberilo	3,70–3,72	Turquesa	2,60–2,80	Sodalita	2,13–2,29
Rodonita	3,40–3,70	Serpentina	2,4 –2,8	Natrólita	2,20–2,25
Rodocrosita	3,30–3,70	Garnierita	2,3 –2,8	Opala	1,90–2,20
Cianita	3,65–3,69	Esmeralda	2,67–2,78	Enxofre	2,05–2,08
Benitoíta	3,65–3,68	Pérola	2,60–2,78	Espuma-do-	
Grossulária	3,60–3,68	Berilo	2,65–2,75	mar	2,00
Baritocalcita	3,66	Bytownita	2,71–2,74	Ulexita	1,9 –2,0
Espinélio	3,58–3,61	Escapolita	2,57–2,74	Marfim	1,7 –2,0
Taaffeíta	3,6	Calcita	2,71	Gaylussita	1,99
Topázio	3,53–3,56	Água-mari-		Kurnakovita	1,86
Diamante	3,47–3,55	nha	2,67–2,71	Jet	1,30–1,35
Titanita	3,52–3,54	Olho-de-Ti-		Ámbar	1,05–1,30

ANEXO 6

Tabela A5: Características da mesa concentradora usada.

Modelo	Wifley
Tamanho	13-A
Comprimento	101,6 <i>cm</i>
Largura	49,8 <i>cm</i>
Motor	$\frac{1}{4}$ <i>hp</i> 1.1kw
Capacidade	0,5 a 2,5 <i>ton/dia</i>