



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA
RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

**OPTIMIZAÇÃO DO ESTÁGIO PRIMÁRIO DE MODO A REDUZIR O TEOR DE
CONTAMINANTES DO PRODUTO IP2 NO CIRCUITO DE ILMENITE A NA PLANTA
DE SEPARAÇÃO MINERAL DA KENMARE**

Autora:

Rangel, Loma Saraiva

Supervisor:

Prof. Doutor António Cumbane, Eng.º

Maputo, Agosto de 2025



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

**OPTIMIZAÇÃO DO ESTÁGIO PRIMÁRIO DE MODO A REDUZIR O TEOR DE
CONTAMINANTES DO PRODUTO IP2 NO CIRCUITO DE ILMENITE A NA PLANTA
DE SEPARAÇÃO MINERAL DA KENMARE**

Autora:

Rangel, Loma Saraiva

Supervisor:

Prof. Doutor António Cumbane, Eng.º

Maputo, Agosto de 2025

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que a estudante Loma Saraiva Rangel entregou no dia ____/____/2025 as ____
cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____,
intitulado: Optimização do estágio primário de modo a reduzir o teor de contaminantes
do produto IP2 no circuito de ilmenite A na planta de separação mineral da Kenmare.

Maputo, ____ de _____ de 2025

O Chefe de Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Loma Saraiva Rangel, estudante do curso de Engenharia Química da Universidade Eduardo Mondlane, declaro, para os devidos fins, que o presente trabalho é fruto exclusivo do meu esforço e dedicação, reflectindo fielmente as minhas pesquisas, análises e aprendizagens. Declaro ainda que todas as fontes de informação, ideias e dados utilizados foram devidamente referenciados e citados conforme as normas académicas vigentes, não havendo qualquer tipo de plágio ou uso indevido de conteúdos alheios. Assumo plena responsabilidade pela autenticidade e veracidade deste trabalho.

Maputo, _____ de _____ de 20 _____

(Loma Saraiva Rangel)

Supervisor

(Prof. Doutor António Cumbane, Eng.º)

Chefe do Departamento

(Prof. Doutor Clemêncio Nhantumbo, Eng.º)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, meu criador bondoso e misericordioso, pela capacitação que me concedeu dia após dia, permitindo que eu chegasse até aqui.

Dedico também à minha família, aos meus pais e irmãos, pelo apoio constante, pelos momentos de conforto e pelas críticas construtivas que me ajudaram a crescer e a alcançar esta etapa.

AGREDECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecer a Deus, pela força e capacitação que tem me dado a cada dia, pelo seu mover na minha vida e pela salvação em Cristo Jesus.

Em segundo lugar, expresso a minha profunda gratidão à minha família, que tem sido o meu maior suporte: ao meu pai, Paulo Rangel, e à minha mãe, Angélica Uqueio, pelo amor incondicional, pelos sacrifícios e pelo incentivo constante, pois sem eles eu não teria chegado até aqui. Aos meus irmãos Danisse, Ervin e Ana, pelo apoio emocional e pelo carinho que me têm dado em todas as fases da minha vida. Agradeço, de forma especial, à minha prima Letícia Uqueio por me estimular, com firmeza e dedicação, a nunca desistir dos meus objetivos.

Agradecer à empresa Kenmare pela oportunidade concedida de realizar o estágio, permitindo-me vivenciar os desafios reais da indústria, conhecer de perto o ambiente profissional e absorver a cultura do “trabalho seguro”.

Gostaria também de agradecer ao meu supervisor António Cumbane, pela orientação, pela confiança depositada em mim e pelo acompanhamento constante durante a elaboração do relatório de estágio.

Sou grata aos meus supervisores na Kenmare, Paulo Brazão e Azevedo Leite, pela orientação atenta e pelo apoio contínuo ao longo do estágio. Agradeço especialmente ao Douglas Parruque e ao Mário Coana pelo apoio técnico e pelo valioso conhecimento compartilhado. Agradeço ainda a Simon Blancher e António Matsinhe pelo suporte constante ao longo de todo o estágio.

Agradeço as minhas colegas que estiveram ao meu lado nesta jornada: Anilda, e Celestina, pela valiosa contribuição com críticas construtivas que enriqueceram o meu trabalho. Agradeço igualmente à Lile Ndzevo pelos conselhos sábios e pela partilha generosa do seu conhecimento.

Por fim, deixo o meu agradecimento aos meus colegas de turma Laquiasse, Shirley, Cufasse, Isolda, Déklin, Anilda, Aucénia e Stélio pela amizade sincera, pela convivência harmoniosa e pelos momentos inesquecíveis que partilhámos ao longo destes anos.

RESUMO

Moçambique é reconhecido pela sua riqueza em minerais pesados, como a ilmenite, o rutilo e o zircão, cuja exploração, destacando-se o projecto de Moma operado pela Kenmare Resources, impulsiona a economia nacional, gera emprego e atrai investimentos estrangeiros. No contexto do beneficiamento mineral, processos como a separação magnética e a separação electrostática são fundamentais para a obtenção de produtos com elevada grau de pureza.

O presente estudo, desenvolvido no âmbito de estágio profissional na Kenmare, teve como objectivo otimizar o estágio primário do circuito de ilmenite A para reduzir o teor de contaminantes críticos (P_2O_5 e U+Th) no produto IP2, assegurando conformidade com as especificações comerciais e regulatórias. A abordagem experimental consistiu em ensaios na corrente Mag 1, variando parâmetros operacionais como posição do divisor de descarga e velocidade do tambor magnético, seguidos de análises químicas por XFR e testes de fraccionamento magnético.

Os resultados mostraram que a posição intermédia do divisor (2 mag), associada à velocidade de 100%, apresentou maior eficiência na rejeição de contaminantes sem comprometer significativamente o rendimento, enquanto velocidades excessivamente baixas aumentaram a retenção de partículas indesejadas. Foi evidenciado que a configuração operacional otimizada é mais eficaz do que ajustes isolados de velocidade.

Assim como noutros estudos conduzidos na Kenmare, verificou-se que ajustes precisos nos parâmetros de separação magnética são determinantes para maximizar a pureza e a recuperação. No caso específico do IP2, a recomendação final é adoptar a configuração do divisor 2 mag e manter a velocidade de operação 100%, de forma a garantir qualidade estável e competitividade no mercado internacional.

Palavras-chave: ilmenite, separação magnética, optimização de processo, contaminantes, P_2O_5 , U+Th.

ABSTRACT

Mozambique is recognised for its wealth of heavy minerals such as ilmenite, rutile, and zircon, whose exploitation, particularly the Moma Project operated by Kenmare Resources, drives the national economy, generates employment, and attracts foreign investment. In the context of mineral beneficiation, processes such as magnetic separation and electrostatic separation are fundamental for obtaining products with a high degree of purity.

The present study, developed as part of a professional internship at Kenmare, aimed to optimise the primary stage of the Ilmenite A circuit to reduce the content of critical contaminants (P_2O_5 and U+Th) in the IP2 product, ensuring compliance with commercial and regulatory specifications. The experimental approach consisted of tests on the Mag 1 stream, varying operational parameters such as discharge splitter position and magnetic drum speed, followed by chemical analyses using XRF and magnetic fractionation tests.

The results showed that the intermediate splitter position (2 mag), associated with 100% drum speed, presented higher efficiency in rejecting contaminants without significantly compromising yield, while excessively low speeds increased the retention of unwanted particles. It was evidenced that the optimised operational configuration is more effective than isolated speed adjustments.

As observed in other studies conducted at Kenmare, precise adjustments of magnetic separation parameters are crucial for maximising purity and recovery. In the specific case of IP2, the final recommendation is to adopt the 2 mag splitter configuration and maintain 100% operating speed, in order to ensure stable quality and competitiveness in the international market.

Keywords: ilmenite, magnetic separation, process optimisation, contaminants, P_2O_5 , U+Th.

Índice

Lista de símbolos.....	vii
Lista de abreviatura	vi
Lista de gráficos	viii
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas.....	x
CAPÍTULO 1: Introdução	1
Objectivos.....	2
Objectivo geral	2
Objectivos específicos	2
Formulação do problema	2
Justificativa	4
Metodologia	4
CAPÍTULO 2: Revisão bibliográfica.....	6
Minerais pesadas	6
Definição e características dos minerais pesados	8
Ilmenite	10
Aplicações de ilmenite	13
Contaminantes do produto de ilmenite.....	14
Monazita.....	14
Separação magnética	17
Propriedades magnéticas.....	19
Fundamentos da Separação Magnética de Minerais	22
Separadores magnéticos de tambor	23
Separador de rolo magnético induzido	26
Variáveis que afectam o processo de separação magnética.....	28
Aplicações do processo de separação magnética	29
Vantagens e limitações da separação magnética	29
CAPÍTULO 3: Parte experimental.....	31
Descrição do local do estágio.....	31

Materias e equipamentos usados.....	33
Primeira fase: no circuito de ilmenite A	34
Avaliação e Escolha do Equipamento	34
Segunda fase: no laboratório (Separação magnética)	36
CAPÍTULO 4: Análise, discussão e tratamento dos resultados experimentais	38
Eficiência de separação do contaminante U+Th	38
Eficiência de separação do contaminante P_2O_5	43
Separação magnética: fracionamento	46
CAPÍTULO 5: Conclusões e Recomendações.....	48
Conclusões.....	48
Recomendações	49
CAPÍTULO 6: Referências bibliográficas.....	50

Lista de símbolos

%	Porcentagem
Amp	Amperes
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
U+Th	Urânio e Tório

Lista de abreviatura

CV	Conveia
DM	Drum magnetic
HMC	Heavy minerals concentrate
IP1	<i>Ilmenite product 1</i>
IP2	<i>Ilmenite product 2</i>
IP3	<i>Ilmenite product 3</i>
IP4	<i>Ilmenite product 4</i>
IRMS	<i>Induced roll magnetic separator</i>
Mag 1	Fracção magnética 1
Mag 2	Fracção magnética 2
Mids	Fracção intermediária
MSP	Mineral Plant Separation
Nmag	Fracção não magnética
Ppm	Partes por milhão
WHIMS	Wet high intensity magnetic separation
XRF	Fluorescência de raio

Lista de gráficos

Gráfico 1: Variação dos teores de P_2O_5 (%) e U+Th (ppm) no produto IP2 ao longo do tempo. -----	3
Gráfico 2: Curvas de recuperação acumulada do contaminante (U+Th) em função do rendimento acumulado da conveia 5030. -----	38
Gráfico 3: Recuperação (%) de U+Th nos dos testes no rendimento fixo de 30% (Interpolação linear)-----	40
Gráfico 4: Teor de U+Th na corrente Mag 1 sob diferentes velocidades de rotação do tambor magnético-----	42
Gráfico 5: Curvas de recuperação acumulada do contaminante (P_2O_5) em função do rendimento acumulado da conveia 5030. -----	43
Gráfico 6: Recuperação (%) do P_2O_5 nos testes no rendimento fixo de 30% (Interpolação linear)-----	44
Gráfico 7: Teor de P_2O_5 na corrente Mag 1 sob diferentes velocidades de rotação do tambor magnético.-----	45
Gráfico 8: Composição percentual da corrente Mag 1 nos testes de fracionamento magnético. -----	47

Lista de figuras

Figura 1: Diagrama mostrando as tonelagens de ilmenite, rutilo e zircão na África do Sul, zonas costeiras e offshore de Moçambique. Fonte: Assane (2012).	6
Figura 2: (a) Detalhe da localização da Mina de Moma na costa nordeste de Moçambique, província de Nampula; (b) Mapa de localização da Mina de Moma no contexto africano.(Kenmare Resources plc , n.d.)	7
Figura 3: Visão de mundo sobre (a) recursos primários de titânio, (b) ilmenite extraída, (c) reservas de ilmenite, (d) rutilo extraído e (e) reserva de rutilo	10
Figura 4: Ilmenite em forma de areia concentrada.....	11
Figura 5: (a) dióxido de titânio e (b) exemplo de aplicação do cloreto de titânio em cosméticos.....	14
Figura 6: Grãos de monazite em sedimento de areia pesada	15
Figura 7: Representação esquemática do processo de separação magnética	18
Figura 8: Diagrama esquemático do alinhamento dos momentos magnéticos.	19
Figura 9: Separador de tambor magnético (drum magnetic separator) com ímanes de terras-raras..	24
Figura 10: Diagrama esquemático de um separador magnético de rolos induzido.....	27
Figura 11: Representação esquemática do processo de separação magnética num separador magnético de tambor na Kenmare.....	32
Figura 12: Separador magnético de tambor em diferentes posições.....	34
Figura 13: Demonstração da posição do divisor em diferentes testes.....	35
Figura 14: Separador de rolo induzido na escala laboratorial	37

Lista de tabelas

Tabela 1: Especificações químicas do IP2.....	2
Tabela 2: Característica de ilmenite pura	11
Tabela 3: Classificação dos teores de TiO_2 contidos nas areias minerais e as suas densidades específicas	12
Tabela 4: Diferenciação industrial entre ilmenite, leucoxena e rutilo.	13
Tabela 5: Composição percentual (massa) de terras raras e tório (Th) em alguns minerais.	16
Tabela 6: Principais minerais com propriedades magnéticas	21
Tabela 7: Materias e equipamentos usados durante a experiência.	33
Tabela 8: Parâmetros operacionais das condições iniciais da experiência.	35

CAPÍTULO 1: Introdução

As areias pesadas de Moma, localizadas em Moçambique, são uma fonte valiosa de recursos minerais utilizados em diversas indústrias ao redor do mundo. Localizada na província de Nampula, esta região é conhecida por sua riqueza em titânio, zircão, ilmenite e rutilo, minerais que exercem uma função determinante na produção de pigmentos, cerâmica, produtos químicos e tecnologia de ponta (Moçambique hoje, 2023). A Kenmare Moma é reconhecida como uma das maiores operações de exploração de areias minerais em África, desempenhando um papel estratégico na economia moçambicana. Localizada na província de Nampula, a operação é responsável pela extracção de minerais pesados como ilmenite, zircão e rutilo (Profile.co.mz, n.d.). Em relação ao processo de beneficiamento, a Kenmare aplica uma abordagem tecnológica integrada que vai além da simples extracção. Após a remoção do material por dragas em três unidades denominadas *Wet Concentrator Plants* (WCPs), os minerais são inicialmente separados por gravidade. Em seguida, passam por processos de separação magnética e eletrostática realizados na *Mineral Separation Plant* (MSP), o que permite a obtenção de produtos finais purificados: ilmenite, zircão, rutilo e concentrado de areias minerais que são posteriormente armazenados e exportados (Mining technology, 2020).

Este documento resulta da realização do Estágio Profissional, componente curricular do curso de Engenharia Química ministrado pela Universidade Eduardo Mondlane. O estágio foi realizado na empresa Kenmare Moma Mining (Mauritius) Limited, localizada no distrito de Larde, província de Nampula, Moçambique, realizado entre Março e Junho de 2025. Este relatório tem como foco a optimização do estágio primário do circuito de ilmenite A, uma das unidades responsáveis pelo tratamento das areias minerais pesadas, com destaque para a produção de ilmenite, um dos bens de maior destaque nas exportações da empresa. O estudo centrou-se na identificação de limitações operacionais que afectam o desempenho do circuito, tal como desempenho dos equipamentos de separação. Esta pesquisa tem como razão principal a busca pela melhoria da eficiência do processo de separação, garantindo maior qualidade e recuperação do produto final.

Objectivos

Objectivo geral

Optimizar os parâmetros operacionais do estágio primário do circuito de ilmenite A de modo a reduzir contaminantes P_2O_5 e U+Th no produto IP2.

Objectivos específicos

1. Avaliar a influência da posição do divisor e velocidade do tambor na eficiência da separação;
2. Avaliar a composição química das fracções obtidas por fraccionamento magnético;
3. Identificar a condição operacional que assegure maior pureza do IP2 com bom desempenho na recuperação metalúrgica.

Formulação do problema

Apesar dos rigorosos controlos de qualidade e processos de beneficiamento implementados pela Kenmare, a presença de contaminantes nos produtos minerais é um desafio inerente à indústria de mineração. Estes contaminantes podem ter diversas origens, desde a própria composição geológica do minério até impurezas introduzidas durante as etapas de extracção e processamento (Farjana, 2018).

O circuito de separação Ilmenite A, responsável por uma das principais etapas de concentração de minerais pesados, tem vindo a evidenciar desafios operacionais significativos relacionados com a qualidade do produto final conhecido como IP2.

Tabela 1: Especificações químicas do IP2.

TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	U+Th (ppm)	Cr ₂ O ₃ (%)
≥ 49.5	≤ 0.03	≤ 100	0.03

Fonte: MSP daily minutes, 2023

Observa-se, com frequência crescente, a presença de níveis elevados de contaminantes nesse produto, o que compromete directamente a sua pureza e, por consequência, a sua valorização no mercado. Esses contaminantes, entre os quais se destacam o pentóxido

de fósforo (P_2O_5), o tório (Th) e o urânio (U), são elementos que, mesmo em concentrações relativamente baixas, têm um impacto crítico na aceitabilidade do produto final IP2 ao longo do período analisado.

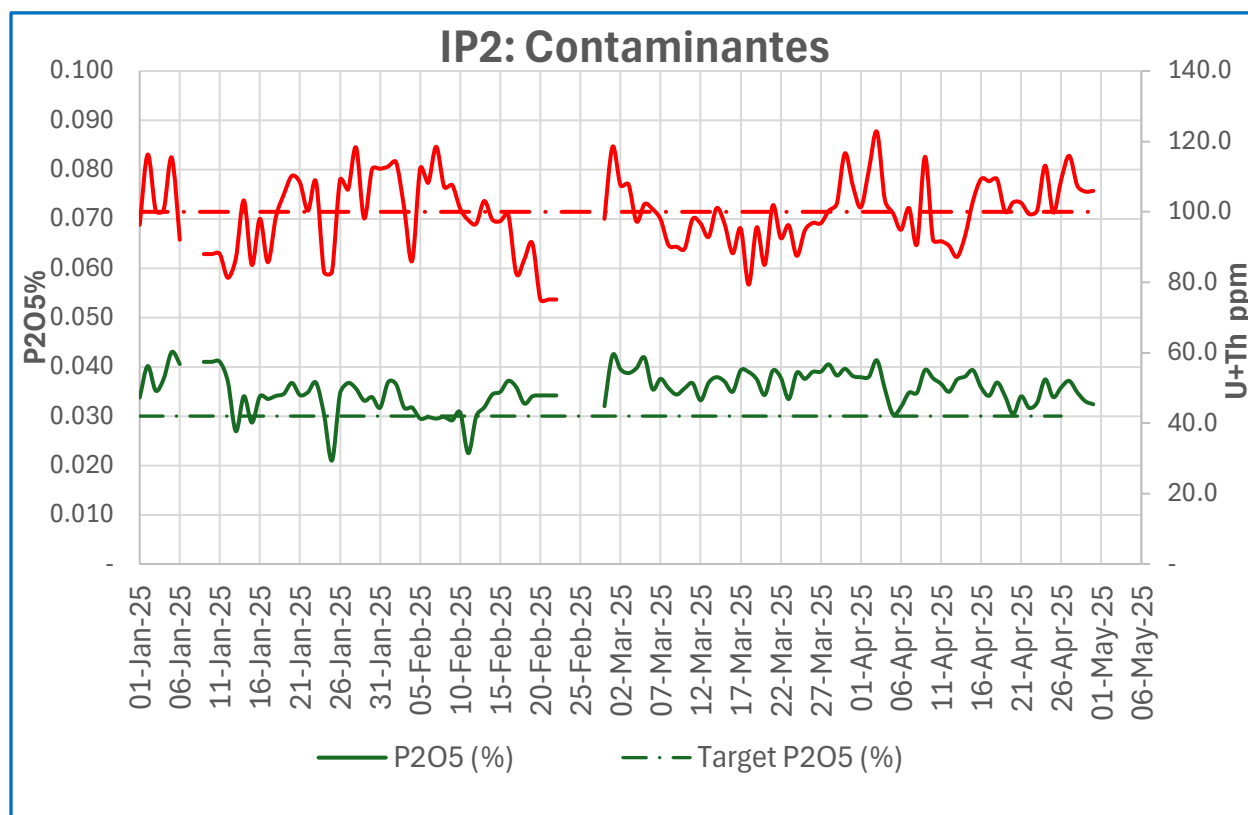


Gráfico 1: Variação dos teores de P_2O_5 (%) e U+Th (ppm) no produto IP2 ao longo do tempo.

Fonte: Dados obtidos na planta de separação mineral.

Ao analisar o comportamento dos contaminantes no produto IP2 conforme o gráfico acima, verifica-se que o teor de P_2O_5 apresentou oscilações frequentes, variando entre aproximadamente 0,020% e 0,045%, com valores acima da meta operacional de 0,030% em diversos momentos. Essa instabilidade indica que o processo actual não garante de forma consistente a manutenção do parâmetro dentro da especificação desejada, podendo comprometer a qualidade química do produto. No caso do U+Th, observou-se uma concentração média em torno de 100 ppm, com variações entre aproximadamente 60 ppm e 125 ppm. Embora a média se mantenha relativamente estável, picos superiores

a 120 ppm sugerem que, em determinadas condições operacionais, a eficiência na remoção desses elementos radioativos é insuficiente, o que pode representar riscos tanto para a conformidade regulatória quanto para a aceitação comercial do produto.

Justificativa

A crescente exigência do mercado internacional por minerais pesados com elevados padrões de pureza torna imperativa a otimização dos processos de separação aplicados na produção de ilmenite. No circuito Ilmenite A, da empresa Kenmare, observou-se uma tendência persistente de elevação dos níveis de contaminantes críticos como o pentóxido de fósforo (P_2O_5), tório (Th) e urânio (U) no produto final IP2. Estes elementos, mesmo em baixas concentrações, comprometem significativamente a qualidade do produto, afectando não só a sua valorização comercial como também o cumprimento de especificações técnicas exigidas pelos mercados compradores.

Metodologia

A elaboração deste relatório de estágio foi orientada por uma abordagem metodológica que integrou pesquisa teórica, observação em campo, execução experimental, análise de dados e sistematização dos resultados. As etapas seguidas estão descritas a seguir:

I. Revisão bibliográfica

O primeiro passo foi a execução de uma pesquisa bibliográfica abrangente, consultando fontes técnicas confiáveis como livros especializados, artigos científicos e relatórios técnicos. Essa pesquisa serviu de base para compreender os processos e conceitos envolvidos na experiência. Além disso, o entendimento dos processos foi complementado com o acompanhamento e suporte dos trabalhadores da empresa Kenmare.

II. Exposição de campo e planeamento dos ensaios

A etapa de inserção prática decorreu na mineradora Kenmare, onde foi possível acompanhar de perto os processos industriais envolvidos na separação magnética do circuito Ilmenite A. A atenção foi centrada no primeiro estágio do circuito de ilmenite.

III. Tratamento dos dados e análise de resultados

As amostras recolhidas foram submetidas a análises por fluorescência de raios X (XRF) para determinar a composição química e identificar contaminantes. Os dados obtidos foram organizados em tabelas e gráficos comparativos, permitindo avaliar o desempenho dos testes realizados durante a experiência.

IV. Estruturação do relatório

A fase final consistiu na organização e sistematização de todas as informações recolhidas ao longo do trabalho. Nessa etapa, foram integradas as análises da literatura consultada, os dados obtidos experimentalmente, os procedimentos adoptados e a discussão dos resultados. O relatório foi realizado em conformidade com as normas actualmente estabelecidas para os trabalhos de conclusão de curso na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, conforme orientações específicas do Departamento de Engenharia Química.

V. Limitações do estudo

No decorrer deste estudo, verificaram-se algumas limitações que importa assinalar. Em primeiro lugar, não foi possível incorporar outros parâmetros operacionais essenciais para a optimização do processo, como a velocidade de alimentação, o que poderia ter proporcionado uma análise mais abrangente da eficiência do separador magnético.

Adicionalmente, o facto de as experiências terem sido conduzidas directamente na planta industrial da empresa Kenmare implicou certas restrições, nomeadamente a variabilidade nas condições de operação do circuito. Estas condições, inerentes ao funcionamento contínuo da unidade, dificultaram o controlo rigoroso das variáveis experimentais.

Por fim, verificou-se a ausência de controlo efectivo sobre a alimentação do circuito de ilmenite, o qual, durante o período de ensaio, manteve-se dentro de um intervalo mais amplo, o que pode ter comprometido a precisão das análises realizadas no âmbito deste estudo.

CAPÍTULO 2: Revisão bibliográfica

Minerais pesadas

Entre os principais minerais economicamente explorados destacam-se a ilmenite, rutilo, leucóxeno, zircão, monazita, granada e sillimanite. Os depósitos destes minerais ocorrem em cerca de 45 países, com maior expressão nas regiões costeiras banhadas pelo oceano Índico, incluindo África, Ásia e Austrália. Tais depósitos podem ser classificados como primários, resultantes de processos magmáticos, hidrotermais e metamórficos; ou secundários, originados por meteorização, erosão e transporte. (Dushyantha et al., 2020).

Moçambique destaca-se mundialmente pela sua riqueza em minerais pesados de titânio, como a ilmenite, zircão e rutilo, extraídos ao longo de cerca de 2.700 km da costa do Oceano Índico. Estes minerais, usados em sectores estratégicos como a indústria aeroespacial, electrónica e de pigmentos, representam um setor-chave da economia nacional, com forte impacto no volume de exportações. As maiores reservas encontram-se nas províncias de Nampula e Zambézia, com destaque para a Mina de Moma, responsável por grande parte da produção nacional (Mozambique Expert, n.d.).

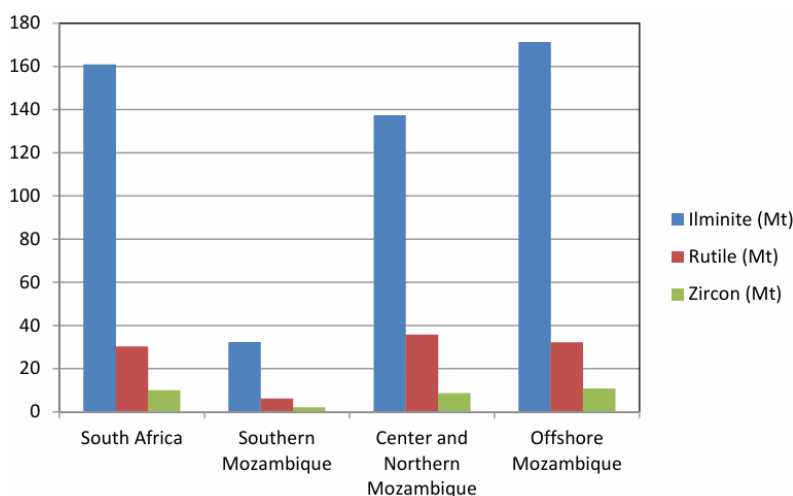


Figura 1: Diagrama mostrando as toneladas de ilmenite, rutilo e zircão na África do Sul, zonas costeiras e offshore de Moçambique.

Fonte: Assane (2012).

1. Mina de Minerais de Titânio de Moma

Segundo a *Mozambique Expert*, a Mina de Moma apresenta as seguintes características:

- **Localização:** Província de Nampula, nordeste de Moçambique, aproximadamente 160 km a sul de Nampula, junto à costa do oceano Índico, nas proximidades das localidades de Moma e Angoche. A mina ocupa uma concessão de 23.000 hectares, inserida num sistema de dunas costeiras com elevado teor de areias minerais pesadas.
- **Operador:** Kenmare Resources Plc (Irlanda), cotada na Bolsa de Valores de Londres. A estrutura accionista inclui 84% de participação de investidores privados e 16% do Estado moçambicano, representado pela Empresa Moçambicana de Exploração Mineira (EMEM).
- **Detalhes:** Em operação desde 2007, é considerada uma entre os maiores depósitos de titânio existentes no mundo. Possui recursos estimados em 1,2 mil milhões de toneladas, contendo 4,4% de ilmenite, 0,3% de zircão e 0,1% de rutilo. A infra-estrutura instalada inclui uma planta concentradora húmida, uma unidade de separação mineral e um terminal portuário exclusivo no Porto de Nacala.

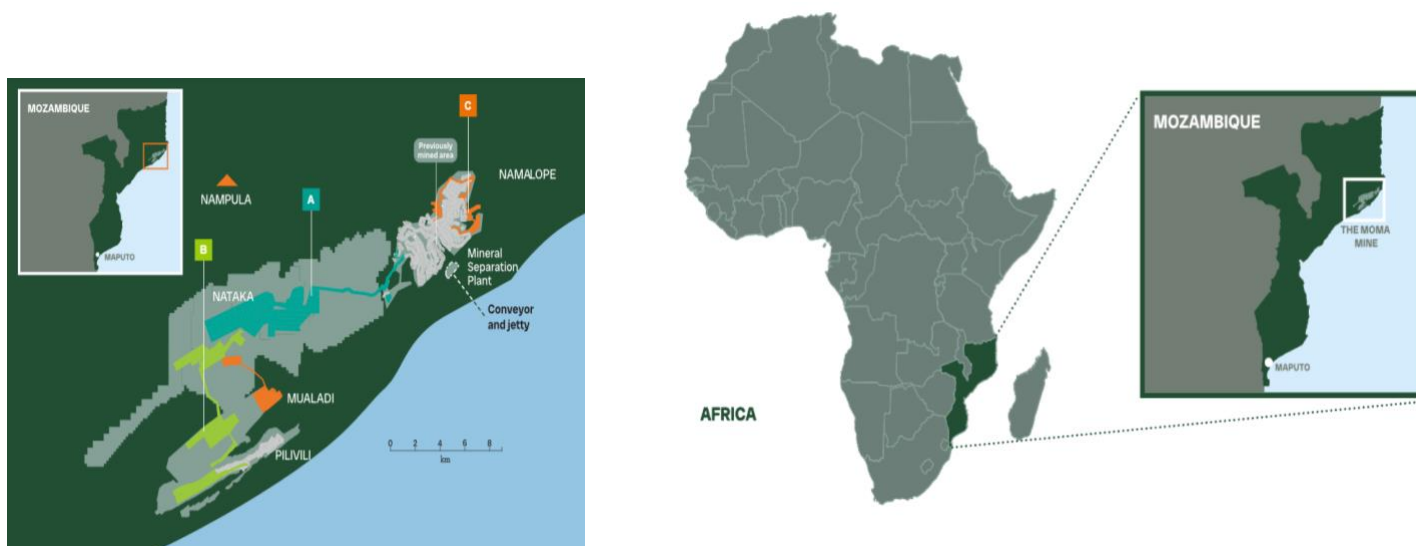


Figura 2: (a) Detalhe da localização da Mina de Moma na costa nordeste de Moçambique, província de Nampula; (b) Mapa de localização da Mina de Moma no contexto africano. (Kenmare Resources plc, n.d.)

Definição e características dos minerais pesados

Segundo Elsner (2012), os minerais pesados são definidos como aqueles que apresentam uma densidade superior à do quartzo, o mineral formador de rochas mais comum nos solos, com densidade de 2,65 g/cm³. Na prática laboratorial, apenas são considerados minerais pesados aqueles com densidade superior à dos líquidos densos normalmente utilizados, como o bromoformo (2,84–2,89 g/cm³) ou o tetrabromometano (2,94 g/cm³), ou seja, os que afundam nesses líquidos. Em contraste, os minerais com densidade inferior, como a maioria das micas, dolomite, aragonite, anidrite, magnesite e o próprio quartzo, são classificados como minerais leves.

Os minerais pesados estão presentes em todos os sedimentos e rochas sedimentares. Contudo, jazidas só se formam quando há um enriquecimento muito elevado desses minerais. As concentrações aproveitáveis (ou economicamente viáveis) de minerais relativamente pesados ou duros que se acumulam devido a processos físicos são conhecidas como placeres ou depósitos aluvionares. Como muitos desses minerais são opacos e escurecem o sedimento quando atingem concentrações elevadas, expressões como areias negras, areias minerais ou *minsands* (com base na literatura australiana) tornaram-se comuns (Elsner, 2012).

Entre os diversos minerais pesados, apenas alguns têm importância económica, devido às suas propriedades e abundância. Estes são chamados de minerais pesados valiosos, ou VHM (*Valuable Heavy Minerals*). Nas referências em inglês, também se usam os termos concentrado de minerais pesados (HMC – *Heavy Mineral Concentrate*) e minerais pesados totais (THM – *Total Heavy Minerals*), referindo-se ao volume total de minerais pesados num depósito. Já os minerais pesados que não têm aproveitamento comercial são chamados de minerais residuais ou rejeitados (*trash minerals*) (Elsner, 2012).

Adicionalmente, a literatura técnica distingue os minerais pesados com base na sua densidade, da seguinte forma:

- Minerais pesados muito densos: com densidade de 6,8 a 21 g/cm³, incluem-se aqui principalmente o ouro, platina e cassiterite;

- Minerais pesados: com densidade de 4,2 a 6,7 g/cm³, tais como ilmenite, rutilo, zircão, monazita, magnetite e cromite;
- Pedras preciosas: com densidade de 2,9 a 4,1 g/cm³, sendo o diamante o principal exemplo.

Contudo, os produtores utilizam uma classificação diferente, também baseada na densidade:

- Minerais pesados leves (em geral não aproveitáveis): com densidade inferior a 3,7 g/cm³, incluem sillimanite, epidoto, hornblenda, andaluzite, turmalina, cianite, entre outros;
- Minerais pesados densos (na maioria exploráveis): com densidade superior a 3,7 g/cm³, tais como ilmenite, leucoxena, granada, rutilo, zircão, monazita, xenotima, entre outros.

Elsner (2012) destaca que os minerais pesados mais frequentemente enriquecidos em placeres e exploráveis comercialmente, destacam-se:

Ilmenite e seus produtos de alteração,
até à leucoxena;

Rutilo e anatásio;

Zircão;

Monazita e xenotima;

Estauroilite;

Minerais de alumínio e sílica, como
cianite, andaluzite e sillimanite;

Minerais do grupo da granada;

Magnetite;

Cromite;

Cassiterite;

Tantalite-columbite;

Wolframite e scheelite

Ilmenite

Moçambique possui depósitos significativos de minerais pesados, incluindo a ilmenite, que o posicionam como um importante produtor global. Em 2017, estimou-se que Moçambique foi o quarto maior produtor de ilmenite do mundo, respondendo por 11% da produção mundial (Bedinger, 2019a). A produção de ilmenite em Moçambique tem sido um factor relevante para a economia nacional. Embora os dados de produção variem anualmente, o país tem mantido uma posição de destaque na extracção deste mineral. A ilmenite, juntamente com o rutilo e o zircão, contribuiu com 4% do total das exportações de Moçambique em 2017, e 5% em 2018, evidenciando a importância do sector de minerais pesados para a balança comercial do país (Plaza-Toledo, 2023)

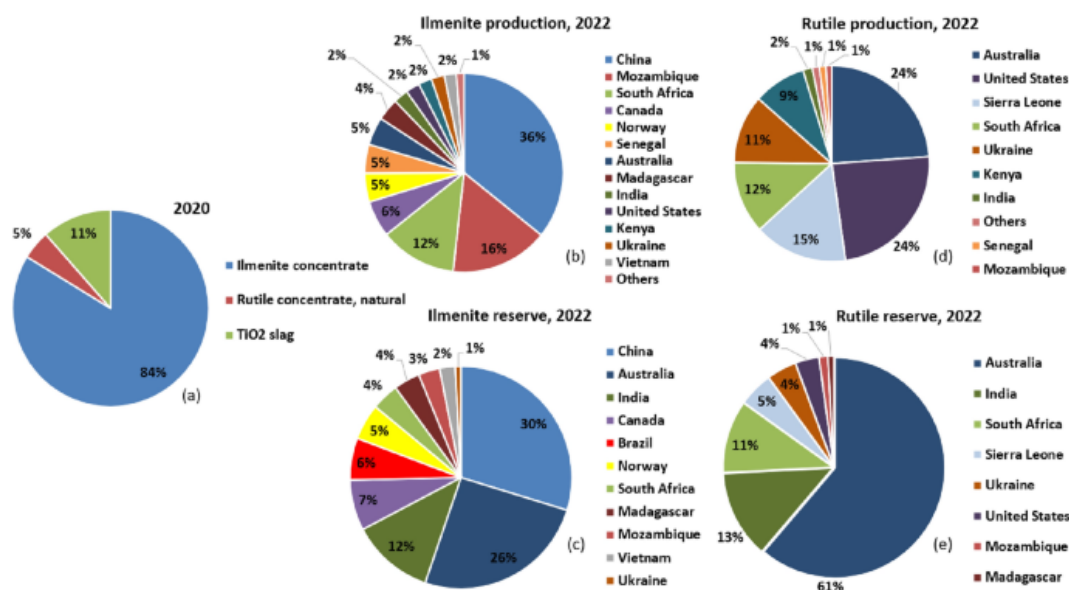


Figura 3: Visão de mundo sobre (a) recursos primários de titânio, (b) ilmenite extraída, (c) reservas de ilmenite, (d) rutilo extraído e (e) reserva de rutilo

Fonte: USGS (n.d.).

A ilmenite é o mineral de titânio mais comum na crosta terrestre e encontra-se amplamente distribuída como mineral acessório em quase todos os tipos de rochas magmáticas, tanto intrusivas como extrusivas. É especialmente significativa em rochas como noritos, gabros e anortositos. Em temperaturas elevadas, superiores a 600 °C, a ilmenite forma uma solução sólida com a hematite (Fe_2O_3). No interior desses cristais

mistos, alguns elementos como o ferro podem ser parcialmente substituídos por magnésio, manganês ou alumínio, e o titânio por magnésio. Com o arrefecimento da rocha, ocorre a separação desses minerais, formando estruturas denominadas titano-hematite, caracterizadas por finas camadas de hematite entrelaçadas com ilmenite (Elsner 2012).

Características da ilmenite pura:

Tabela 2: Característica de ilmenite pura

Fórmula química	FeTiO_3
Composição química	52,66% em massa de dióxido de titânio (TiO_2) 47,34% em massa de óxido de ferro (Fe_2O_3)
Densidade	4,72 g/cm ³
Dureza na escala de Mohs	entre 5 e 5,5
Cor	preta a castanho-escura
Propriedades magnéticas	fortemente paramagnética
Propriedades eletrostáticas	Condutor

Fonte: Adaptado de Elsner (2012).



Figura 4: Ilmenite em forma de areia concentrada

Fonte: Clay Planet. (n.d.)

Após a libertação da ilmenite das rochas sólidas, este mineral sofre alterações químicas induzidas pelo intemperismo. Conforme descrito por Elsner (2012), em ambientes tropicais húmidos, o ferro tende a dissolver-se progressivamente, enquanto o titânio permanece, originando um enriquecimento relativo deste último. Este processo resulta na formação de uma mistura mineral denominada leucoxena, composta principalmente por óxidos de titânio e, em menor grau, por óxidos de ferro. Do ponto de vista estrutural e mineralógico, a transformação da ilmenite em leucoxena não ocorre de forma imediata, mas sim por etapas internas bem definidas. Inicialmente, com a remoção parcial do ferro, forma-se um composto intermediário de estrutura pouco definida conhecido como pseudorutilo. À medida que o ferro é completamente lixiviado da rede cristalina, surgem grãos compostos por pequenos cristais de rutilo e, em menor grau, de anatásio. É este conjunto mineral, rico em TiO_2 , que caracteriza a leucoxena na sua fase mais avançada de alteração (Koroznikova et al., 2007). A transformação da ilmenite em leucoxena é conhecida como leucoxenização, processo que ocorre apenas acima do nível freático, sendo fortemente influenciado pela presença de ácidos húmicos. Este processo reduz significativamente a susceptibilidade magnética da ilmenite, o que tem implicações tanto na prospecção como no processamento (Elsner, 2012). Na prática industrial, a identificação desses produtos é feita com base no teor de dióxido de titânio (TiO_2), sendo que diferentes faixas composicionais são utilizadas como critério para classificar os diferentes estágios da alteração da ilmenite:

Tabela 3: Classificação dos teores de TiO_2 contidos nas areias minerais e as suas densidades específicas

Nome do mineral pesado	Densidade específica	Fórmula química	Intervalo de teor de TiO_2 (%)
Ilmenite	4.7–4.79	FeTiO_3	35–65
Pseudorutilo	3.9	TiO_2	60–65
Leucoxena	4.2–3.9	$\text{FeTiO}_3\text{--TiO}_2$	65–90+
Anatásio	3.8–3.9	TiO_2	>90
Rutilo	4.2–4.3	TiO_2	94–96

Fonte: Koroznikova et al. (2007)

A separação industrial entre ilmenite, leucoxena e rutilo é baseada em propriedades físicas mensuráveis, abrangendo factores como densidade e susceptibilidade magnética. Essas diferenças facilitam a aplicação de técnicas de separação magnética e gravítica no processamento mineral.

Tabela 4: Diferenciação industrial entre ilmenite, leucoxena e rutilo.

Mineral	Densidade	Susceptibilidade magnética
Ilmenite	> 4,1 g/cm ³	Magnética
Leucoxena	< 4,1 g/cm ³	Não magnética
Rutilo	> 4,1 g/cm ³	Não magnética

Fonte: Adaptado de Elsner, 1992

Aplicações de ilmenite

A ilmenite, um minério de titânio abundante, tem sido objecto de estudo para diversas aplicações, especialmente na busca por fontes de energia renováveis. Uma aplicação de destaque encontra-se na produção de superfícies selectivas para colectores solares fototérmicos. Pesquisas indicam que superfícies à base de ilmenite podem apresentar elevada absorvência solar (86%) combinada com baixa emitância térmica (14%), validando seu potencial para essa finalidade (Pamplona, 2022).

1. Produção de dióxido de titânio (TiO₂)

O TiO₂ derivado da ilmenite é largamente empregado como pigmento branco em tintas, revestimentos, plásticos e cosméticos devido à sua alta opacidade e resistência à radiação UV (Barksdale, 1966). Além disso, sua aplicação em protectores solares deve-se à sua capacidade de bloquear raios ultravioleta sem causar irritação à pele (Fujishima et al., 2008).

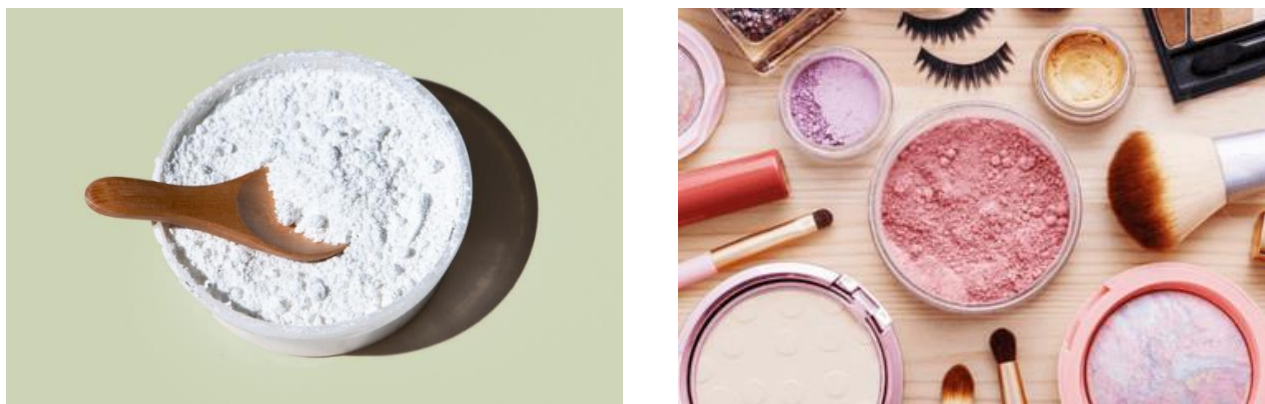


Figura 5: (a) dióxido de titânio e (b) exemplo de aplicação do cloreto de titânio em cosméticos.

Fonte: Adicel. (2023); Pochteca El Salvador. (2023)

2. Metalurgia e produção de ligas

Segundo Gupta & Krishnamurthy (2005), a ilmenite é processada para obtenção de:

- **Ferro-titânio (FeTi)**, uma liga essencial na fabricação de aços especiais e soldagem.
- **Titânio metálico**, obtido por meio do processo de Kroll, que envolve a conversão da ilmenite em TiCl_4 antes da redução magnesiotérmica.

Contaminantes do produto de ilmenite

Durante a extração e beneficiamento da ilmenite, certos elementos químicos podem permanecer como contaminantes, não por fazerem parte da estrutura do mineral, mas por estarem naturalmente presentes nos mesmos depósitos minerais e não serem completamente removidos nos processos de separação. Considerando que a ilmenite corresponde a um óxido composto por ferro e titânio (Fe-Ti), qualquer outro elemento fora dessa estrutura, como Al_2O_3 , Cr_2O_3 , V_2O_5 , Nb_2O_5 , U, SiO_2 , CaO, Th e P_2O_5 , é tratado como contaminante. Entre eles, o cromo, o tório e o urânio são os que mais preocupam os clientes por razões técnicas e ambientais (Jane, 2014)

Monazita

A monazita é um mineral fosfato de terras raras com fórmula geral $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$, podendo também conter outros elementos como cálcio, magnésio, ferro, alumínio,

zircônio, manganês, berílio, estanho, titânio e tântalo em sua estrutura cristalina. Apresenta dureza entre 5 e 5,5 (escala Mohs) e densidade entre 4,8 e 5,5 g/cm³. Suas cores variam de amarelo claro a castanho, laranja, verde-amarelado e castanho-esverdeado. É um mineral opaco, paramagnético e não condutor. A monazita pode incorporar quantidades significativas de tório e urânio, o que a torna naturalmente radioativa e sujeita à metamictização, fenômeno que leva à perda da estrutura cristalina (Elsner, 2012).

Existem três variedades mineralógicas principais:

- ✓ monazita-(Ce),
- ✓ monazita-(La) e
- ✓ monazita-(Nd),

sendo a monazita-(Ce) a mais comum. O mineral frequentemente contém inclusões de outros minerais como zircão, apatita, hematita, biotita e muscovita (Elsner, 2012).

Devido à sua radioatividade e às implicações ambientais e industriais associadas, a presença da monazita no concentrado de ilmenite é particularmente indesejável, pois pode comprometer a qualidade do TiO₂ final. Um estudo realizado na Mina do Guaju, no estado da Paraíba (Brasil), identificou a monazita como o principal contaminante do concentrado final de ilmenite (Santos & Cassini, 2017).



Figura 6: Grãos de monazite em sedimento de areia pesada

Fonte: Estudando Geologia (2012)

Tabela 5: Composição percentual (massa) de terras raras e tório (Th) em alguns minerais.

Componentes	Monazita (%)	Bastnaesita (%)	Xenotima (%)	Gadolinita (%)
La ₂ O ₃	0,3	22,0	25,7	3,2
CeO ₂	44,0	49,8	4,4	2,0
Pr ₆ O ₁₁	5,0	4,8	0,8	2,0
Nd ₂ O ₃	15,0	15,6	2,8	5,0
Sm ₂ O ₃	2,0	1,8	1,2	5,0
Eu ₂ O ₃	0,3	0,05	Traços	Traços
Gd ₂ O ₃	1,0	0,9	2,8	5,0
Tb ₄ O ₇	0,002	—	0,9	0,5
Dy ₂ O ₃	0,1	—	7,6	6,0
Ho ₂ O ₃	0,3	—	1,8	1,0
Er ₂ O ₃	0,05	—	5,9	4,0
Tm ₂ O ₃	0,005	—	0,8	0,6
Yb ₂ O ₃	0,01	—	5,0	4,0
Lu ₂ O ₃	0,001	—	0,3	0,6
Y ₂ O ₃	2,0	0,2	61,5	60,0
ThO ₂	9,0	0,1	0,5	—

Fonte: Adaptado de Abrão (1994).

Segundo Santos e Cassini (2017), os impactos negativos da monazita são:

- ✓ **Qualidade do produto final:** a presença de monazita diminui a pureza do TiO_2 , sendo um factor determinante para aplicações que requerem elevada qualidade, como pigmentos brancos.
- ✓ **Riscos radiológicos:** a monazita constitui a fonte primária de tório (ThO_2), um elemento radioativo. Mesmo em baixas concentrações, a sua presença no concentrado de ilmenite é uma preocupação devido aos riscos radiológicos associados. Estes riscos capazes de afectar a saúde ocupacional dos trabalhadores envolvidos no processamento da ilmenite e também levantar questões sobre a disposição segura dos resíduos.
- ✓ **Ineficiência no processamento:** a existência de monazita livre no concentrado de ilmenite indica uma possível ineficiência nos processos de separação mineral. Isso pode levar a perdas de ilmenite durante a tentativa de remover a monazita, ou exigir etapas de purificação adicionais e mais complexas, aumentando os custos operacionais.
- ✓ **Geração de resíduos:** o processamento de ilmenite contaminada com monazita pode gerar resíduos que requerem tratamento especial devido à sua radioactividade, adicionando complexidade e custo à gestão de resíduos da indústria.

Separação magnética

A separação magnética caracteriza-se como um processo de natureza física no qual partículas discretas são separadas com base em uma competição entre três tipos principais de forças: forças magnéticas de tracção, forças gravitacionais, inerciais ou de fricção, e forças interpartículas, que podem ser atractivas ou repulsivas. Essas forças actuam de forma diferenciada sobre as partículas dependendo das suas propriedades magnéticas, o que permite a separação selectiva dos componentes presentes no material de alimentação (Oberteuffer, 1974). É um processo amplamente utilizado para concentrar materiais com propriedades magnéticas e remover partículas magnetizáveis de misturas ou suspensões fluidas. Essa separação ocorre por meio da aplicação de um campo magnético não homogéneo, que exerce forças diferenciadas sobre as partículas com base em suas características magnéticas. A eficácia do processo depende da

interacção entre a força magnética e outras forças externas, como a gravidade, a inércia, a força centrífuga e as forças hidrodinâmicas, que actuam de forma concorrente sobre as partículas (Svoboda, 2004).

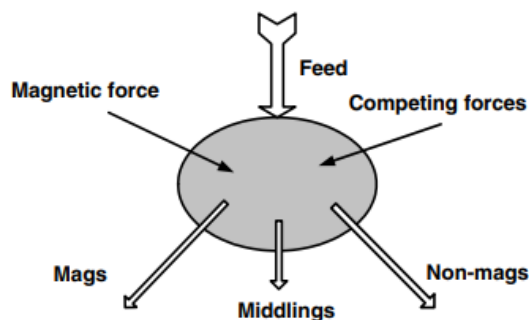


Figura 7: Representação esquemática do processo de separação magnética

Fonte: Svoboda (2004)

De acordo com Svoboda (2004), uma condição necessária (embora não suficiente) para garantir uma separação eficaz entre partículas mais fortemente magnéticas e aquelas menos magnéticas num separador magnético é que a força magnética F_{mag}^m actuando sobre as partículas mais magnéticas seja maior do que a soma das forças concorrentes F_{conc}^{im} . Simultaneamente, para que as partículas fracamente magnéticas não sejam capturadas erroneamente, a força magnética F_{mag}^n sobre elas deve ser menor do que a soma das suas forças concorrentes F_{conc}^{im} . Essas condições são expressas pelas seguintes desigualdades:

$$F_{mag}^m \geq F_{conc}^{im} \text{ e } F_{mag}^n \leq F_{conc}^{im} \quad \text{Equação (1)}$$

Contudo, em situações em que a força magnética aplicada for muito superior às forças concorrentes há o risco de que partículas fracamente magnéticas ou impurezas indesejadas também sejam capturadas, comprometendo a selectividade e a qualidade do produto final.

A eficácia de um separador magnético pode ser avaliada por dois parâmetros principais: a recuperação, que representa a proporção do material magnético recuperado em relação ao total alimentado, e o grau, que indica a pureza do material magnético

concentrado. Esses dois indicadores são independentes entre si e refletem o desempenho do equipamento em termos de selectividade e eficiência, estando directamente relacionados à intensidade relativa das forças magnéticas, gravitacionais, inerciais e interpartículas que actuam durante o processo (Oberteuffer, 1974).

Propriedades magnéticas

Do ponto de vista das propriedades magnéticas, os materiais podem ser organizados em cinco categorias principais: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos. Dentre esses, os três últimos apresentam susceptibilidades magnéticas significativamente mais elevadas e, por essa razão, são frequentemente agrupados sob o termo "ferromagnéticos" em sentido lato (sensu lato) (Svoboda, 2004).

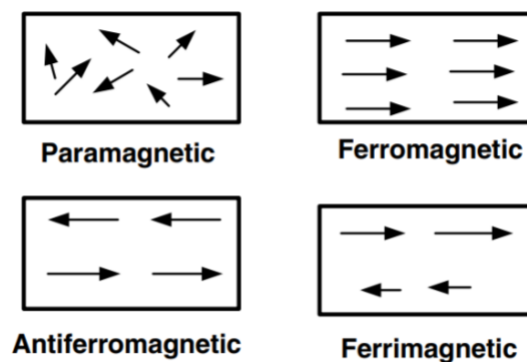


Figura 8: Diagrama esquemático do alinhamento dos momentos magnéticos.

Fonte: Svoboda (2004)

- ✓ **Diamagnéticos:** apresentam susceptibilidade magnética muito pequena e negativa, devido à indução de momentos magnéticos opostos ao campo aplicado. Esse comportamento ocorre em todos os materiais, independentemente da temperatura, mas costuma ser ocultado por efeitos magnéticos mais intensos (Svoboda, 2004).

- ✓ **Paramagnéticos:** possuem átomos ou iões com momentos magnéticos permanentes, mas desordenados em ausência de campo. Ao aplicar um campo magnético, há uma leve orientação desses momentos, gerando magnetização fraca. A susceptibilidade é positiva e decresce com o aumento da temperatura. Alguns elementos são paramagnéticos, como o Ni, Co, Mn, Cr, Ce, Ti, O e metais do grupo Pt, mas na maioria dos casos as propriedades paramagnéticas dos minerais devem-se à presença de ferro em alguma forma ferromagnética (Svoboda, 2004; Wills & Napier-Munn, 2006).

- ✓ **Ferromagnéticos:** têm momentos magnéticos fortemente alinhados devido à interacção de troca entre átomos vizinhos. O ferromagnetismo pode ser considerado um caso especial de paramagnetismo, envolvendo forças muito elevadas. Os materiais ferromagnéticos têm uma elevada susceptibilidade a forças magnéticas e retêm algum magnetismo quando removidos do campo (remanência). Podem ser concentrados em separadores magnéticos de baixa intensidade e o principal mineral ferromagnético separado é a magnetita (Fe_3O_4), embora a hematita (Fe_2O_3) e a siderite (FeCO_3) possam ser ustuladas para produzir magnetita e, portanto, proporcionar uma boa separação (Svoboda, 2004; Wills & Napier-Munn, 2006).

- ✓ **Antiferromagnéticos:** apresentam momentos magnéticos em direcções opostas e de igual magnitude, o que leva ao cancelamento total da magnetização. Embora possuam susceptibilidade positiva, seu comportamento magnético difere dos paramagnéticos por não apresentarem aumento contínuo da magnetização com a redução da temperatura (Svoboda, 2004).

- ✓ **Ferrimagnéticos:** também têm momentos magnéticos organizados em direcções opostas (como nos antiferromagnéticos), mas com magnitudes diferentes, resultando numa magnetização líquida. Possuem propriedades semelhantes aos

ferromagnéticos, como a capacidade de atingir saturação. São encontrados principalmente em ferrites e óxidos mistos de ferro, como a magnetite (Fe_3O_4) e a maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}$) (Svoboda, 2004).

Tabela 6: Principais minerais com propriedades magnéticas

Ferromagnéticos – Faixa de campo de 0,05 a 0,5T			
Ferro		Mangetite	
Magnéticos – Faixa de campo de 0,5 a 1,0T			
Ilmenite	Pirrotita	Franklenita	
Fracamente Magnéticos – Faixa de campo de 1 a 1,8T			
Hematita	Siderita	Apatita	Calcocita
Siderita	Rodocrosita	Tetrahedrita	Cinábrio
Rondonita	Granada	Willmenita	Gesso
Limonita	Serpentinita	Cerussita	Zincita
Braunita	Mica	Dolomia	Ortoclásio
Corindon	Molibdenita	Psilomelana	Epidoto
Pirolusita	Cerargirita	Arsenopirita	Fluorita
Manganita	Huebnerita	Calcopirita	Augita
Calamina	Wolframita	Talco	Hornblenda
Esfarelita	Bornita	Titanita	
Muito fracamente Magnéticos- Faixa de campo acima de 1,8T			
Pirita	Serpentinita	Cobalita	
Smithsonita	Nicolita	Safira	
Esfarelita	Diopsidio	Cassiterita	

Criolita	Turmalina	Ortoclásio
Enargita	Cuprita	Dolomita
Berílio	Galena	Spinélio
Magnesita	Whiterita	Rubi
Azurita	Crisocola	Covelita
Gesso	Rutilo	Feldspato
Malaquita	Mica	Zircão
Não Magnéticos e Diamagnéticos		
Barita	Corindon	Apatita
Bismuto	Topázio	Aragonita
Clacita	Galena	Grafita
Fluorita	Antimônio	

Fonte: Papini (2014) citado por Crisóstomo (2015)

Fundamentos da Separação Magnética de Minerais

A separação magnética pode ser classificada com base no tipo de geração do campo magnético utilizado. Os principais sistemas incluem ímãs permanentes, electroíman, solenóides resistivos e ímãs supercondutores, cada um com características e aplicações específicas dependendo da intensidade de campo exigida no processo (Crisóstomo, 2015). Segundo Number Analytics (2023), os separadores magnéticos podem ser agrupados em categorias distintas, conforme a forma de operação, intensidade de campo e tipo de aplicação:

- **Separadores magnéticos a seco:** operam sem uso de líquidos e são adequados para a separação de minerais em ambientes secos, como no processamento de minério de ferro, carvão e minerais que não sofrem degradação ao ar.
- **Separadores magnéticos húmidos:** utilizam um meio líquido para promover a separação, sendo ideais para minerais que apresentam sensibilidade à oxidação

ou à degradação em meio seco. São amplamente usados em plantas que processam minerais pesados e terras.

- **Separadores de alta intensidade:** aplicam campos magnéticos fortes para recuperar partículas fracamente magnéticas de misturas minerais. São fundamentais na separação de minerais como monazita, zircão e outros minerais portadores de elementos de terras raras.
- **Separadores de baixa intensidade:** utilizam campos magnéticos relativamente fracos, mas são eficientes na separação de minerais fortemente magnéticos, como a magnetite e a ilmenite, especialmente em operações de grande escala.

Separadores magnéticos de tambor

Os separadores magnéticos de tambor são provavelmente o tipo de equipamento de separação magnética mais utilizado. O projecto dos separadores de tambor baseia-se predominantemente na tecnologia de ímanes permanentes, embora tambores electromagnéticos também possam ser ocasionalmente encontrados na prática industrial. Os separadores de tambor são aplicados ao tratamento de tamanhos de partículas, que variam de alguns centímetros a vários micrómetros, e operam em modo seco ou húmido (Svoboda, 2004).

Princípio de funcionamento

O separador de tambor magnético é um equipamento projectado para processar material de forma contínua, separando partículas magnéticas de não magnéticas através da acção combinada de um tambor rotativo e um campo magnético estacionário de alta intensidade. O tambor é fabricado em aço inoxidável e gira em torno de um conjunto magnético fixo, normalmente constituído por ímanes permanentes. Conforme o material avança para a zona de separação, as partículas magnéticas são atraídas e aderem à superfície do tambor, sendo transportadas até uma zona onde o campo magnético é inexistente ou reduzido, onde são descarregadas. As partículas não magnéticas caem livremente por acção da gravidade, sendo recolhidas separadamente (Downer EDI Mining, 2010).

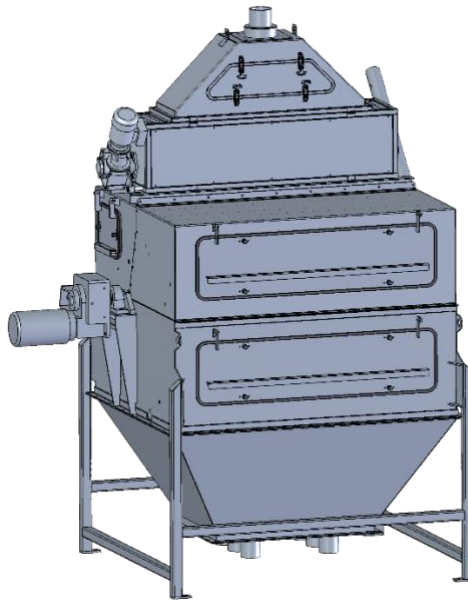


Figura 9: Separador de tambor magnético (drum magnetic separator) com ímanes de terras-raras..

Fonte: IMSC Group (2019)

Componentes principais

Segundo Downer EDI Mining (2010), os componentes principais do separador de tambor magnético são:

- **Tambor rotativo:** estrutura cilíndrica de aço inoxidável, resistente ao desgaste e à corrosão, que contém no seu interior o conjunto magnético.
- **Conjunto magnético estacionário:** formado por ímanes permanentes de alta intensidade, estrategicamente posicionados para criar um campo magnético uniforme na zona de separação.
- **Sistema de alimentação:** controla a distribuição e a taxa de entrada de material sobre o tambor, garantindo uma camada uniforme para maior eficiência.
- **Divisores de descarga:** posicionados de forma ajustável para separar fisicamente os fluxos de produto magnético e não magnético.

- **Estrutura de suporte e accionamento:** motor, rolamentos e estrutura mecânica que garantem a rotação controlada do tambor.

Operação

O material é conduzido para a superfície do tambor através de um alimentador ou correia transportadora. A rotação do tambor e a acção do campo magnético retêm as partículas magnéticas, que permanecem aderidas à superfície até passarem para fora da zona de influência magnética, momento em que caem no ponto de recolha destinado ao concentrado magnético. As partículas não magnéticas seguem a sua trajectória normal, caindo antes dessa zona. A posição do divisor de descarga pode ser ajustada para otimizar a pureza e a recuperação do concentrado (Downer EDI Mining, 2010).

Parâmetros operacionais ajustáveis

Segundo a Downer EDI Mining (2010), os parâmetros operacionais de um separador de tambor magnético são:

- **Velocidade de rotação do tambor:** influencia o tempo de exposição das partículas ao campo magnético e a taxa de recuperação.
- **Intensidade do campo magnético:** pode ser configurada para otimizar a captura de minerais magnéticos ou fracamente magnéticos, como a ilmenite.
- **Posição do divisor de descarga:** adequada conforme as particularidades do material, permitindo separar melhor o concentrado magnético do rejeito.
- **Taxa de alimentação:** deve ser regulada a fim de impedir sobrecarga e comprometer a eficiência do processo.

Aplicações industriais

- Beneficiamento de minerais pesados como ilmenite, rutilo, zircão e monazite.
- Remoção de contaminantes magnéticos de minérios não magnéticos.

- Etapa de pré-concentração antes de separações adicionais por gravidade ou electrostática.
- Processamento de areias minerais e outros depósitos aluviais ricos em minerais pesados.

Vantagens operacionais

- Alta capacidade de processamento contínuo, reduzindo paragens na linha de produção.
- Baixa manutenção, já que o conjunto magnético é fixo e protegido no interior do tambor.
- Flexibilidade de operação devido aos ajustes possíveis na velocidade, intensidade magnética e posicionamento dos divisores.
- Alta eficiência de recuperação, especialmente para minerais fracamente magnéticos que exigem campos mais intensos.

Separador de rolo magnético induzido

O separador de rolo magnético induzido (IMR) mostrado na figura 10 consiste em um rolo laminado giratório formado por discos alternadamente magnetizáveis e não magnéticos. O rolo é colocado entre peças polares moldadas de um electroíman. O electroíman induz um campo magnético na laminação magnética do rolo e gera áreas de forte gradiente magnético. O material é alimentado em forma de fluxo fino e controlado por um alimentador vibratório, direccionando-o para a parte superior do rolo. Durante a rotação, as partículas passam por uma lacuna estreita entre o rolo e o polo magnético. As partículas não magnéticas caem directamente, enquanto as magnéticas são atraídas pela superfície do rolo e conduzidas até uma calha separada, onde são descarregadas após saírem da zona de influência do campo magnético. Para evitar obstruções, é necessário remover previamente os materiais ferromagnéticos com um separador magnético preliminar (*scalper*). A lacuna entre o polo e o rolo é ajustável, e sua configuração, juntamente com a posição do divisor e a corrente aplicada às bobinas de

magnetização, influencia directamente a intensidade do campo, que pode atingir até 2 teslas (Svoboda, 2004).

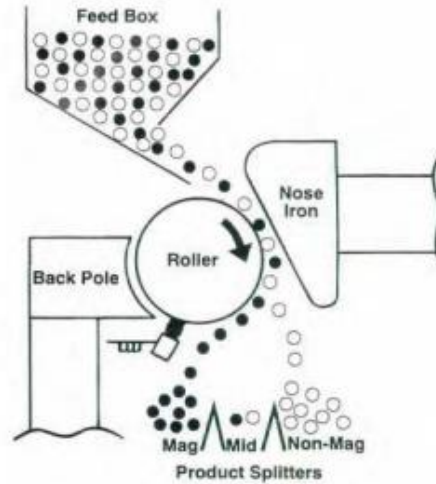


Figura 10: Diagrama esquemático de um separador magnético de rolos induzido.

Fonte: Svoboda (2004)

🔧 Componentes principais

Segundo Industrial Magnetics (2019), o separador é composto por um **tambor rotativo** fabricado em aço inoxidável resistente à abrasão, um **sistema magnético estacionário** constituído por ímanes permanentes ou eletroímãs de alta intensidade, uma **estrutura de suporte robusta** que sustenta o conjunto, e um **sistema de accionamento** composto por motor e transmissão que controlam a rotação. Inclui ainda um **alimentador** responsável por assegurar a distribuição homogénea do material na superfície do tambor e **divisores de descarga ajustáveis (splitters)**, que direccionam o fluxo de concentrado e rejeito.

🔧 Parâmetros operacionais ajustáveis

Conforme descrito por Industrial Magnetics (2019), os parâmetros ajustáveis incluem:

- **Amperagem:** regula a intensidade do campo magnético nos modelos electromagnéticos;
- **Velocidade do tambor:** ajusta o tempo de retenção das partículas magnéticas;

- **Posição dos divisores:** influencia a pureza e a recuperação do concentrado;
- **Taxa de alimentação:** deve ser uniforme para maximizar a eficiência do processo.

Aplicações

Usado no beneficiamento de minerais pesados, como ilmenite, rutilo, zircão e monazite, para concentrar minerais de interesse e remover contaminantes magnéticos (Industrial Magnetism, 2019).

Variáveis que afectam o processo de separação magnética

I. Intensidade do campo magnético

A eficiência da separação magnética depende directamente da intensidade do campo aplicado. Campos de baixa intensidade são adequados para separar minerais com alta susceptibilidade magnética, enquanto campos de alta intensidade permitem recuperar minerais com baixa susceptibilidade. Esse controlo ocorre sobretudo através da variação da corrente eléctrica em electroímã ou do ajuste da distância entre os polos magnéticos. Equipamentos com ímanes permanentes oferecem menos flexibilidade nesse ajuste, o que pode limitar a selectividade do processo (Sampaio & Luz, 2004).

II. Alimentação

O modo como o material é alimentado ao separador também influencia a qualidade da separação. Uma velocidade controlada e um leito fino de partículas aumentam a selectividade, especialmente na separação a seco. Quando o leito é espesso, as partículas magnéticas das camadas inferiores podem arrastar partículas não magnéticas das camadas superiores, contaminando o concentrado final. Idealmente, o leito deve ser formado por uma única camada de partículas, mesmo que isso reduza a produtividade (Sampaio & Luz, 2004).

- #### **III. Intensidade e gradiente do campo magnético:** A força (intensidade) e a taxa de variação (gradiente) do campo magnético são directamente proporcionais à capacidade de separação. Campos magnéticos mais fortes ou com gradientes mais acentuados aumentam a eficácia do processo (Prominer, 2025).

Além desses factores primários, outras variáveis como o tamanho das partícula e o teor de humidade também podem influenciar a eficiência da separação magnética (Prominer, 2025).

Aplicações do processo de separação magnética

Segundo Number Analytics (2023), a separação magnética tem diversas aplicações na metalurgia extractiva, destacando-se nas seguintes áreas:

- ✓ **Beneficiamento de minério de ferro:**

Utilizada para separar magnetite de minerais não magnéticos, permitindo a produção de concentrados de ferro de alta pureza, apropriados para a fabricação de aço.

- ✓ **Separação e purificação de elementos de terras raras:**

Aplicada na separação de minerais portadores de terras raras, como neodímio e disprósio, com o objectivo de obter concentrados com elevado grau de pureza.

- ✓ **Recuperação de metais preciosos a partir de minérios e rejeitos:**

Empregada na recuperação de ouro, platina e outros metais nobres, contribuindo para a geração de concentrados valiosos a partir de resíduos e materiais de baixo teor.

Vantagens e limitações da separação magnética

- 🚦 **Vantagens da separação magnética**

- ✓ **Alta eficiência:** É uma técnica extremamente precisa para separar minerais com propriedades magnéticas distintas.
- ✓ **Baixo custo operacional:** Requer pouca energia e manutenção, sendo economicamente viável para uso contínuo.
- ✓ **Benefícios ambientais:** Gera pouca poluição e resíduos, apresentando-se como uma opção menos poluente em relação a outros processos de separação.

Limitações e desafios da separação magnética

- ✓ **Aplicabilidade restrita:** só pode ser usada em minerais magnéticos ou com alguma susceptibilidade magnética.
- ✓ **Interferência de outros minerais:** a presença de minerais não magnéticos ou fracamente magnéticos pode dificultar a eficiência do processo.
- ✓ **Alto custo de investimento:** os equipamentos de separação magnética, especialmente os de alta intensidade, têm custo elevado de aquisição e manutenção.

CAPÍTULO 3: Parte experimental

Descrição do local do estágio

Os ensaios experimentais foram realizados nas instalações da empresa Kenmare Moma Mining (Mauritius) Limited, uma mineradora situada no distrito de Larde, província de Nampula, no norte de Moçambique. A empresa é especializada na extracção e beneficiamento de areias minerais pesadas, com destaque para a produção de ilmenite, zircão e rutilo.

1. Descrição do processo de beneficiamento mineral na Kenmare

Na planta de separação mineral, a primeira etapa do processo é a separação magnética, realizada em um circuito denominado Separação Magnética de Alta Intensidade em Meio Húmido (WHIMS). Nessa fase, os minerais magnéticos são separados dos não magnéticos. O material magnético, composto maioritariamente por ilmenite, passa por dois circuitos de fraccionamento (circuito de ilmenite A e circuito de ilmenite B) específicos para esse mineral, permitindo a obtenção de ilmenite em diferentes qualidades. Já o material não magnético, constituído principalmente por rutilo e zircão, segue para uma etapa de separação complementar, que visa classificar o zircão em diversas qualidades. O rutilo, por sua vez, é separado em uma única qualidade, conforme pode ver na figura A1 do anexo A.

2. Circuito de ilmenite A

De forma geral, o circuito Ilmenite A é responsável pela produção de cinco produtos finais principais conforme a figura A2 do anexo A que representa o fluxograma do circuito e esses produtos são: IP1, IP2, IP3, IP4 e DMR (*Dry Magnetic Reject*). Estes produtos resultam de diferentes estágios de separação magnética e electrostática, que visam recuperar as fracções de ilmenite com diferentes características de pureza.

Características específicas de TiO_2 :

- **IP1:** $\text{TiO}_2 \geq 51.9\%$
- **IP2:** : $\text{TiO}_2 \geq 49.5\%$
- **IP3:** : $\text{TiO}_2 \geq 55.7\%$

- **IP4:** : $\text{TiO}_2 \geq 55.7\%$
- **DMR:** $\text{TiO}_2 \leq 48\%$, considerado rejeito.

No contexto deste trabalho, o foco principal foi o circuito de separação magnética Ilmenite A, especificamente o seu estágio primário, onde se encontram os separadores magnéticos responsáveis pela primeira etapa de concentração da ilmenite.

De acordo com a configuração, o primeiro estágio é composto por separadores de tambor magnéticos que na saída são distribuídos em quatro correntes das quais a primeira dá-se o nome de Magnético 1 (Mag1) que é o mineral mais magnético, que é descarregado na conveia 5030 e é responsável por produzir uma boa parte de IP2 (*ilmenite product 2*), a segunda que se dá-se o nome de Magnético 2 (Mag 2) que é ligeiramente magnética, a terceira que dá-se o nome de Intermediária (Mids) que é uma junção de partículas magnéticas e não magnéticas e por último a corrente dos não-magnéticos que dá-se o nome de Não- magnéticos(Non mags).

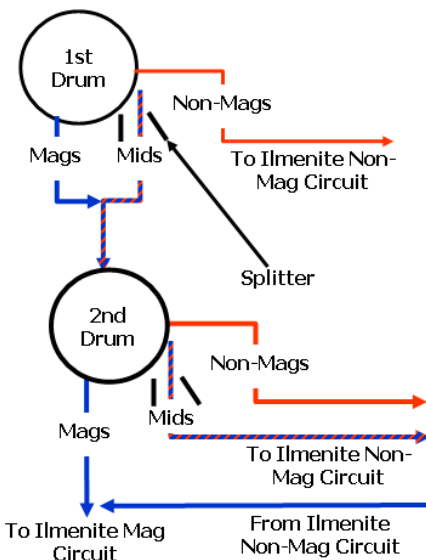


Figura 11: Representação esquemática do processo de separação magnética num separador magnético de tambor na Kenmare.

A figura acima representa um sistema de separação magnética composto por dois tambores sucessivos, utilizados na etapa primária do circuito de separação da ilmenite. No primeiro tambor, o material é inicialmente dividido em duas fracções principais: uma fracção magnética, que é recirculada para o segundo tambor para posterior refino, e uma fracção não magnética (Non-Mags), que é desviada directamente para o circuito de não magnéticos da ilmenite. No segundo tambor, a fracção magnética recebida do primeiro tambor é novamente submetida à separação, agora em três categorias distintas: a fracção magnética final, designada como Mag 1, que constitui o material com maior susceptibilidade magnética; a fracção intermediária, que apresenta características magnéticas parciais e é classificada como Mag 2; e, por fim, a fracção não magnética, designada como Mids, composta por partículas sem resposta significativa ao campo magnético, a qual pode ser direccionada ao reprocessamento ou ao descarte, conforme sua composição mineralógica.

Materias e equipamentos usados

Tabela 7: Materias e equipamentos usados durante a experiência.

Equipamentos	Materiais
Separador magnético de tambor	Caligo bag e plásticos
Separador magnético de rolo induzido	Cronómetro
Balança analítica	Balança portátil
Espectrómetro portátil de fluorescência de raios X (XRF)	Marcador
Quarteador	Placas metálicas
Tacómetro	Copos metálicos
	Pincel

Primeira fase: no circuito de ilmenite A

Os testes foram realizados no dia 19 de maio de 2025, durante uma alimentação do WHIMS composta por 40% de HMC A e 60% de HMC B&C. Neste período, a alimentação do circuito de Ilmenite A encontrava-se em aproximadamente 120 toneladas por hora.

Avaliação e Escolha do Equipamento

Após a inspecção, foi identificado que o separador magnético a ser utilizado é o modelo DM5305, devido ao seu rolo projectado para suportar materiais a altas temperaturas. A escolha recaiu sobre o separador magnético de tambor, referência 5305, em função da facilidade de acesso aos pontos de amostragem e das condições específicas do próprio equipamento.

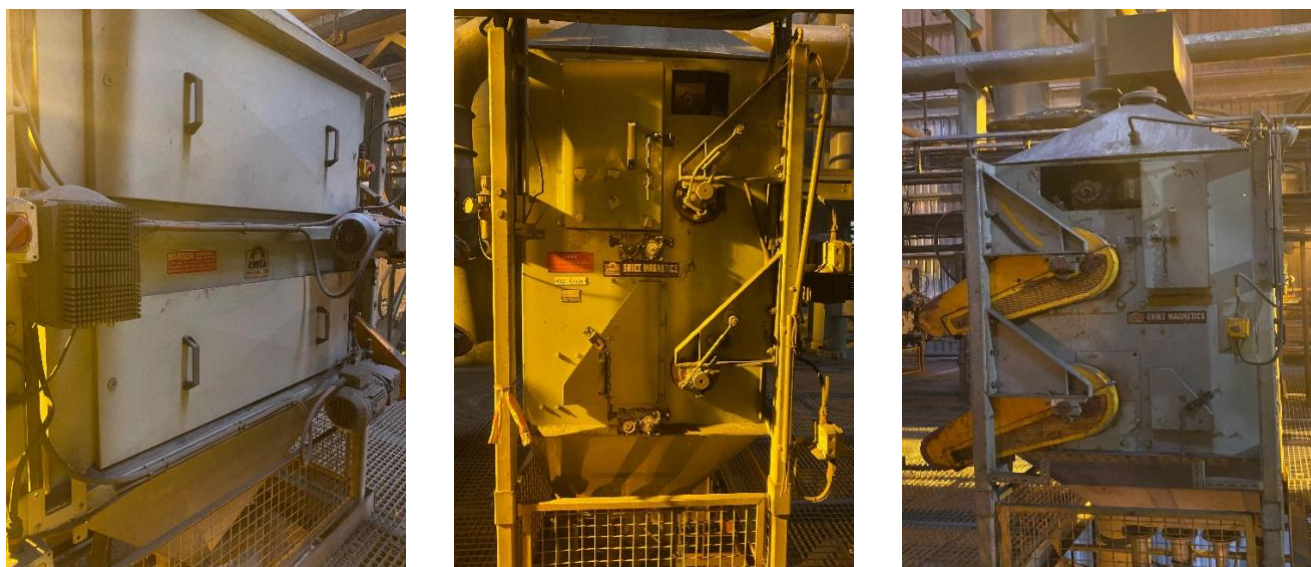


Figura 12: Separador magnético de tambor em diferentes posições.

Ajustes operacionais e colecta de amostras

Os ensaios foram iniciados com o separador magnético de tambor configurado com os seguintes parâmetros operacionais iniciais:

Tabela 8: Parâmetros operacionais das condições iniciais da experiência.

Parâmetros	
Velocidade do rolo de alimentação	70 % (44 rpm)
Velocidade dos rolos de separação (superior e inferior):	100 % (205 rpm)
Posição do divisor (<i>splitter</i>):	3 mag

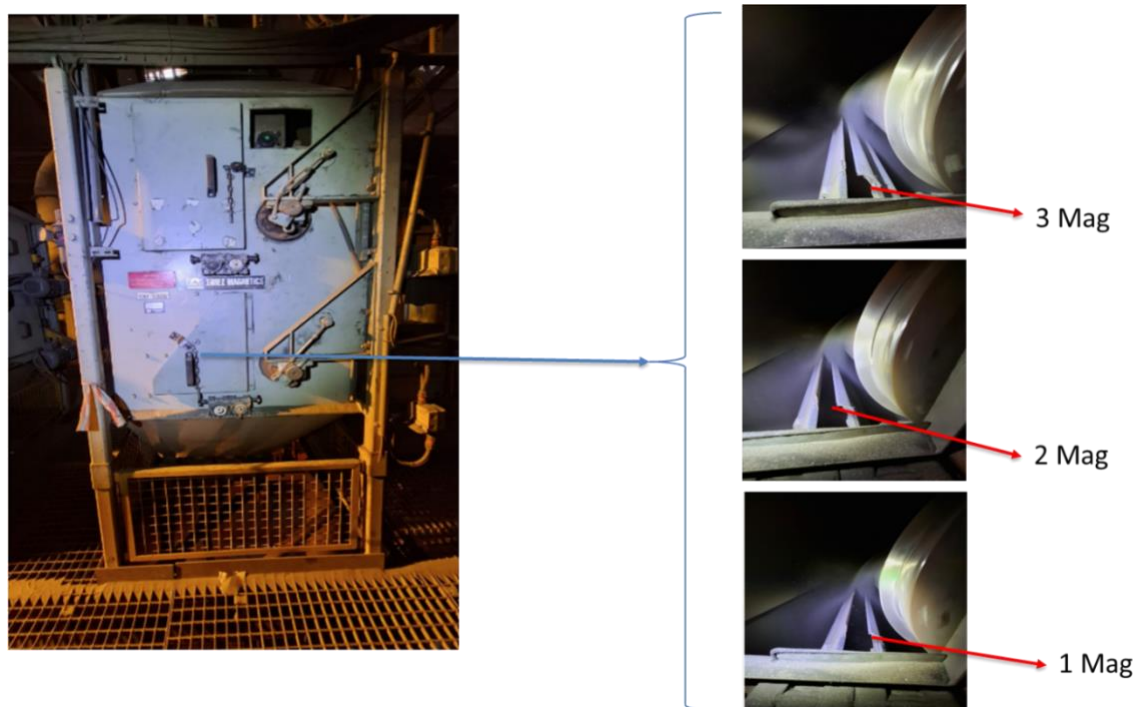


Figura 13: Demonstração da posição do divisor em diferentes testes

Com base nestas condições iniciais, foram realizados ajustes operacionais em duas fases distintas:

Primeira etapa de ajustamento: nesta etapa, foram mantidos fixos os parâmetros de velocidade dos tambores de alimentação e separação, enquanto se variou apenas a posição do divisor magnético, testando as posições 3 mag, 2 mag e 1 mag. O objectivo foi observar a resposta do rendimento magnético em função do reposicionamento do divisor.

Segunda etapa de ajustamento: após a definição da posição do divisor (posição 1 mag), este parâmetro foi fixado, e prosseguiu-se com a variação da velocidade do rolo de alimentação, que foi ajustada para 90% e posteriormente para 80%. Em cada etapa dos ajustamentos, foram colectadas amostras das correntes de entrada e saída do equipamento. Estas amostras foram enviadas para análise química por fluorescência de raios X (XRF), com o objectivo de determinar a composição química e avaliar a presença de contaminantes, bem como estimar a eficiência de separação da fracção magnética em cada condição testada.

Segunda fase: no laboratório (Separação magnética)

Após cada ajustamento operacional, foram colectadas amostras da corrente magnética para posterior fraccionamento. Esta etapa foi fundamental para avaliar a qualidade da ilmenite produzida, especialmente no que diz respeito à diferentes respostas magnéticas. Para isso, utilizou-se um separador magnético de rolo induzido (IRM), equipamento adequado para simular diferentes intensidades de campo magnético e, assim, distinguir as fracções de ilmenite com base em suas propriedades magnéticas. A escolha do IRMS justifica-se pela sua capacidade de caracterizar a distribuição da ilmenite segundo diferentes especificações industriais(IP1, IP2, IP3/4), o que permite compreender até que ponto o produto IP2 contém partículas com características desejadas. Foram ensaiadas cinco condições operacionais diferentes, sendo utilizado 1 kg de amostra por condição. A intensidade magnética foi variada entre 0.5 A e 1.8 A, com incrementos de 0.1 A. Durante cada etapa, a fracção não magnética resultante era retratada, ou seja, reenviada ao separador, de modo a recuperar partículas magnéticas que não foram inicialmente capturadas.

Separador de rolo induzido

Parâmetros operacionais:

Velocidade de rotação do rolo: 150 rpm

Vibração: 130

Posição do divisor: 1 mag e 1 non mag

Intensidade magnética: 0.5-2.2 amp



Figura 14: Separador de rolo induzido na escala laboratorial

CAPÍTULO 4: Análise, discussão e tratamento dos resultados experimentais

Este capítulo apresenta a análise e discussão dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados no estágio primário do circuito de ilmenite A, especificamente na corrente Mag 1, principal responsável pela produção do produto IP2. O objectivo é interpretar os efeitos das diferentes condições operacionais testadas, nomeadamente, a variação da velocidade do tambor e da posição do divisor de descarga sobre a eficiência da separação magnética e os teores dos principais contaminantes presentes nas amostras: P_2O_5 e U + Th. Além disso, utilizou-se o separador magnético de rolo induzido (IRM), cujo objetivo é simular diferentes intensidades de campo magnético para distinguir fracções de ilmenite segundo suas propriedades magnéticas, permitindo uma avaliação detalhada da qualidade do produto IP2.

Eficiência de separação do contaminante U+Th

O presente estudo avaliou a eficiência da separação magnética na remoção dos contaminantes Urânio (U) e Tório (Th) e pentóxido de fósforo (P_2O_5) por meio da variação de dois parâmetros operacionais: posição do divisor magnético e velocidade do rolo de alimentação.

Os resultados, expressos na curva de eficiência U+Th, no gráfico 2, demonstram a influência desses parâmetros no processo de separação.

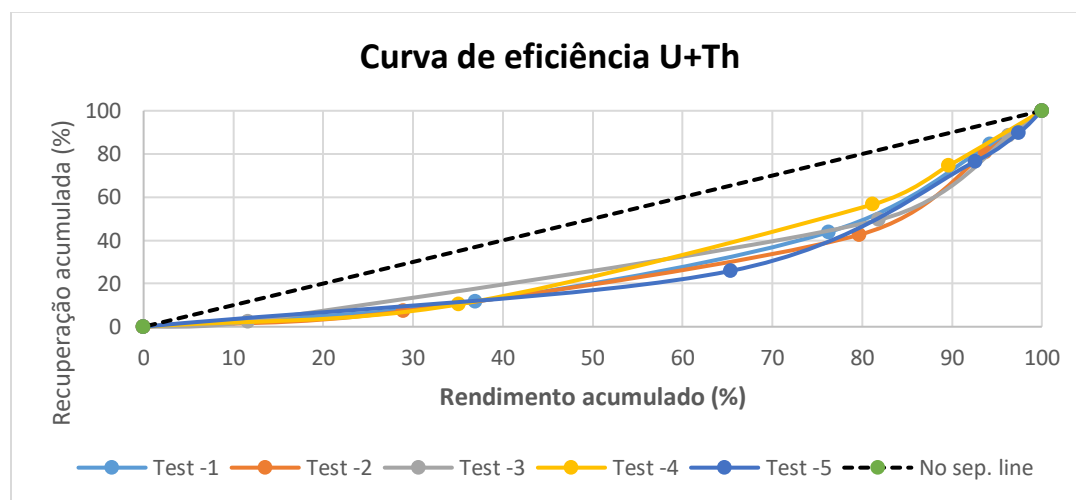


Gráfico 2: Curvas de recuperação acumulada do contaminante (U+Th) em função do rendimento acumulado da conveia 5030.

A curva de recuperação acumulada em função do rendimento acumulado apresentada no gráfico 2 permite avaliar a eficiência da separação magnética do contaminante U+Th ao longo dos testes realizados na conveyer 5030(tendo em conta que a corrente de saída Mag 1 descarrega na conveyer 5030). A linha tracejada diagonal representa a "*no separation line*", que indica um comportamento não selectivo, ou seja, a recuperação do contaminante proporcional ao rendimento de massa.

No caso de contaminantes como o U+Th, o ideal é que a curva de recuperação acumulada se mantenha o mais abaixo possível da linha de não separação, indicando que o contaminante não foi retido nas correntes magnéticas, mas sim eficientemente rejeitado. Assim, quanto mais baixa a curva, melhor o desempenho do separador para remover esse contaminante indesejado.

Dado que a avaliação visual directa dos testes não permite uma conclusão definitiva sobre o desempenho ideal, e considerando que a empresa definiu previamente 30% de rendimento na conveyer 5030 como padrão operacional a atingir, a análise comparativa dos testes será conduzida com base nesse critério objectivo. Para assegurar uniformidade na comparação, todos os ensaios foram avaliados utilizando o método da interpolação linear, considerando um rendimento fixo de 30%, conforme definido pela empresa como meta operacional, em alinhamento com os requisitos de produção.

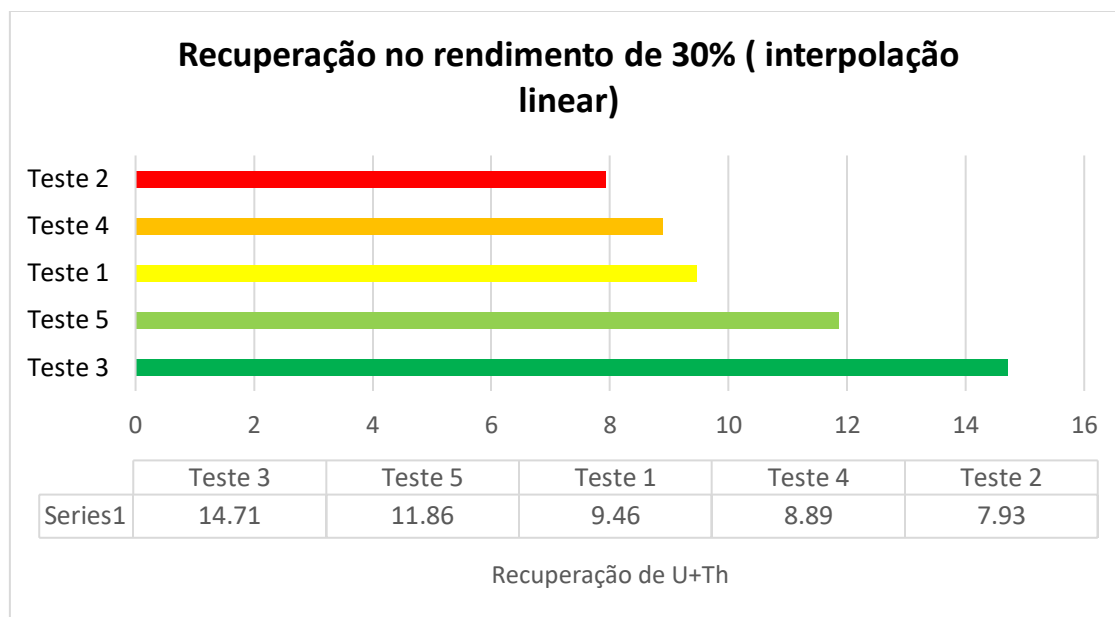


Gráfico 3: Recuperação (%) de U+Th nos dos testes no rendimento fixo de 30% (Interpolação linear)

✓ Efeito da posição do divisor (Testes 1, 2, e 3)

Nos primeiros três testes, foi mantida constante a velocidade do rolo de alimentação e tambores de separação (100%), enquanto se variou apenas a posição do divisor magnético. Os resultados demonstraram que a posição 2 mag (Teste 2) apresentou a menor recuperação de contaminantes (7.93%), o que evidencia uma separação mais eficiente. Este desempenho sugere que a posição intermédia proporciona um equilíbrio ideal entre selectividade e rendimento, permitindo que a maior parte dos contaminantes seja desviada para as correntes não magnéticas. Já a posição 3 mag (Teste 1), mais afastada do tambor, apresentou uma recuperação de 9.46%. Embora razoável, esta posição parece não capturar de forma tão eficiente a massa útil, podendo deixar passar parte do material contaminado por arraste. A posição 1 mag (Teste 3), mais próxima do tambor, resultou na pior eficiência (14.71%), apesar de apresentar alta selectividade compromete significativamente o rendimento global do processo. Tendo em conta que, oferecer maior intensidade de campo magnético na posição 1 mag mostrou-se contraproducente na prática levando a perdas excessivas de material valioso.

✓ Efeito da velocidade do tambores de separação (Testes 4 e 5)

Após a definição da posição do divisor (posição 1 mag), este parâmetro foi fixado e variou-se a velocidade do rolo de alimentação. Observou-se que a redução da velocidade de 100% para 90% (Teste 4) ainda manteve um bom desempenho (8.89%), próximo do valor obtido no Teste 2. No entanto, uma velocidade mais baixa, de 80% (Teste 5), aumentou significativamente a recuperação de contaminantes (11.86%).

Este comportamento pode ser explicado pelo tempo de exposição das partículas ao campo magnético: velocidades mais baixas resultam num maior tempo de residência das partículas no tambor, o que pode favorecer a atracção e captura de partículas mais leves ou fracamente magnéticas, como o contaminante U+Th. Assim, velocidades mais elevadas promovem uma separação mais eficiente, por reduzirem a probabilidade de retenção de contaminantes nas correntes magnéticas.

Nota: A comparação entre os Testes 2 e 4 é particularmente interessante pois ambos alcançam níveis similares de recuperação de U+Th, porém, através de abordagens distintas. Enquanto o Teste 2 mantém todos os parâmetros operacionais padrão excepto pela posição do divisor, o Teste 4 exige uma redução na velocidade do rolo para 90% para atingir os mesmos resultados. Esta diferença sugere que o ajuste da posição do divisor magnético pode ser mais eficaz para otimizar o processo do que a alteração da velocidade de operação.

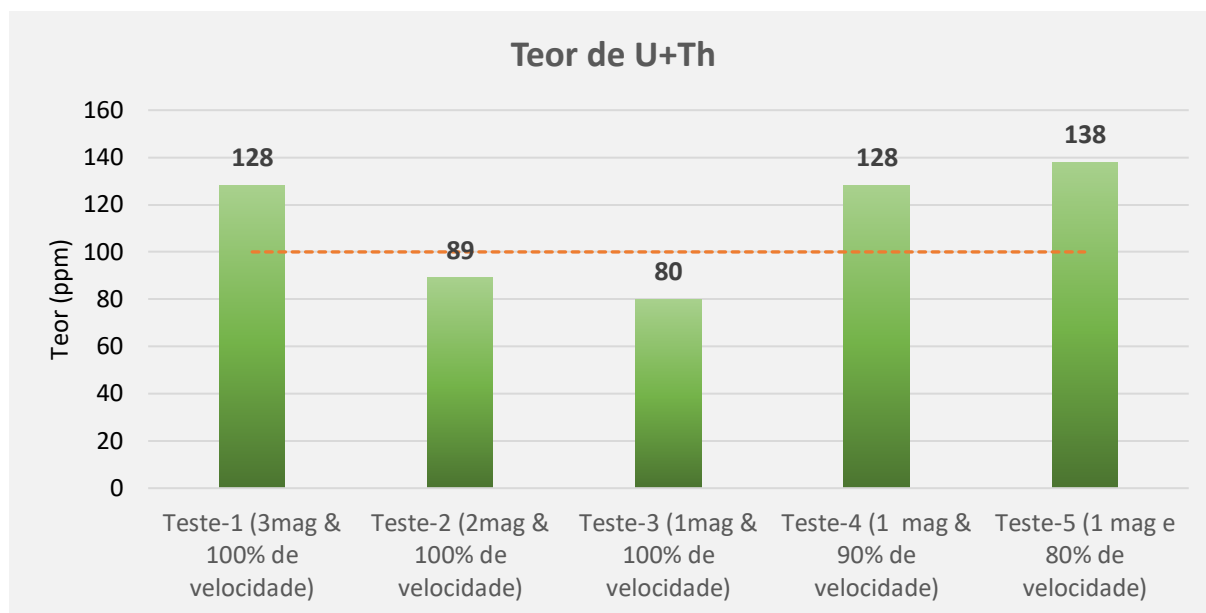


Gráfico 4: Teor de U+Th na corrente Mag 1 sob diferentes velocidades de rotação do tambor magnético

A avaliação dos teores de U+Th nos produtos magnéticos, conforme apresentado no gráfico 4, reforça o entendimento de que a configuração do Teste 2 representa o melhor compromisso técnico entre recuperação e qualidade. Ainda que o Teste 3 tenha registado o menor teor absoluto de contaminantes (80 ppm), esse resultado não reflecte maior eficiência, uma vez que foi consequência directa da estreita abertura do divisor, condição que aumentou a selectividade mas comprometeu o rendimento, direccionando parte do material valioso para outras correntes.

É importante observar que o Teste 5, que combinou posição estreita com velocidade reduzida, resultou no pior teor de U+Th (138 ppm). Este aumento significativo de contaminantes no produto magnético sugere que a redução da velocidade prejudica a eficiência da separação, mesmo em uma configuração mais selectiva do divisor.

Eficiência de separação do contaminante P_2O_5

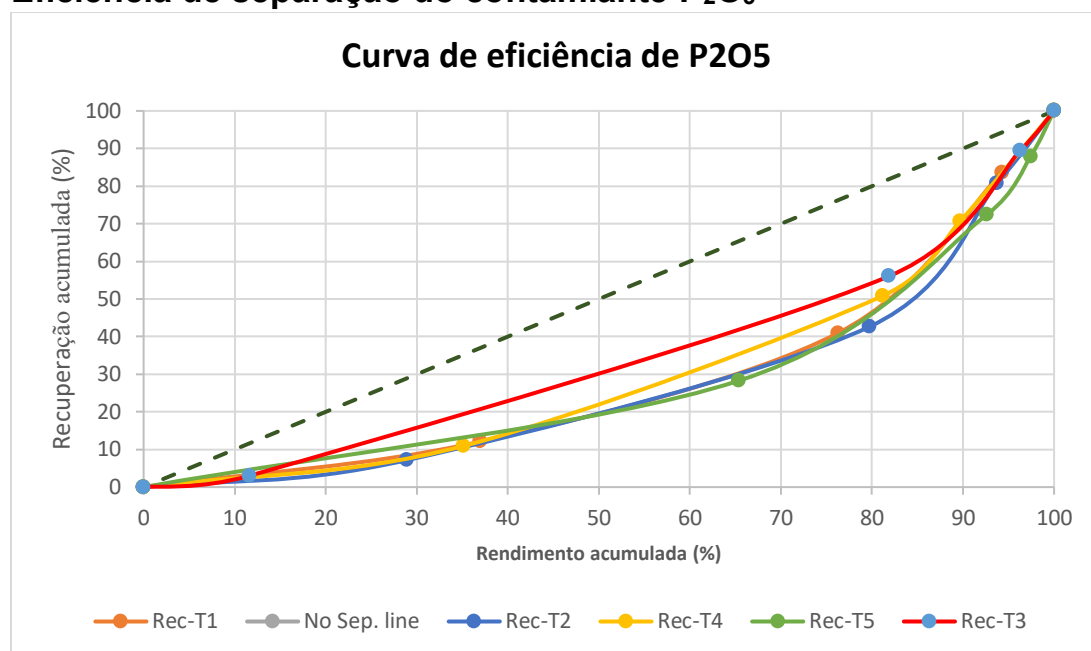


Gráfico 5: Curvas de recuperação acumulada do contaminante (P_2O_5) em função do rendimento acumulado da conveia 5030.

Com base na interpolação dos dados a 30% de rendimento acumulado, observou-se o comportamento da recuperação do contaminante P_2O_5 em cada condição de teste. Este parâmetro foi utilizado como complemento à análise anterior baseada na recuperação de U+Th, com o objectivo de verificar a eficiência selectiva do processo frente a diferentes tipos de contaminantes.

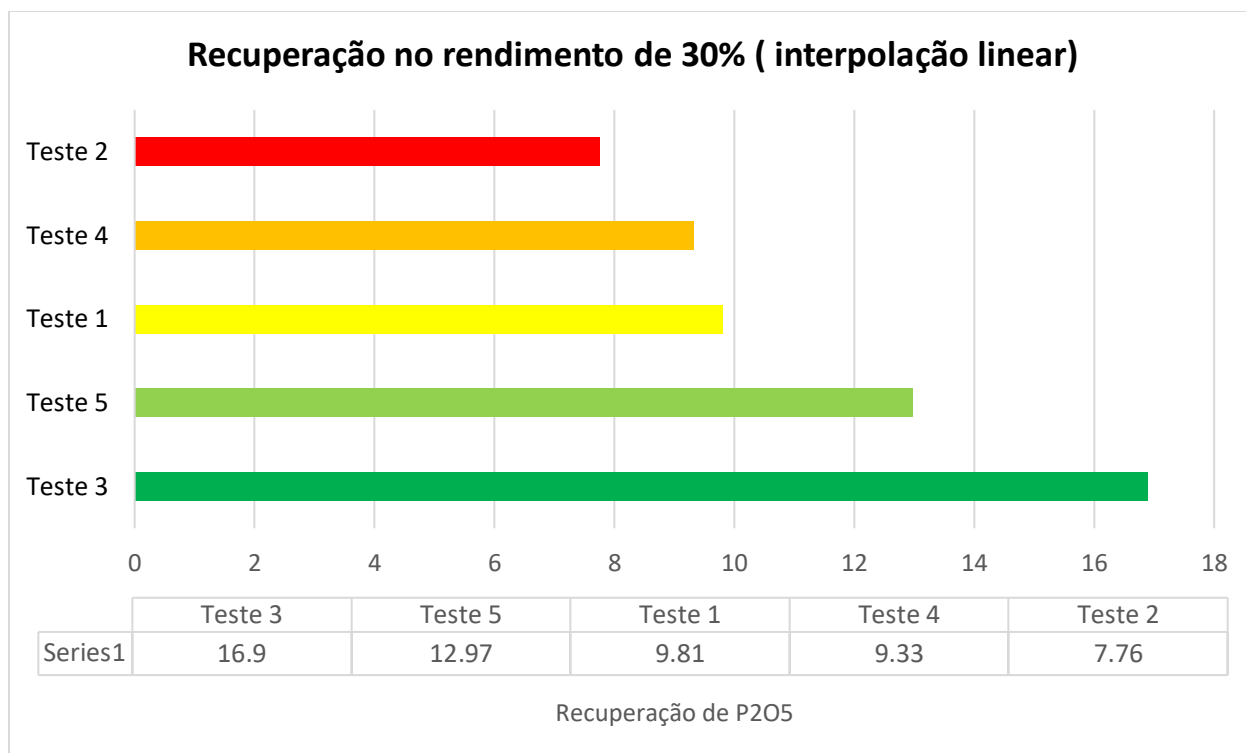


Gráfico 6: Recuperação (%) do P_2O_5 nos testes no rendimento fixo de 30% (Interpolação linear)

✓ Efeito da velocidade tambores de separação e posição do divisor

De forma geral, o Teste 2 apresentou a menor recuperação de P_2O_5 (7,76%) a este ponto do rendimento, sugerindo maior eficiência na rejeição precoce deste contaminante, o que aponta para uma melhor selectividade do separador nesta condição. Por outro lado, o Teste 3 foi o que apresentou a maior recuperação interpolada (16,90%), indicando que uma fracção significativa de P_2O_5 ainda estava presente no concentrado nas etapas iniciais, o que revela baixa eficiência de separação. Este desempenho está alinhado com o observado anteriormente para U+Th pois minerais contendo urânio e tório, assim como os fosfatos responsáveis pelo P_2O_5 , possuem susceptibilidades magnéticas próximas, o que significa que respondem de forma similar aos campos magnéticos aplicados durante a separação (Gorev et al., 2019). Ou pode estar relacionado à configuração adotada neste teste, que, embora tenha usado a posição mais estreita do divisor de descarga,

potencialmente favorável à selectividade, acabou por comprometer a eficiência ao arrastar material contaminado para a corrente principal.

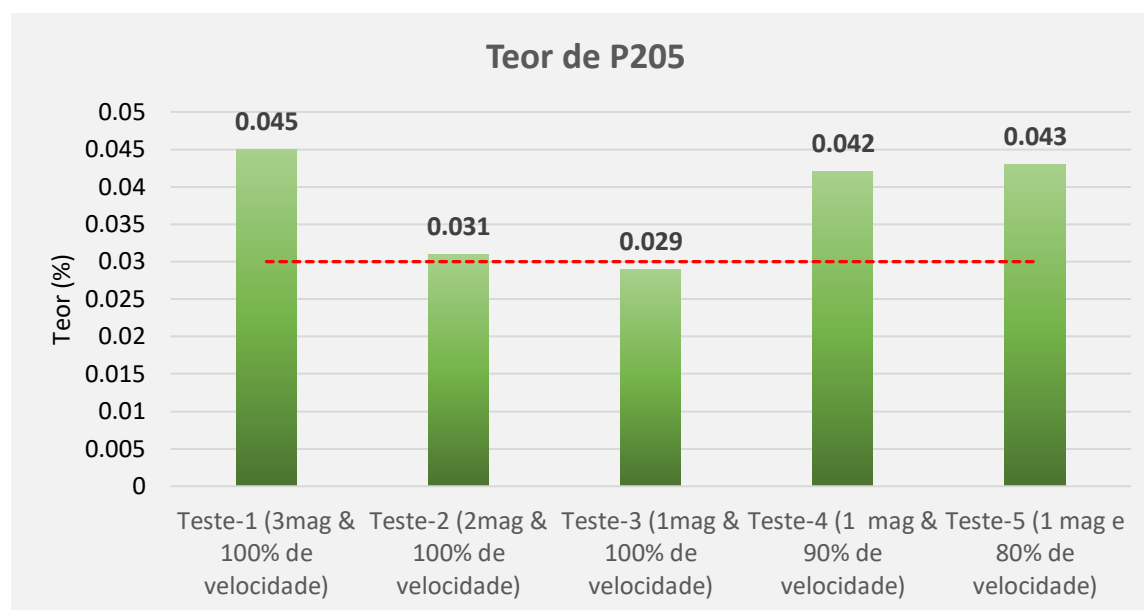


Gráfico 7: Teor de P₂O₅ na corrente Mag 1 sob diferentes velocidades de rotação do tambor magnético.

A avaliação dos teores finais de P₂O₅ nos concentrados revela diferenças importantes entre os testes em relação ao valor-alvo estabelecido de 0.03 %. Conforme ilustrado no gráfico 7, apenas o Teste 3 apresentou um teor inferior ao limite desejado (0.029%), sendo, portanto, o único a cumprir plenamente o critério de qualidade com relação à presença de contaminantes.

O Teste 2, embora tenha registrado um teor ligeiramente acima do alvo (0,031%), ainda pode ser considerado aceitável, pois esse valor não representa um desvio crítico, especialmente tendo em conta que existe um estágio adicional de separação magnética. Portanto, o teor ligeiramente elevado neste ponto inicial pode ser mitigado posteriormente, garantindo a qualidade final do produto. Esse resultado sugere que, embora não ideal, o Teste 2 representa uma alternativa viável, principalmente se conciliado com uma boa recuperação e rendimento.

Já os Testes 1 (0.045), 4 (0.042) e 5 (0.043) demonstraram valores significativamente superiores ao alvo estabelecido, indicando menor eficiência na remoção do P₂O₅ e,

consequentemente, maior comprometimento da qualidade do concentrado final nesses casos.

É importante considerar que os limites de concentração (*targets*) estabelecidos para cada contaminante foram definidos com base nos valores aceitáveis para o produto IP2, garantindo que, ao chegar ao estágio subsequente de purificação, os níveis de contaminantes já estejam dentro dos parâmetros especificados. Isso porque a etapa primária de separação magnética é a mais crítica no circuito, sendo responsável pela maior remoção dos contaminantes, enquanto os estágios posteriores actuam como polimento para assegurar a conformidade final do produto.

Separação magnética: fraccionamento

O principal objetivo da separação magnética é separar selectivamente os produtos de ilmenite com diferentes teores de dióxido de titânio (TiO_2), utilizando um separador de rolo induzido em escala laboratorial, com correntes controladas entre 0,5 A e 1,8 A para verificar a presença das frações IP2, IP1 e IP3 nas amostras processadas, com base nas suas diferentes susceptibilidades magnéticas, de modo a avaliar a eficácia do processo de separação magnética (do circuito de ilmenite A, no separador magnético de tambor). Considerando toericamente: IP2, com $\% \text{TiO}_2 \geq 48,7$ é obtido entre 0,5–1,2 A; IP1, com $\% \text{TiO}_2 \geq 51,9$ é obtido entre 1,3–1,6 A; e IP3, com $\% \text{TiO}_2 \geq 55,7$ é extraído com correntes mais elevadas (1,7–2,2 A). Estudos como o de Liu et al. (2023) confirmam que intensidades crescentes de campo magnético permitem separar produtos com maior teor de TiO_2 , devido à sua associação com minerais mais paramagnéticos.

Após a realização do fraccionamento foi possível observar que, em grande parte das condições testadas, a corrente Mag 1 apresentou predominantemente o produto IP2 como pode se ver no gráfico 8, evidenciando a eficácia da separação magnética em isolar a fracção desejada.

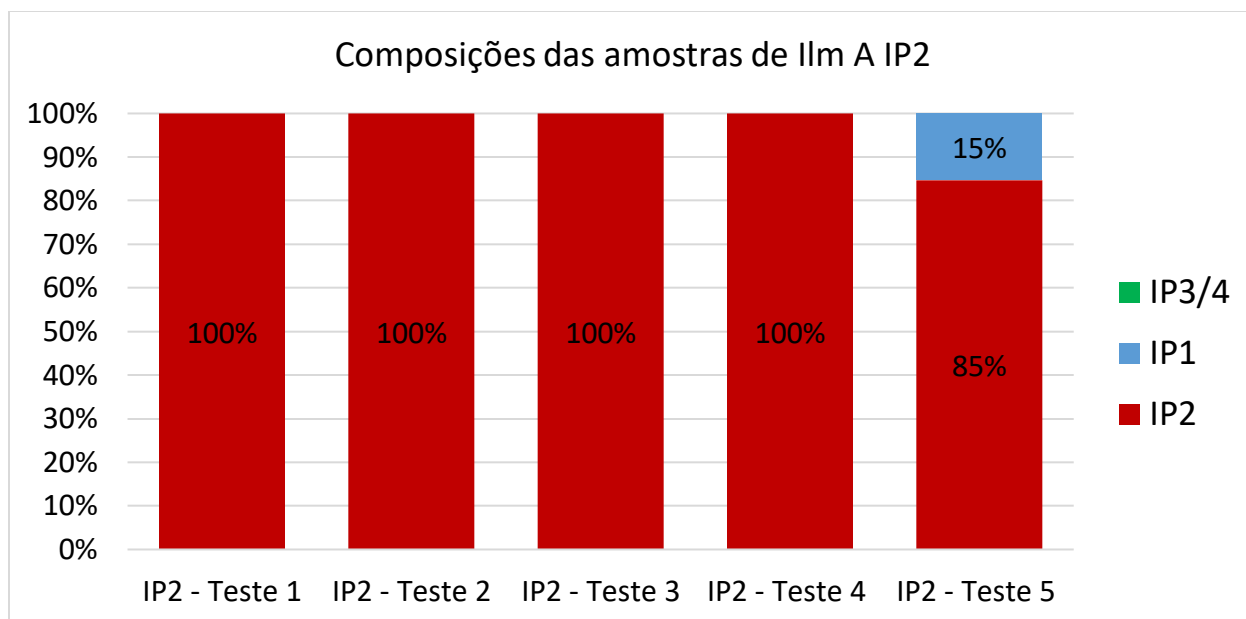


Gráfico 8: Composição percentual da corrente Mag 1 nos testes de fracionamento magnético.

No entanto, destaca-se um caso específico em que a velocidade do tambor foi ajustada para 80% (teste 5). Nesta condição, verificou-se, por meio da análise química, uma ligeira presença do produto IP1 na corrente Mag 1. Essa ocorrência é relevante, pois o IP1 está associado a teores mais elevados de contaminantes como P_2O_5 , Th+U, comprometendo a qualidade do IP2. Essa contaminação pontual pode ser atribuída à redução da força centrífuga resultante da menor velocidade do tambor, o que provavelmente favoreceu a captura de partículas menos magnéticas ou de granulometria crítica, que normalmente seriam desviadas para outras correntes. Segundo Shahraki et al. (2023), ajustes inadequados na velocidade do equipamento podem comprometer a eficiência de separação ao permitir a passagem de minerais com comportamento magnético intermediário para correntes de menor selectividade.

CAPÍTULO 5: Conclusões e Recomendações

Conclusões

Após a análise detalhada e interpretação dos resultados experimentais obtidos no circuito de ilmenite A, com foco na otimização do processo de separação magnética para a remoção dos contaminantes P_2O_5 e U+Th, pode-se destacar os seguintes aspectos fundamentais para a melhoria da eficiência e qualidade do produto IP2:

1. Os dados demonstraram que a posição do divisor exerce influência significativa na seletividade do processo. O Teste 2, com o divisor posicionado na posição intermédia (2 mag), apresentou o melhor equilíbrio entre a recuperação de contaminantes (7,93%) e o teor final aceitável desses contaminantes, aproximando-se dos valores-alvo estabelecidos para a operação. Por outro lado, o Teste 3, com o divisor mais próximo ao tambor (1 mag), embora tenha registrado o menor teor absoluto de contaminantes, comprometeu severamente o rendimento da corrente ao arrastar quantidades relevantes de ilmenite valiosa para as correntes não magnéticas.
2. A redução da velocidade do tambor mostrou-se também um factor crítico para a seletividade. O Teste 4 (90% da velocidade) manteve uma boa eficiência, porém o Teste 5 (80%) resultou em um aumento significativo na recuperação de contaminantes (11,86%) e em teores indesejados, indicando que velocidades muito baixas prejudicam o desempenho do processo.
3. Além disso, a análise de fraccionamento evidenciou que, na maioria das condições, a corrente Mag 1 concentrou predominantemente o produto IP2 dentro do intervalo de intensidades magnéticas de 0,5 a 1,8 A, conforme esperado. No entanto, a presença pontual de IP1 em baixas velocidades ressalta a necessidade de ajustes precisos para evitar a contaminação cruzada entre fracções com diferentes teores de TiO_2 e contaminantes.

Em suma, conclui-se que a posição do divisor tem um impacto mais significativo sobre a eficiência da separação magnética do que a redução da velocidade do tambor. A configuração utilizada no Teste 2 mostrou-se a condição operacional otimizada para o

circuito de ilmenite A, garantindo a melhor qualidade do produto IP2 aliada a uma boa recuperação e eficiência na remoção dos contaminantes.

Recomendações

- ❖ Adoptar a posição do divisor na configuração 2 mag e manter a velocidade do tambor em 100% como padrão operacional no estágio primário do circuito de ilmenite A.
- ❖ Realizar estudos adicionais voltados para a definição dos parâmetros operacionais óptimos nos estágios intermediário e final do circuito de ilmenite A, garantindo a continuidade da optimização do processo ao longo de todas as etapas.
- ❖ Investigar o desempenho do estágio primário do circuito de ilmenite A para diferentes razões de mistura, como 100% HMCA e combinações de 50% HMCA com 50% HMC B e C, uma vez que a variação na composição da alimentação pode impactar significativamente a eficiência da separação magnética.
- ❖ Evitar operar os separadores magnéticos com velocidades inferiores a 90% da nominal, considerando que tais condições comprometem a selectividade da separação magnética, resultando em aumento dos níveis de contaminantes e prejuízo à qualidade do produto final.

CAPÍTULO 6: Referências bibliográficas

Abrão, A. (1994). *Química e tecnologia das terras-raras*. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq.

Adicel. (2023). *Dióxido de titânio: novo aliado da indústria alimentícia* [Imagem]. Blog Adicel. Acesso em 08 de Agosto de 2025. Disponível em: <https://blog.adicel.com.br/wp-content/uploads/2023/06/Dioxido-de-Titanio-novo-aliado-da-industria-alimenticia.jpg>

Assane, A. O. (2013). *Distribution of heavy minerals sand in Namalope deposit, Moma District, Mozambique* (Dissertação de mestrado, Rhodes University). Rhodes University, Grahamstown, África do Sul.

Barksdale, J. H. (1966). Titanium minerals. In *Minerals Yearbook* (pp. 1–17). U.S. Bureau of Mines.

Bedinger, G. M. (2019a). Titanium mineral concentrates. In *U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2019* (pp. 176–177).

Clay Planet. (n.d.). *Ilmenite*. Acesso em 11 de Julho de 2025. Disponível em: <https://shop.clay-planet.com/images/products/detail/ilmenite.1.jpg>

Crisóstomo, R. C. (2015). *A separação magnética de minérios de ferro no Brasil: Uma revisão* [Trabalho de conclusão de curso de graduação, Universidade Federal de Ouro Preto]. Repositório Acadêmico da UFOP.

Downer EDI Mining – Mineral Technologies Pty Ltd. (2010). *Kenmare MOMA Processing: Rare Earth Magnetic Drum Separator 1x2x1500x400 dia – Operation and service manual (Rev. A)*. Carrara, QLD.

Dushyantha, N., Batapola, N., Subasinghe, N., Ratnayake, N. P., Premasiri, R., Dissanayake, K., & Senaratne, A. (2020). The occurrence and economic potential of heavy mineral sands in Sri Lanka. *Ore Geology Reviews*, 118, 103341.

Elsner, H. (1992). *Heavy minerals – Economic placers*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Elsner, H. (2012). *Heavy minerals – Economic placers*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Estudando Geologia. (2012). Monazita: o mineral que vale por três. *Blog Estudando Geologia*. Acesso em 25 de julho de 2025. Disponível em: <https://estudandogeologia.blogspot.com/2012/03/monazita-o-mineral-que-vale-por-tres.html>

Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. A. P., & Lang, C. (2018). Towards sustainable TiO_2 production: An investigation of environmental impacts of ilmenite and rutile processing routes in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 196, 674–688.

Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO_2 photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515–582.

Gorev, V. A., Petrov, A. V., & Belyaev, S. S. (2019). Magnetic susceptibility of minerals containing uranium and thorium: Implications for mineral processing. *Journal of Mining Science*, 55(3), 493–501.

Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive metallurgy of rare earths*. CRC Press.

IMSC Group. (2019). *R182 RED 1×2 rare earth drum (RED) separator: Operation and service manual* (Rev. A). Jacksonville, FL: Industrial Magnetics, Inc.

Industrial Magnetics, Inc. (2019). *R189 IRM OSM: Operation and service manual* (Rev. A). Boyne City, MI: Autor.

Jane, R. B. (2014). *Análise quantitativa da ilmenite extraída em Moma-Nampula em termos de teores de TiO_2 , Fe_2O_3 , Th, U e Cr_2O_3* (Trabalho de Licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências). Maputo: Departamento de Química.

Kenmare Resources plc. (n.d.). *Moma Titanium Minerals Mine — location map* [Mapa]. Kenmare Resources. Acesso em 08 de Agosto de 2025. Disponível em: <https://www.kenmareresources.com/our-business/the-moma-mine/>

Koroznikova, L., Klutke, C., McKnight, S., & Hall, S. (2007). The use of low-toxic heavy suspensions in mineral sands evaluation and zircon fractionation. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 108, 1–8.

Liu, W., Zeng, L., Wang, Y., & Zhou, Q. (2023). Selective recovery of titanium from ilmenite using stepwise magnetic separation.

Mining technology. (2020). *Moma Titanium Minerals Mine, Mozambique*. Acesso em: 27 de Junho de 2025. Disponível em: <https://www.miningtechnology.com/projects/momaminerals/>

Moçambique hoje. (2023). *Areias pesadas de Moma, Moçambique*. Acesso em: 11 de Junho de 2025. Disponível em: <https://mocambiquehoje.com/areias-pesadas-de-moma-mocambique/>

Mozambique Expert. (n.d.). *Mina de minerais de titânio de Moma*. Acesso em 01 de Julho de 2025. Disponível em: <https://www.mozambiqueexpert.com/en/mozambique-titanium-resources/>

Number Analytics. (2023). Magnetic separation in extractive metallurgy: The ultimate guide. Acesso em 11 de Julho de 2025. Disponível em <https://www.numberanalytics.com/blog/magnetic-separation-extractive-metallurgy-ultimate-guide/>

Oberteuffer, J. A. (1974). Magnetic separation: A review of principles, devices, and applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 10(3), 312–338.

Pamplona, G. (2022). *Absorvedor solar de ilmenita: aplicação do minério de titânio em coletores solares fototérmicos*. Editora Dialética.

Plaza-Toledo, M. (2023). *The mineral industry of Mozambique*. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-industry-mozambique>

Pochteca El Salvador. (2023). *Cosméticos com cloreto de titânio* [Imagem]. Pochteca El Salvador. Acesso em 08 de Agosto de 2025. Disponível em: <https://elsalvador.pochteca.net/wpcontent/uploads/2023/03/cosmeticos-cloruro-de-titanio.jpg>

Profile.co.mz. (n.d.). *Kenmare Moma: one of Africa's largest mineral sand operations*. Acesso em: 26 de Junho de 2025. Disponível em: <https://profile.co.mz/en/kenmare-moma-one-of-africas-largest-mineral-sand-operations/>

Prominer (Shanghai) Mining Technology Co., Ltd. (2025). Quais são os dois fatores principais que influenciam a eficiência da separação magnética? Acesso em: 12 de Agosto de 2025. Disponível em: <https://www.prominotech.com/pt/news/what-are-the-two-key-factors-that-influence-magnetic-separation-efficiency/>

Sampaio, J. A., & Luz, A. B. (2004). *Separação magnética e eletrostática* (6ª ed.). Rio de Janeiro: CETEM/MCT, pp. 341–379.

Santos, C. D. dos, & Cassini, A. S. (2017). *Extração, clarificação e estabilização de betalainas provenientes de talos de beterraba vermelha (Beta vulgaris L.)* (Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Repositório LUME – UFRGS.

Shahraki, S., Khosravi, M., & Gholami, A. (2023). Characterization and beneficiation of ilmenite tailings by magnetic separation.

Svoboda, J. (2004). *Magnetic techniques for the treatment of materials*. Kluwer Academic Publishers.

Swain, B., Mishra, B. K., & Tripathy, S. K. (2018). Recovery and separation of heavy minerals from beach sand deposits – A review. *Journal of Cleaner Production*.

U.S. Geological Survey. (n.d.). *Titanium statistics and information*. National Minerals Information Center. Acesso em 12 de Julho de 2025. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/titanium-statistics-and-information>

Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (7ª ed.). Elsevier Science & Technology Books.

Apêndices

APÊNDICE A: Dados do cálculo da recuperação de cada fracção no primeiro estágio do circuito de ilmenite A

Test-1				Assays																		
ID	Stream	Flow rate	Yield	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
		tph	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
DM5305	Feed	17.11	100	50.61	42.74	0.96	0.25	1.70	0.14	0.02	0.32	1.49	0.10	0.53	0.14	0.00	0.08	0.03	138.35	402.15	3.70	405.85
	Mag 1	6.32	37.0	47.77	49.24	0.47	0.095	0.59	0.14	0.0163	0.28	1.42	0.09	0.095	0.045	0.001	0.0256	0.033	93	118	10	128
	Mag 2	6.72	39.3	52.76	42.06	0.75	0.188	1.06	0.14	0.0184	0.32	1.59	0.1	0.307	0.101	0.001	0.0525	0.032	149	332	0	332
	Mids	3.08	18.0	52.13	34.49	1.871	0.575	3.893	0.148	0.0336	0.356	1.44	0.117	1.387	0.326	0.001	0.2036	0.025	193	916	0	916
	N Mag	0.98	5.8	49.39	31.5	2.728	0.647	6.416	0.14	0.0384	0.39	1.35	0.108	2.237	0.393	0.001	0.2358	0.028	186	1098	0	1098

Recovery																		
	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
100.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
34.9	42.6	18.1	14.1	12.8	36.6	28.0	32.8	35.3	33.3	6.6	12.1	37.0	11.8	39.5	24.8	10.8	100.0	11.7
40.9	38.6	30.6	29.6	24.4	38.9	33.6	39.8	42.0	39.3	22.6	28.8	39.3	25.7	40.7	42.3	32.4	-	32.1
18.5	14.5	35.0	41.5	41.1	18.8	28.1	20.3	17.4	21.1	46.8	42.7	18.0	45.6	14.6	25.1	41.0	-	40.6
5.6	4.2	16.3	14.9	21.7	5.7	10.3	7.1	5.2	6.2	24.1	16.4	5.8	16.9	5.2	7.7	15.7	-	15.6

Test-2				Assays																		
ID	Stream	Flow rate	Yield	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
		tph	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
DM5305	Feed	21.56	100	51.07	43.30	0.94	0.23	1.45	0.14	0.03	0.34	1.53	0.10	0.39	0.13	0.00	0.07	0.03	128.44	357.41	2.31	359.72
	Mag 1	6.22	28.9	47.25	50.66	0.55	0.084	0.58	0.13	0.019	0.31	1.42	0.09	0.065	0.031	0.001	0.0122	0.031	72	81	8	89
	Mag 2	10.95	50.8	52.89	42.87	0.73	0.164	0.98	0.14	0.0231	0.34	1.63	0.1	0.197	0.08	0.001	0.0416	0.032	136	251	0	251
	Mids	3.02	14.0	52.52	34.56	1.782	0.61	3.362	0.148	0.0367	0.365	1.45	0.125	1.183	0.373	0.001	0.2132	0.026	187	978	0	978
	N Mag	1.35	6.3	50.63	32.41	2.514	0.664	5.02	0.143	0.0426	0.378	1.39	0.117	1.747	0.397	0.001	0.2364	0.028	196	1103	0	1103

Recovery																		
Σ2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
100.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
26.7	33.8	16.9	10.3	11.5	27.1	21.9	26.5	26.8	25.6	4.8	7.1	28.9	5.1	29.2	16.2	6.5	100.0	7.1
52.6	50.3	39.6	35.5	34.3	51.4	46.9	51.2	54.2	50.0	25.4	32.0	50.8	30.5	53.1	53.8	35.7	-	35.5
14.4	11.2	26.7	36.4	32.5	15.0	20.6	15.2	13.3	17.3	42.1	41.3	14.0	43.1	11.9	20.4	38.4	-	38.2
6.2	4.7	16.8	17.7	21.7	6.5	10.7	7.0	5.7	7.2	27.8	19.6	6.3	21.4	5.7	9.6	19.4	-	19.2

Test-3				Assays																		
ID	Stream	Flow rate	Yield	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
		tph	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
DM5305	Feed	19.93	100	51.02	43.84	0.84	0.19	1.35	0.14	0.02	0.33	1.56	0.09	0.44	0.11	0.00	0.06	0.03	127.06	377.87	12.46	390.33
	Mag 1	2.32	11.6	45.75	52.63	0.56	0.091	0.52	0.13	0.016	0.3	1.31	0.09	0.07	0.029	0	0.0175	0.033	66	71	9	80
	Mag 2	13.99	70.2	51.68	44.7	0.68	0.144	0.91	0.14	0.0205	0.32	1.61	0.09	0.222	0.084	0.001	0.0403	0.034	124	252	10	262
	Mids	2.87	14.4	52.21	35.3	1.55	0.433	3.26	0.13	0.0408	0.36	1.54	0.11	1.387	0.258	0.001	0.1464	0.032	173	1028	23	1051
	N Mag	0.74	3.7	50.42	33.07	2.06	0.463	4.8	0.13	0.0446	0.39	1.47	0.12	2.149	0.314	0.001	0.1741	0.034	198	1195	29	1224

Recovery																		
TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
100.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10.4	10.4	7.7	5.5	4.5	11.0	7.8	10.7	9.8	11.1	1.8	3.0	-	3.5	11.4	6.0	2.2	8.4	2.4
71.1	71.1	56.7	52.8	47.4	71.7	60.5	68.9	72.5	67.2	35.1	53.0	79.5	48.9	71.1	68.5	46.8	56.3	47.1
14.8	14.8	26.5	32.6	34.9	13.7	24.7	15.9	14.2	16.9	45.0	33.4	16.3	36.4	13.7	19.6	39.2	26.6	38.8
3.7	3.7	9.1	9.0	13.2	3.5	7.0	4.4	3.5	4.7	18.0	10.5	4.2	11.2	3.8	5.8	11.8	8.6	11.7

Test-4				Assays																		
ID	Stream	Flow rate	Yield	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
		tph	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
DM5305	Feed	16.68	100	50.95	42.81	1.00	0.25	1.60	0.14	0.02	0.32	1.53	0.10	0.48	0.14	0.00	0.07	0.03	127.97	414.75	16.95	431.70
	Mag 1	5.85	35.1	47.99	49.83	0.53	0.093	0.53	0.14	0.0156	0.3	1.44	0.09	0.086	0.042	0	0.0181	0.031	89	120	8	128
	Mag 2	7.68	46.0	53.17	41.23	0.84	0.217	1.2	0.14	0.0262	0.32	1.64	0.11	0.352	0.117	0.001	0.0595	0.032	137	420	13	433
	Mids	1.42	8.5	51.64	34.79	1.935	0.576	3.685	0.147	0.0339	0.354	1.45	0.12	1.245	0.315	0.001	0.1923	0.029	184	879	40	919
	N Mag	1.73	10.4	50.56	32.63	2.513	0.634	5.335	0.144	0.0372	0.392	1.39	0.118	1.742	0.383	0.001	0.2177	0.028	174	1010	46	1056

Recovery																		
TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
100.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
33.1	40.9	18.7	13.2	11.6	34.9	22.6	32.6	33.1	30.2	6.3	10.9	-	8.8	35.1	24.4	10.2	16.6	10.4
48.0	44.3	38.8	40.4	34.4	45.7	49.7	45.6	49.4	48.4	33.9	39.9	71.0	37.7	47.6	49.3	46.6	35.3	46.2
8.6	6.9	16.5	19.8	19.5	8.8	11.9	9.3	8.1	9.7	22.1	19.8	13.1	22.5	7.9	12.2	18.0	20.0	18.1
10.3	7.9	26.1	26.6	34.5	10.6	15.9	12.6	9.4	11.7	37.7	29.4	16.0	31.1	9.4	14.1	25.2	28.1	25.3

Test-5				Assays																		
ID	Stream	Flow rate	Yield	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
		tph	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
DM5305	Feed	15.36	100	50.32	44.05	0.90	0.20	1.34	0.14	0.02	0.30	1.52	0.10	0.36	0.10	0.00	0.05	0.03	115.11	335.22	13.84	349.06
	Mag 1	10.04	65.3	49.25	47.66	0.64	0.101	0.59	0.14	0.0167	0.27	1.5	0.09	0.079	0.043	0.001	0.0167	0.033	90	129	9	138
	Mag 2	4.194352	27.3	53.23	38.71	1.04	0.308	1.7	0.14	0.0348	0.34	1.62	0.11	0.631	0.161	0.001	0.0837	0.03	160	632	17	649
	Mids	0.732614	4.8	50.99	33.71	2.184	0.559	4.819	0.144	0.0372	0.342	1.44	0.116	1.428	0.321	0.001	0.1972	0.023	165	915	39	954
	N Mag	0.40034	2.6	45.37	28.38	3.674	0.753	10.166	0.129	0.048	0.423	1.24	0.121	2.643	0.464	0.002	0.2675	0.025	183	1335	56	1391

Recovery																		
TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2+HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	U+Th
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
100.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63.9	70.7	46.4	33.6	28.7	65.4	46.6	59.5	64.3	60.3	14.3	28.2	63.7	21.8	68.4	51.1	25.1	42.5	25.8
28.9	24.0	31.5	42.8	34.5	27.3	40.5	31.3	29.0	30.8	47.7	44.2	26.6	45.6	26.0	37.9	51.5	33.5	50.8
4.8	3.6	11.5	13.6	17.1	4.9	7.6	5.5	4.5	5.7	18.9	15.4	4.6	18.8	3.5	6.8	13.0	13.4	13.0
2.3	1.7	10.6	10.0	19.7	2.4	5.3	3.7	2.1	3.2	19.1	12.2	5.1	13.9	2.1	4.1	10.4	10.5	10.4

APÊNDICE B: Tabelas de dados usados para o gráfico da eficiência de separação

ID	Rendimento acumulado	Recuperação acumulada		
		TiO2	P2O5	U+Th
DM5305 (Teste 1)	0	0	0	0
	36.96	34.9	12.1	11.7
	76.24	75.8	40.9	43.8
	94.24	94.4	83.6	84.4
	100.00	100.0	100.0	100.0

ID	Cummulative Yield	Cummulative Recovery		
		TiO2	P2O5	U+Th
DM5305 (Teste 2)	0	0	0	0
	28.88	26.7	7.1	7.1
	79.69	79.3	39.1	42.6
	93.72	93.8	80.4	80.8
	100.00	100.0	100.0	100.0

ID	Cummulative Yield	Cummulative Recovery		
		TiO2	P2O5	U+Th
DM5305 (Teste 3)	0	0	0	0
	11.64	10.4	3.0	2.4
	81.86	81.6	56.1	49.5
	96.28	96.3	89.5	88.3
	100.00	100.0	100.0	100.0

ID	Cumulative Yield	Cumulative Recovery		
		TiO2	P2O5	U+Th
DM5305 (Teste 4)	0	0	0	0
	35.11	33.1	10.9	10.4
	81.15	81.1	50.8	56.6
	89.64	89.7	70.6	74.7
	100.00	100.0	100.0	100.0

ID	Cumulative Yield	Cumulative Recovery		
		TiO2	P2O5	U+Th
DM5305 (Teste 5)	0	0	0	0
	65.33	63.9	28.2	25.8
	92.63	92.8	72.4	76.6
	97.39	97.7	87.8	89.6
	100.00	100.0	100.0	100.0

APÊNDICE C: Tabelas de dados usados na interpolação linear

Tabela C1: Resultados da interpolação da recuperação do contaminante U+Th

	X1 (%)	Y1 (%)	X2 (%)	Y2 (%)	X (%)	Y (%)
Teste 1	0	0	36.96	11.7	30	9.46
Teste 2	28.88	7.1	79.69	42.6	30	7.93
Teste 3	11.64	2.4	81.86	49.5	30	14.71
Teste 4	0	0	35.11	10.4	30	8.89
Teste 5	0	0	65.33	25.8	30	11.86

Tabela C2: Resultados da interpolação da recuperação do contaminante P_2O_5

	X1	Y1	X2	Y2	X	Y
T1	0	0	36.96	12.1	30	9.81
T2	28.87817	7.1	79.69	39.1	30	7.76
T3	11.64222	3.0	81.86	56.1	30	16.90
T4	0	0	35.11	10.9	30	9.33
T5	0	0	65.33	28.2	30	12.97

APÊNDICE D: Equações

Os resultados apresentados nos apêndices C e D, foram obtidos através das seguintes fórmulas:

Rendimento (R)

$$R = \frac{\text{Massa de } x}{\text{Massa total}}$$

Recuperação (Rec)

$$Rec = \frac{R \times x_i}{x_{i,alimentação}} \times 100$$

x_i = composição do óxido de interesse na fracção

$x_{i,alimentação}$ = composição do óxido de interesse na alimentação.

Interpolação linear

$$Y = \frac{(X - X_1)(Y_2 - Y_1)}{X_2 - X_1} + Y_1$$

x- rendimento

y- recuperação

APÊNDICE E: Resultados dos testes após a separação magnética na IRMS

IP2 - Teste 1	Amps (A)	Mass	Yield (%)	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U
				%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
	0.5	98.9	8	48.75	49.39	0.66	0.132	0.38	0.14	0.0178	0.34	1.38	0.1	0.079	0	0.029	0	0.0102	0.03	88	84	7	91
	0.6	85.1	7	48.39	50.26	0.51	0.071	0.38	0.13	0.0247	0.34	1.43	0.09	0.044	0	0.027	0	0.0094	0.031	72	54	12	66
	0.7	109.5	9	48.27	50.58	0.54	0.057	0.35	0.13	0.0198	0.31	1.42	0.09	0.036	0	0.026	0	0.0083	0.033	110	64	10	74
	0.8	111.5	9	48.2	50.67	0.46	0.058	0.36	0.13	0.0211	0.32	1.44	0.08	0.032	0	0.025	0	0.0104	0.032	107	53	6	59
	0.9	156.2	13	48.27	50.9	0.48	0.055	0.33	0.13	0.0244	0.36	1.45	0.09	0.025	0	0.025	0	0.0131	0.032	103	53	11	64
	1.0	149.2	12	48.12	50.68	0.44	0.057	0.36	0.13	0.0202	0.31	1.46	0.09	0.03	0	0.025	0	0.0089	0.033	85	59	10	69
	1.1	131.7	11	48.61	50.78	0.51	0.063	0.5	0.13	0.0263	0.31	1.49	0.09	0.029	0	0.028	0.001	0.007	0.03	91	63	8	71
	1.2	101.5	8	48.19	50.4	0.55	0.072	0.43	0.12	0.0203	0.3	1.5	0.09	0.025	0	0.028	0	0.0146	0.032	114	61	9	70
Calculated	1198.9	100																					

Dailly prod		52.25																			125		
Ilmenite in THM		Ilmenite products quality - IP2 = % TiO2 - IP1 = % TiO2 - IP3/4 = % TiO2																					
	split %	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U		
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]			
IP2	100.0%	48.48	49.86	0.56	0.085	0.60	0.13	0.02	0.33	1.46	0.09	0.06	0.00	0.035	0.00	0.02	0.03	112.66	91.0114	10	101		
IP1	0.0%																						
IP3/4	0.0%																						

IP2 - Teste 2	Amps (A)	Mass	Yield (%)	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U
				%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
	0.5	55.2	5.5	47.74	49.29	0.73	0.183	0.55	0.13	0.0148	0.36	1.29	0.09	0.106	0	0.03	0.001	0.0155	0.035	76	87	7	94
	0.6	64.7	6	47.59	50.46	0.57	0.097	0.49	0.13	0.0145	0.31	1.29	0.09	0.07	0	0.025	0	0.014	0.031	72	73	9	82
	0.7	82.6	8	47.1	50.84	0.56	0.076	0.47	0.13	0.0103	0.32	1.3	0.08	0.056	0	0.022	0	0.0135	0.035	63	52	9	61
	0.8	87.4	9	46.97	51.53	0.48	0.07	0.49	0.12	0.0124	0.33	1.32	0.08	0.046	0	0.023	0	0.0133	0.035	70	49	8	57
	0.9	96.7	10	46.63	51.64	0.48	0.069	0.5	0.12	0.0116	0.31	1.34	0.08	0.035	0	0.022	0.001	0.0125	0.037	57	56	6	62
	1.0	109.5	11	46.36	51.62	0.48	0.072	0.55	0.13	0.0118	0.29	1.36	0.08	0.039	0	0.027	0	0.0083	0.037	50	58	7	65
	1.1	107.3	11	46.5	51.41	0.44	0.075	0.5	0.13	0.0118	0.3	1.38	0.08	0.035	0	0.022	0	0.0149	0.034	65	58	7	65
	1.2	116.4	12	46.71	51.26	0.51	0.068	0.49	0.12	0.0136	0.29	1.41	0.08	0.029	0	0.022	0	0.0133	0.036	67	59	7	66
Calculated	999.4	100																					

Dailly prod		52.43																			124		
Ilmenite in THM	split %	Ilmenite products quality - IP2 = % TiO2 - IP1 = % TiO2 - IP3/4 = % TiO2																					
		TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U		
				%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	%		
IP2	100.0%	47.13	50.73	0.52	0.083	0.56	0.13	0.01	0.31	1.39	0.08	0.05	0.00	0.026	0.00	0.01	0.03	69.46	67.80028	7	75		
IP1	0.0%																						
IP3/4	0.0%																						

IP2 - Teste 3				TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U
	Amps (A)	Mass	Yield (%)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	%
	0.5	228.3	23	47.46	50.56	0.65	0.135	0.41	0.13	0.0177	0.36	1.31	0.09	0.087	0	0.027	0.001	0.012	0.033	71	81	9	90
	0.6	160.3	16	46.87	51.54	0.59	0.079	0.37	0.15	0.0148	0.33	1.3	0.09	0.059	0	0.024	0	0.0135	0.031	79	63	6	69
	0.7	127.5	13	43.42	54.91	0.51	0.061	0.46	0.16	0.0133	0.31	1.3	0.08	0.023	0	0.023	0	0.0115	0.034	82	41	8	49
	0.8	104.1	10	45.27	52.68	0.47	0.06	0.36	0.16	0.0131	0.29	1.31	0.08	0.036	0	0.022	0	0.0091	0.035	81	54	8	62
	0.9	99.8	10	44.46	53.37	0.51	0.059	0.43	0.16	0.0158	0.28	1.3	0.08	0.028	0	0.023	0	0.0066	0.034	85	47	9	56
	1.0	81.6	8	44.07	54.35	0.52	0.06	0.38	0.15	0.0132	0.3	1.31	0.08	0.026	0	0.022	0	0.0002	0.035	81	51	9	60
	1.1	64.4	6	41.69	53.34	1.16	0.019	1.25	0.13	0	0	2.26	0	0.0217	0	0.08	0	0.022	0.019		81	9	90
	1.2	49.7	5	42.98	56.03	0.48	0.064	0.38	0.14	0.0115	0.31	1.28	0.07	0.028	0	0.022	0	0.0111	0.036	45	61	9	70
	1.3	29.7	3	42.08	56.19	0.53	0.074	0.45	0.16	0.0119	0.28	1.29	0.07	0.022	0	0.023	0	0.0058	0.034	81	67	9	76
	1.4	21.2	2	41.81	57.02	0.53	0.073	0.48	0.13	0.0291	0.29	1.26	0.07	0.023	0	0.024	0	0.0037	0.037	88	62	8	70
	1.4 NM	31.0	3	40.62	54.17	1.1	0.156	3.64	0.13	0.0213	0.31	1.2	0.07	0.347	0	0.072	0.002	0.0512	0.035	121	225	13	238
Calculated	997.6	100	45.0	53.0	0.61	0.08	0.56	0.15	0.01	0.30	1.36	0.08	0.06	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	73	66.980	8	75	

Daily prod			51.40																	128				
Target	Ilmenite in THM			Ilmenite products quality - IP2 = 49.2% TiO2 - IP1 = 51.9% TiO2 - IP3/4 = 55.7% TiO2																				
	split %	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U			
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]		
		IP2	100.0%	44.95	52.95	0.61	0.081	0.56	0.15	0.01	0.30	1.36	0.08	0.06	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	73.29	66.98045	8	75	
		IP1	0.0%																					
IP3/4	0.0%																							

IP2 - Teste 4				TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U
	Amps (A)	Mass	Yield (%)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
	0.5	68.0	7	48.31	49.81	0.69	0.146	0.49	0.14	0.0166	0.38	1.33	0.1	0.086	0	0.029	0.001	0.0076	0.035	95	81	8	89
	0.6	97.5	10	48.28	50.54	0.67	0.082	0.42	0.13	0.0133	0.34	1.36	0.09	0.056	0	0.026	0	0.015	0.035	101	67	10	77
	0.7	93.8	9	48.05	50.82	0.58	0.066	0.41	0.13	0.0193	0.34	1.37	0.09	0.04	0	0.025	0	0.0109	0.036	97	68	10	78
	0.8	95.2	10	48.06	51.16	0.53	0.06	0.39	0.14	0.012	0.32	1.38	0.09	0.034	0	0.024	0	0.0127	0.033	122	59	9	68
	0.9	120.9	12	47.78	51.27	0.47	0.066	0.38	0.13	0.0127	0.32	1.41	0.09	0.033	0	0.023	0	0.0098	0.033	64	76	7	83
	1.0	98.9	10	47.66	51.43	0.52	0.058	0.39	0.13	0.0124	0.3	1.43	0.09	0.032	0	0.023	0	0.0112	0.033	113	66	7	73
	1.1	103.9	10	47.52	51.33	0.55	0.058	0.42	0.13	0.0136	0.33	1.43	0.08	0.023	0	0.025	0	0.0049	0.035	116	56	6	62
	1.2	86.5	9	47.39	51.62	0.53	0.062	0.41	0.13	0.0153	0.31	1.45	0.09	0.022	0	0.025	0	0.0086	0.033	86	68	11	79
	1.3	78.8	8	47.61	51.33	0.59	0.066	0.46	0.13	0.0157	0.28	1.47	0.08	0.025	0	0.026	0	0.0087	0.033	113	62	9	71
	1.4	55.6	6	47.61	51.18	0.57	0.07	0.5	0.13	0.0168	0.28	1.49	0.08	0.024	0	0.028	0	0.0152	0.034	116	75	9	84
	1.5	38.4	4	47.66	50.75	0.62	0.083	0.48	0.14	0.016	0.28	1.48	0.08	0.025	0	0.029	0	0.0077	0.034	113	85	9	94
	1.6	24.7	2	48.27	50.11	0.63	0.105	0.51	0.13	0.016	0.29	1.51	0.09	0.025	0	0.034	0	0.0136	0.035	184	98	9	107
	1.6 NM	33.2	3	49.09	44.84	1	0.249	2.83	0.13	0.03	0.33	1.48	0.1	0.302	0	0.108	0.002	0.0752	0.032	238	378	17	395
Calculated			995.4	100																			

Daily prod		50.17																				118		
	Ilmenite in THM		Ilmenite products quality - IP2 = % TiO2 - IP1 = % TiO2 - IP3/4 = % TiO2																					
	split %	TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U			
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]		
		IP2	100.0%	47.87	50.83	0.58	0.078	0.50	0.13	0.02	0.32	1.42	0.09	0.04	0.00	0.028	0.00	0.01	0.03	108.06	79.105586	9	88	
		IP1	0.0%																					
IP3/4	0.0%																							

				TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U
IP2 - Teste 5	Amps (A)	Mass	Yield (%)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
	0.5	32.4	3.23	48.07	49.54	0.73	0.206	0.53	0.14	0.0142	0.35	1.28	0.09	0.099	0	0.032	0.001	0.0097	0.034	138	82	9	91
	0.6	35.6	3.55	48.25	50.14	0.62	0.087	0.37	0.13	0.0125	0.33	1.33	0.1	0.066	0	0.028	0	0.0096	0.033	141	89	10	99
	0.7	45.6	4.55	48.13	50.6	0.49	0.068	0.33	0.14	0.0117	0.31	1.35	0.09	0.046	0	0.027	0	0.0132	0.031	87	78	8	86
	0.8	63.7	6.36	48.07	50.18	0.54	0.061	0.4	0.13	0.0121	0.31	1.38	0.09	0.037	0	0.027	0	0.0104	0.03	119	71	9	80
	0.9	88.8	8.86	48.42	50.32	0.49	0.057	0.34	0.13	0.0128	0.35	1.43	0.09	0.022	0	0.025	0	0.0102	0.032	113	45	8	53
	1.0	98.5	9.83	48.61	50.42	0.45	0.062	0.35	0.13	0.0135	0.33	1.45	0.09	0.023	0	0.025	0	0.0096	0.029	121	49	8	57
	1.1	121.7	12.15	49.2	49.28	0.5	0.057	0.43	0.12	0.0122	0.33	1.5	0.09	0.021	0	0.026	0	0.0136	0.032	110	72	7	79
	1.2	112.9	11.27	49.7	49.13	0.48	0.07	0.43	0.13	0.0167	0.32	1.53	0.09	0.024	0	0.028	0	0.0143	0.031	120	70	9	79
	1.3	107.0	10.68	49.77	48.36	0.56	0.068	0.41	0.13	0.013	0.3	1.56	0.09	0.025	0	0.028	0	0.0124	0.031	116	66	8	74
	1.4	79.9	7.97	50.3	47.67	0.61	0.072	0.43	0.13	0.0151	0.31	1.59	0.09	0.032	0	0.031	0	0.0086	0.031	136	89	7	96
	1.5	62.2	6.21	51.14	46.57	0.53	0.082	0.45	0.12	0.013	0.3	1.63	0.09	0.026	0	0.031	0	0.0133	0.031	142	81	11	92
	1.6	46.6	4.65	52.26	45.35	0.58	0.116	0.48	0.13	0.0132	0.32	1.67	0.09	0.027	0	0.036	0	0.0156	0.031	189	91	8	99
	1.7	33.5	3.34	53.21	44.08	0.6	0.149	0.48	0.13	0.016	0.33	1.71	0.1	0.033	0	0.041	0	0.0143	0.031	218	112	8	120
	1.8	24.6	2.46	54.41	42.1	0.68	0.219	0.53	0.13	0.0161	0.34	1.69	0.11	0.036	0	0.051	0	0.0259	0.032	238	149	10	159
	1.8 NM	48.9	4.88	52.73	36.78	1.34	0.533	3.51	0.12	0.0451	0.37	1.55	0.11	0.809	0	0.245	0.003	0.2073	0.032	311	920	31	951
Calculated	1001.9	100		49.7840	48.0857	0.5753	0.1025	0.5647	0.1285	0.0152	0.3242	1.5083	0.0922	0.0690	0.0000	0.0396	0.0002	0.0218	0.0312	138.9461	115.0313	9.4364	124.4677
Daily prod				52.09																		116	
Ilmenite in THM				Ilmenite products quality - IP2 = % TiO2 - IP1 = % TiO2 - IP3/4 = % TiO2																			
	split %			TiO2	Fe2O3	Al2O3	Cr2O3	SiO2	V2O5	CaO	MgO	MnO	Nb2O5	ZrO2	HfO2	P2O5	K2O	CeO2	SnO2	PbO	Th	U	Th+U
				%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[ppm]	[ppm]	[ppm]	%
IP2	84.7%			49.21	49.22	0.53	0.072	0.40	0.13	0.01	0.32	1.48	0.09	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	120.28	69.08393	8	77
IP1	15.3%			52.96	41.82	0.84	0.272	1.45	0.13	0.02	0.34	1.64	0.10	0.28	0.00	0.11	0.00	0.08	0.03	242.01	369	16	384
IP3/4	0.0%																						

Anexos

ANEXO A: Fluxograma do processo de produção na empresa Kenmare

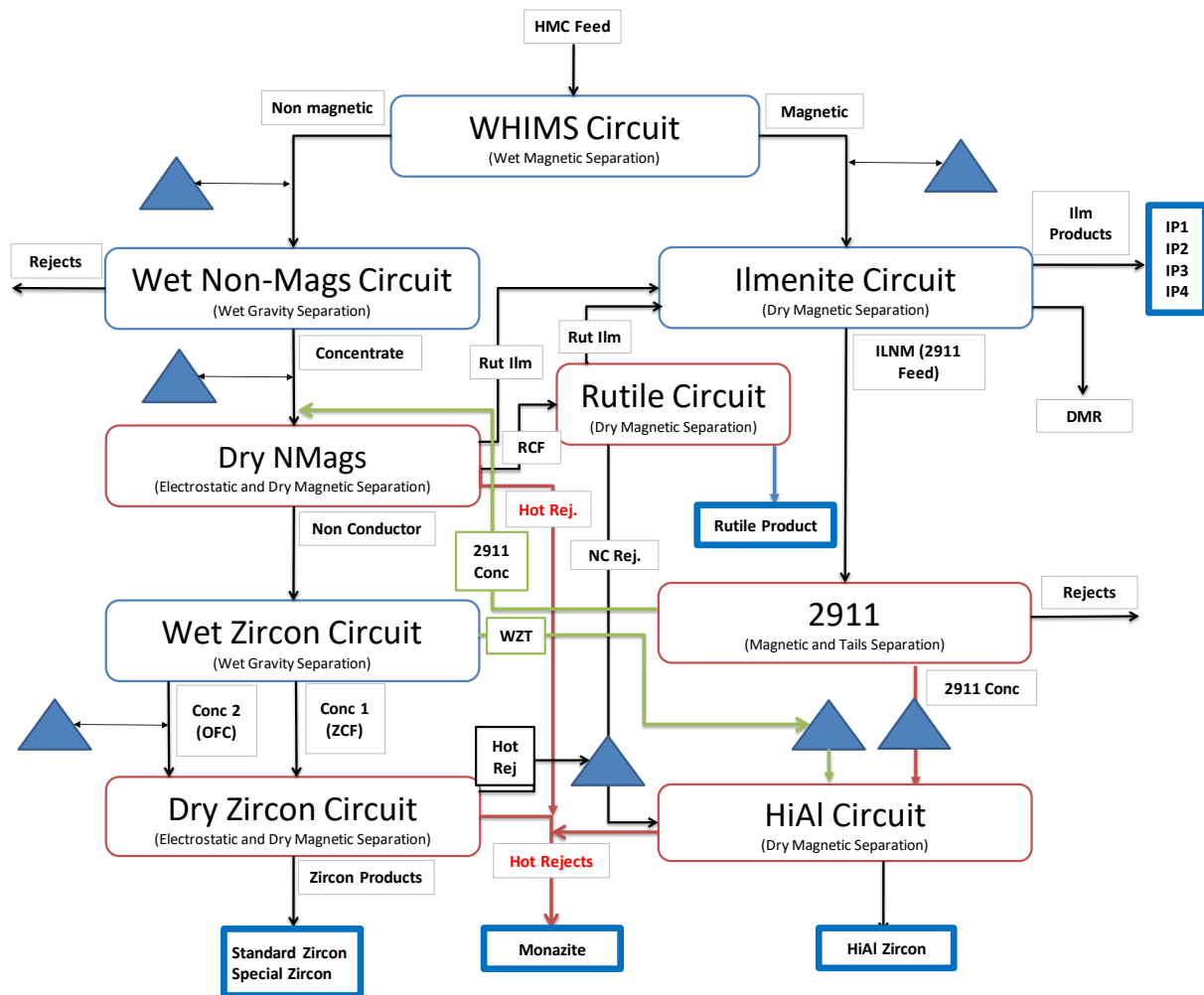


Figura A1: Diagrama de fluxo geral do MSP

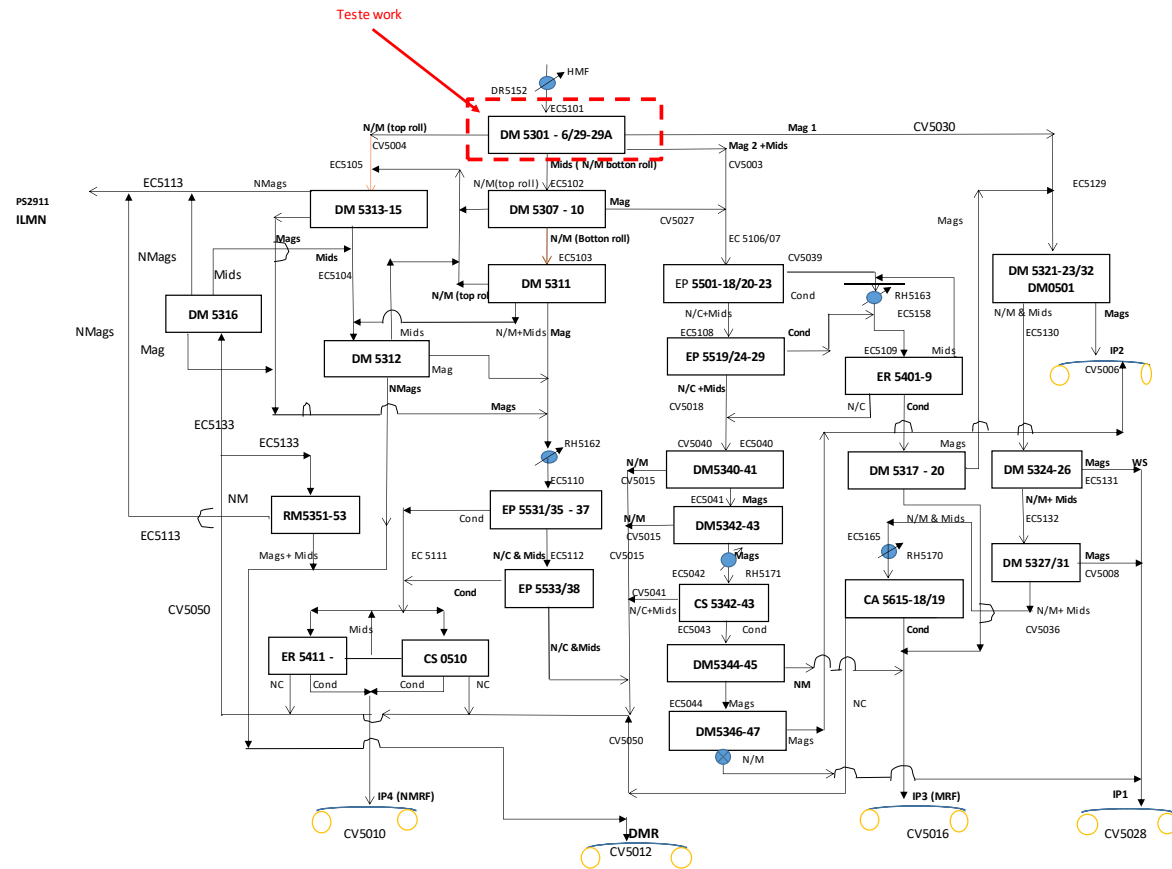


Figura A2: Diagrama de fluxo do circuito de ilmenite A