



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)
UNIDADE ACADÊMICA INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA**

RAFHAEL ALMEIDA RODRIGUES

**RECUPERAÇÃO DE CONCENTRADOS DE TITÂNIO E FOSFATO A PARTIR DOS
REJEITOS MAGNÉTICOS DE ALTO CAMPO DAS USINAS DE FOSFATO DO
COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍICO DE CATALÃO I**

**Catalão - GO
2023**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE QUÍMICA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Rafhael Almeida Rodrigues

3. Título do trabalho

RECUPERAÇÃO DE CONCENTRADOS DE TITÂNIO E FOSFATO A PARTIR DOS REJEITOS MAGNÉTICOS DE ALTO CAMPO DAS USINAS DE FOSFATO DO COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DE CATALÃO I

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Rita De Cassia Santos, Orientadora**, em 27/04/2023, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafhael Almeida Rodrigues, Usuário Externo**, em 28/04/2023, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3697369** e o código CRC **096999DD**.

RAFHAEL ALMEIDA RODRIGUES

**RECUPERAÇÃO DE CONCENTRADOS DE TITÂNIO E FOSFATO A PARTIR DOS
REJEITOS MAGNÉTICOS DE ALTO CAMPO DAS USINAS DE FOSFATO DO
COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DE CATALÃO I**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química, da Unidade Acadêmica Instituto De Química, da Universidade Federal de Catalão (UFCAT), como requisito parcial para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Química. Linha de Pesquisa: Química de Materiais.

Orientadora: Dra. Maria Rita de Cássia Santos

Catalão - GO

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Rodrigues, Raphael Almeida

Recuperação de concentrados de titânio e fosfato a partir dos rejeitos magnéticos de alto campo das usinas de fosfato do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I / Raphael Almeida Rodrigues. - 2023.

156, CLVI f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Rita De Cassia Santos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão, Instituto de Química, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Química, Catalão, 2023.

Bibliografia. Anexos.

Inclui mapas, fotografias, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Titânio. 2. Ilmenita. 3. Fosfatos. 4. Apatita. 5. Beneficiamento. I. Santos, Maria Rita De Cassia, orient. II. Título.

CDU 54



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE QUÍMICA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 24 da sessão de Defesa de Dissertação de **Rafhael Almeida Rodrigues**, que confere o título de Mestre em Química, no Programa de Pós-graduação em Química da UFCAT.

Aos seis dias do mês de abril de dois mil e vinte e três, a partir das 09:00 horas, por videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação do(a) discente **Rafhael Almeida Rodrigues**, intitulada “**RECUPERAÇÃO DE CONCENTRADOS DE TITÂNIO E FOSFATO A PARTIR DOS REJEITOS MAGNÉTICOS DE ALTO CAMPO DAS USINAS DE FOSFATO DO COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍFICO DE CATALÃO I**” na área de concentração em Química. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora Maria Rita de Cassia Santos (PPGQ-UFCAT) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Edmar Isaias de Melo (PPGQ-UFCAT), membro titular interno e Professor Doutor Bruno Elias dos Santos Costa (IQ-UFCAT), membro titular externo, cujas participações ocorreram por meio de videoconferência pelo link <https://meet.google.com/syj-fvex-fvp>. Durante a arguição os membros da banca fizeram sugestões de pequenas alterações e complementações no trabalho final. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora Maria Rita de Cassia Santos, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Não houve alteração no título



Documento assinado eletronicamente por **Edmar Isaias de Melo, Usuário Externo**, em 10/04/2023, às 12:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Elias dos Santos Costa, Usuário Externo**, em 10/04/2023, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Rita De Cassia Santos, Professora do Magistério Superior**, em 20/04/2023, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3647124** e o código CRC **BB88DC66**.

NOTA NAS TESES/DISSERTAÇÕES

Os Programas de Pós-Graduação stricto sensu em funcionamento na Universidade Federal de Catalão (UFCAT), em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, continuam provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás (UFG), por isso, todos os elementos pré-textuais do trabalho apresentado estão identificados como Universidade Federal de Goiás/Universidade Federal de Catalão em implantação, em função da migração da BDTD ter ocorrido a partir de 16 de agosto de 2021, assim como pelo fato das pesquisas e produtos serem realizados na UFCAT.

RESUMO

Com a rica e heterogênea assembleia mineral apresentada pelo Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I. A mineração de apatita no local ocasiona a geração de resíduos de tratamento/beneficiamento (rejeitos) os quais proveem interessantes oportunidades de aproveitamento econômico de novas commodities minerais para a atividade local. Especialmente, os rejeitos magnéticos de alto campo (MAC) das usinas de fosfato apresentam oportunidades de serem beneficiados em rotas alternativas, produzindo concentrados dos minerais ilmenita e apatita. Em específico, as rotas alternativas desenvolvidas neste estudo aplicaram etapas de moagem, separação magnética, flotação de sílica e titânio, resultando em concentrados ilmeníticos de 32,52% a 40,27% de teor de TiO_2 e com recuperações metalúrgicas globais de TiO_2 de 53,72% até 63,31%. Adicionalmente, os concentrados apatíticos apresentaram em média teores de 31,87% de P_2O_5 e recuperações metalúrgicas globais de P_2O_5 de 60,82%. No mais, neste estudo também foram executados testes preliminares de hidrometalurgia aos quais retrataram produtos finais com teores entorno de 77% de TiO_2 com baixas recuperações metalúrgicas globais nos ensaios realizados. Por fim, executou-se avaliações financeiras abordando a premissa da recuperação de tais rejeitos produzindo os concentrados ilmeníticos e apatíticos e comercializando estes no mercado. Estas estimativas proveram valores de receita e lucro entorno de 52,6 e 40,3 milhões de reais anuais respectivamente para a mineradora do estudo. Dispondo assim, uma possibilidade de geração de maior valor agregado possível para as atividades realizadas pela mineradora e a sociedade goiana como um todo.

Palavras-chave: Titânio; Ilmenita; Fosfatos; Apatita; Beneficiamento

ABSTRACT

With the rich and heterogeneous mineral assembly presented by the Catalão I Alkaline-Carbonatite Complex, mining of apatite on site generates treatment/beneficiation waste (tailings) that provide interesting opportunities for economic utilization of new mineral commodities for the local activity. Specifically, high magnetic field tailings (MAC) from phosphate plants present opportunities to be processed through alternative routes, producing concentrates of ilmenite and apatite minerals. In this study, alternative routes were developed involving grinding, magnetic separation, silica and titanium flotation, resulting in ilmenite concentrates ranging from 32.52% to 40.27% TiO_2 grade with global metallurgical TiO_2 recoveries ranging from 53.72% to 63.31%. In addition, apatite concentrates showed an average grade of 31.87% P_2O_5 with global metallurgical P_2O_5 recoveries of 60.82%. Preliminary hydrometallurgical tests were also performed, which resulted in final products with TiO_2 grades of around 77% but with low global metallurgical recoveries in the tests performed. Finally, financial evaluations were conducted on the premise of recovering such tailings and producing ilmenite and apatite concentrates for commercialization in the market. These estimates provided revenue and profit values around 52.6 and 40.3 million Brazilian reais annually, respectively, for the mining company in the study. This presents a possibility for generating greater added value for the activities carried out by the mining company and for the society of Goiás as a whole.

Keywords: Titanium; Ilmenite; Phosphates; Apatite; Beneficiation

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos institutos de pesquisa CAPES, CNPQ e FUNAPE pelo financiamento concedido durante a realização deste trabalho. Sem o apoio financeiro desses órgãos, este projeto não teria sido possível. Também sou extremamente grato a empresa de mineração foco desta dissertação por seu apoio e suporte ao longo deste projeto. Seu compromisso com a pesquisa e inovação é inspirador e foi um privilégio ter a oportunidade interagir e colaborar com uma empresa tão visionária.

Sou grato ao Instituto de Química da UFCAT por me proporcionar um ambiente acadêmico rico em conhecimento e por me permitir ter acesso aos recursos necessários para conduzir minha pesquisa. Agradeço também ao Laboratório Multidisciplinar de Nanomateriais (LMN) por me acolher e fornecer acesso aos seus recursos avançados e equipamentos necessários para a realização de experimentos importantes para o meu trabalho. A colaboração e o suporte da equipe do LMN foram inestimáveis.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os professores e colegas que me apoiaram ao longo deste projeto, em especial a minha orientadora Dra. Maria Rita de Cássia Santos. Suas contribuições e conselhos foram fundamentais para o sucesso desta dissertação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização de operações de mineração em Ouvidor, Goiás	13
Figura 2 - Aumento de teor de TiO_2 na alimentação (ROM) da usina	14
Figura 3 - Imagem do Elemento Titânio na Tabela Periódica.....	18
Figura 4 - Fotos de Principais Minerais de Titânio	19
Figura 5 - Composição de massas de Ilmenita e Cromita atraídas de acordo com o magnetismo aplicado	26
Figura 6 - Requisitos de matérias-primas e demais produtos para os processos ...	29
Figura 7 - Fluxograma das etapas dos processos de sulfatação e cloretação.....	31
Figura 8 - Histórico de preços de concentrado ilmenítico Austrália (FOB)	32
Figura 9 - Processo de beneficiamento de run-of-mine (ROM) da Millennium em Mataraca-PB	36
Figura 10 - Etapas de beneficiamento e valores operacionais da atividade da empresa titânio Goiás em Santa Bárbara de Goiás – GO.....	37
Figura 11 - Desenho de alto forno e área de aplicação de concentrado de titânio ...	38
Figura 12 - Relações entre a química, os tipos de minério e os níveis de intemperismo do complexo carbonatítico.	42
Figura 13 - Fluxo do processo de britagem da mineradora estudada	44
Figura 14 - Fluxo de processo de beneficiamento de apatita da mineradora	45
Figura 15 - Máquina de fusão elétrica em operação (TheOx) (Imagem Superior) / Elementos da máquina de fusão elétrica (TheOx) (Imagem Inferior).....	47
Figura 16 - Pastilhas prontas para a leitura no equipamento de FRX.....	48
Figura 17 - Equipamento de Fluorescência de raio X Axios da marca Panalytical....	49
Figura 18 - Difratômetro de raios-X de bancada AERIS Minerals da Panalytica.....	50
Figura 19 - Amostra moída com utilização de pistilo & posicionamento do material no aro de pastilha.....	51
Figura 20 - Equipamento de MEV modelo VEGA3 da marca Tescan	52
Figura 21 - Molde de seção polida e silicone para revestimento de molde (esquerda). Moldes com amostras posicionadas (centro). Seções polidas prontas (direita).....	52
Figura 22 - Separador magnético de alto campo (matriz) utilizado (a) Frente (b) Verso.....	54
Figura 23 - Representação de corrente x intensidade magnética do separador	54
Figura 24 - Deslamagem laboratorial utilizada para os ensaios (a)lateral (b)frente .	55

Figura 25 - Aparência da flotação laboratorial de sílica em execução (a & b).....	56
Figura 26 - Etapa de flotação <i>rougher</i> laboratorial de titânio em execução (a & b)...	57
Figura 27 - Gráfico de recuperação do TiO ₂ por tipo e dosagem de ácido.....	58
Figura 28 - Teores de TiO ₂ em rejeitos (Usina 47).....	61
Figura 29 - Teores de TiO ₂ em rejeitos (Usina 76).....	61
Figura 30 - Histogramas de teores de TiO ₂ (MAC) Us. 47&76.....	62
Figura 31 - Histogramas de teores de TiO ₂ (MAG) Us. 47&76.....	62
Figura 32 - Vistas do equipamento WHIMS (a)Superior e (b)Lateral.....	64
Figura 33 - Distribuição granulométrica de 9 amostras aleatórias do MAC em 2020	65
Figura 34 - Média de distribuição granulométrica de 9 amostras aleatórias do MAC em 2020.....	65
Figura 35 - Distribuição metalúrgica de P ₂ O ₅ em granulometria (9 amostras MAC) .	66
Figura 36 - Média de distribuição metalúrgica de P ₂ O ₅ em granulometria (MAC).....	67
Figura 37 - Distribuição metalúrgica de TiO ₂ em granulometria (9 amostras MAC) ..	68
Figura 38 - Média de distribuição metalúrgica de TiO ₂ em granulometria (MAC).....	68
Figura 39 - Comparativo de distribuições metalúrgicas (TiO ₂ & P ₂ O ₅) e mássica em termos de granulometria (média de 9 amostras aleatórias do MAC no ano de 2020).....	69
Figura 40 - Caracterização geológica (DRX) da pilha de minério N°59 de 2020.....	70
Figura 41 - Caracterização geológica (DRX) da pilha de minério N°62 de 2020.....	70
Figura 42 - Caracterização geológica (DRX) da pilha de minério N°76 de 2020.....	71
Figura 43 - Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostra de granulometria superior a 400 mesh (MAC Pilha n°71).....	73
Figura 44 - Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostra de granulometria inferior a 400 mesh (MAC Pilha n°71).....	74
Figura 45 - Descrição de ensaios e etapas para cada teste realizado (Teste I – Ensaios da letra “A” até “V”).....	80
Figura 46 - Gráfico de teor de TiO ₂ x recuperação metalúrgica de TiO ₂ para cada rota realizada no teste I.....	83
Figura 47 - Análise de rejeitos das rotas com base em teor de P ₂ O ₅ e partição (recuperação) metalúrgica de P ₂ O ₅	86
Figura 48 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota B.....	90
Figura 49 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota F.....	91
Figura 50 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota B.....	93

Figura 51 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota F1	94
Figura 52 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota F2	95
Figura 53 - Rotas de separações magnéticas de baixa e alta para redução de teores de ferro nos fluxos de concentrado apatítico.....	96
Figura 54 - Comparativo de concentrados produzido pelas rotas B, F1 e F2	104
Figura 55 - Resultados de remoção de Fe_2O_3 e concentração de P_2O_5 em baixo campo rota F1	105
Figura 56 - Resultados de remoção de Fe_2O_3 e concentração de P_2O_5 em alto campo rota F1	106
Figura 57 - Resultados de remoção de Fe_2O_3 e concentração de P_2O_5 em baixo campo rota F2	107
Figura 58 - Resultados de remoção de Fe_2O_3 e concentração de P_2O_5 em alto campo rota F2	107
Figura 59 - Comparativo de concentrados produzido pelas rotas B, F1 e F2	108
Figura 60 - Balanço de massa global dos principais compostos de interesse (TiO_2 , P_2O_5 e Fe_2O_3) da rota F original (Teste I).....	111
Figura 61 - Balanço de massa global dos principais compostos de interesse (TiO_2 , P_2O_5 e Fe_2O_3) da rota F2 (Teste II)	112
Figura 62 - Preço de concentrado ilmenítico FOB Austrália pela Image Resources 2020-2021	119
Figura 63 - Receita total do estudo (iniciativa de concentrado ilmenítico mais apatítico).....	125
Figura 64 - Estimativa de resultado final da utilização da rota considerando a operação durante o ano de 2021	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Mineralógicas da ilmenita	20
Tabela 2 - Características mineralógicas do rutilo.....	21
Tabela 3 - Características mineralógicas do anatásio	22
Tabela 4 - Testes de flotação em bancada (+) com e (-) sem modificação superficial por irradiação de micro-ondas em diferentes estudos.....	28
Tabela 5 - Testes de flotação em bancada (+) com e (-) sem modificação superficial por dissolução superficial em diferentes estudos	28
Tabela 6 - Principais produtores de titânio no mundo 2021 & 2022	33
Tabela 7 - Capacidade produtiva de pigmento de titânio em 2022 por países (Kt) ...	34
Tabela 8 - Tabela de dosagens de reagente para a flotação de sílica	56
Tabela 9 - Tabela de dosagem de reagentes para a flotação de titânio.....	57
Tabela 10 - Parâmetros utilizados para os ensaios de concentração hidrometalúrgica de titânio.....	59
Tabela 11 - Média de teores de óxidos durante o ano de 2020 no rejeito MAC.....	64
Tabela 12 - Análise de espectroscopia por energia dispersiva em 16 pontos de aleatórios de ilmenita na amostra de pilha N°71 em granulometria superior a 400 mesh	76
Tabela 13 - Análise de espectroscopia por energia dispersiva em 16 pontos de aleatórios de ilmenita na amostra de pilha N°71 em granulometria inferior a 400 mesh	77
Tabela 14 - Teores de alimentação do Teste I.....	79
Tabela 15 - Descrição de pontos pela composição de concentrados da flotação de titânio.....	81
Tabela 16 - Resultado da composição de fluxos da flotação de titânio nos ensaios de melhor performance (F & B).....	84
Tabela 17 - Composição de teores de óxidos na melhor rota de ensaio (rota F).....	84
Tabela 18 - Teores e recuperações de rejeitos de rota os quais apresentaram melhores resultados para aproveitamento de concentrado apatítico (P ₂ O ₅).....	86
Tabela 19 - Avaliação da capacidade de recuperação de P ₂ O ₅ das rotas F & B	87
Tabela 20 - Comparativo de performance de partição metalúrgica de P ₂ O ₅ na flotação de sílica entre rotas F & B.....	88
Tabela 21 - Teores de alimentação do Teste II.....	97

Tabela 22 - Distribuição de massa, P ₂ O ₅ e TiO ₂ da alimentação do teste II	97
Tabela 23 - Balanço de massa de fluxos de rejeito e concentrado da rota B.....	98
Tabela 24 - Balanço de massa de fluxos de rejeito e concentrado da rota F1	100
Tabela 25 - Teores de TiO ₂ e óxidos contaminantes no magnético e não magnético de alto campo (etapa final) da Rota F1	101
Tabela 26 - Balanço de massa de fluxos de rejeito e concentrado da rota F2.....	102
Tabela 27 - Teores de TiO ₂ e óxidos contaminantes no magnético e não magnético de alto campo (etapa final) da Rota F2	103
Tabela 28 - Especificação de concentrado de ilmenita	113
Tabela 29 - Performance de produção de concentrado de ilmenita	113
Tabela 30 - Especificação de concentrado apatítico	113
Tabela 31 - Performance de produção de concentrado apatítico.....	114
Tabela 32 – Classificação granulométrica de produtos.....	114
Tabela 33 - Resultados dos testes de hidrometalúrgia de produção de pigmento de titânio (TiO ₂)	116
Tabela 34 - Especificação de produtos de concentrados de ilmenita vendidos pela URAL SPETS SPLAV em 2022.....	120
Tabela 35 - Especificação de concentrado de ilmenita vendido pela Mineral Commodities LTD.....	120
Tabela 36 - Especificação de produtos de titânio comercializados pela Titânio Goiás	121
Tabela 37 - Valores de comercialização de produtos da Titânio Goiás em Out/2021	121

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	MINERAÇÃO E TERMOS	17
3.2	O ELEMENTO TITÂNIO (TI)	18
3.3	A MINERALOGIA DO TITÂNIO	19
3.3.1	Ilmenita	20
3.3.2	Rutilo	21
3.3.3	Anatásio	21
3.4	USOS E APLICAÇÕES	22
3.4.1	Impacto do fósforo no concentrado de titânio	23
3.5	REVISÃO DE ESTUDOS DE CONCENTRAÇÃO DO MINERAL ILMENITA A PARTIR DE REJEITOS	24
3.5.1	Concentração gravimétrica	25
3.5.2	Separação Magnética	25
3.5.3	Flotação	26
3.6	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PRODUTOS DE TITÂNIO (PIGMENTOS & LIGAS)	29
3.6.1	Pigmentos de TiO₂ por Sulfatação	29
3.6.2	Pigmentos de TiO₂ por Cloretação	30
3.7	VALORES COMERCIALIZADOS & PRODUÇÕES MUNDIAIS	31
3.7.1	Produção Mundial de Concentrado de Titânio	32
3.7.2	Produção Mundial de Pigmento de Titânio	34
3.8	CENÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO DE CONCENTRADO ILMENÍTICO E PIGMENTO DE TITÂNIO (BRASIL)	35
3.8.1	Processo Produtivo da Millennium em Mataraca – PB	36
3.8.2	Processo Produtivo da Titânio Goiás em Santa Bárbara de Goiás – GO	37
3.9	GEOLOGIA DA MINA EM OUVIDOR-GO	39
3.10	EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO	42
3.10.1	Lavra	43
3.10.2	Britagem	43
3.10.3	Beneficiamento de Fosfato	44
4	METODOLOGIA	46
4.1	METODOLOGIA DE CARACATERIZAÇÃO	46
4.1.1	Fluorescência de Raios-X (FRX)	46
4.1.2	Difração de Raio-X (DRX)	49

4.1.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	51
4.2	METODOLOGIA DE BENEFICIAMENTO MINERAL.....	53
4.2.1	Separação Magnética de Baixo Campo (Esferas)	53
4.2.2	Separação Magnética de Alto Campo (Matriz)	53
4.2.3	Separação Magnética de Baixo Campo (Matriz)	54
4.2.4	Deslamagem & Escrubagem	55
4.2.5	Flotação de Sílica Padrão	55
4.2.6	Flotação de Titânio	56
4.3	METODOLOGIA DE HIDROMETALÚRGIA	58
5	ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO TITÂNIO PRESENTE	60
5.1.1	Caracterização Química & Granulométrica do MAC (Magnético de Alto Campo)	64
5.1.2	Caracterização Mineralógica do MAC (Magnético de Alto Campo)	69
6	ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO MINERAL (TESTE I)	79
6.1	RESULTADOS OBTIDOS – CONCENTRAÇÃO DE TiO ₂	81
6.2	RESULTADOS OBTIDOS – CONCENTRAÇÃO DE P ₂ O ₅	85
7	APERFEIÇOAMENTO DE ENSAIO DE BENEFICIAMENTO MINERAL (TESTE II)	92
7.1	RESULTADOS OBTIDOS – CONCENTRAÇÃO DE TiO ₂	98
7.1.1	Comparativo de Rotas – Concentração de TiO₂	103
7.2	RESULTADOS OBTIDOS – CONCENTRAÇÃO DE P ₂ O ₅	105
7.2.1	Comparativo de Rotas – Concentração de P₂O₅	108
8	BALANÇO DE MASSAS E ESPECIFICAÇÕES DE CONCENTRADOS (TiO₂ & P₂O₅)	110
9	ENSAIOS DE HIDROMETALÚRGICOS PARA A PRODUÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO (PIGMENTO DE TiO₂)	115
10	AVALIAÇÃO FINANCEIRA DO ESTUDO	118
10.1	RECEITA DE CONCENTRADO ILMENÍTICO	118
10.2	RECEITA DE CONCENTRADO APATÍTICO.....	123
10.3	CUSTOS OPERACIONAIS ASSOCIADOS NA PRODUÇÃO DOS CONCENTRADOS	124
10.4	RECEITA TOTAL.....	125
10.5	RESULTADO FINANCEIRO FINAL.....	126
10.6	REDUÇÃO DE GASTOS COM DEPOSIÇÃO DE REJEITO	127
11	ESTUDOS FUTUROS	128
11.1	APRIMORAMENTO DOS ENSAIOS HIDROMETALÚRGICOS	128
11.2	TEORES DE FÓSFORO (P) NO CONCENTRADO ILMENÍTICO.....	128
11.3	AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE ELEMENTOS RADIOATIVOS (TÓRIO E URÂNIO)....	129
12	CONCLUSÃO	130
13	BIBLIOGRAFIA	132
14	ANEXOS	138
14.1	ANEXO A – DIFRATOGRAMAS (DADOS PRIMÁRIOS E INTERPRETADOS)	138

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM em 2016 no livro ‘Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração’:

“A mineração compreende um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar ou beneficiar e transformar recursos minerais de forma a torná-los benefícios econômicos e sociais.”

Contudo, a geração de passivos ambientais (resíduos) é um item inerente decorrente da atividade de mineração. Nesta geração de resíduos, há a existência de dois tipos de materiais sendo estes: resíduos sólidos de extração (estéril) e tratamento/beneficiamento (rejeitos) (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM, 2016). Tais passivos usualmente geram grandes custos associados para tratamento e deposições destes.

Esta característica não se apresenta distante da realidade das atividades de mineração realizadas por mineradoras em Ouvidor, Goiás. Em específico, as operações de mineração em Ouvidor - GO localizam-se no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I presente no estado de Goiás (Figura 1). Sendo está uma área a qual possui uma complexa geologia com uma grande riqueza mineral. A operação de mineração foco do estudo desta dissertação realiza a extração e beneficiamento de minério para produção de fosfato.

Sendo assim, como resultado destes beneficiamentos volumes significativos de resíduos de tratamento/beneficiamento (rejeitos) são gerados. Entretanto, devido a riqueza mineral apresentada pela jazida oportunidades de aproveitamento econômico de novos bens minerais surgem. Onde o estudo e desenvolvimento de rotas de beneficiamento podem dar um novo destino aos rejeitos, transformando materiais anteriormente considerados passivos ambientais, financeiros e sociais em atuais ativos para a empresa e sociedade.

Figura 1 - Localização de operações de mineração em Ouvidor, Goiás

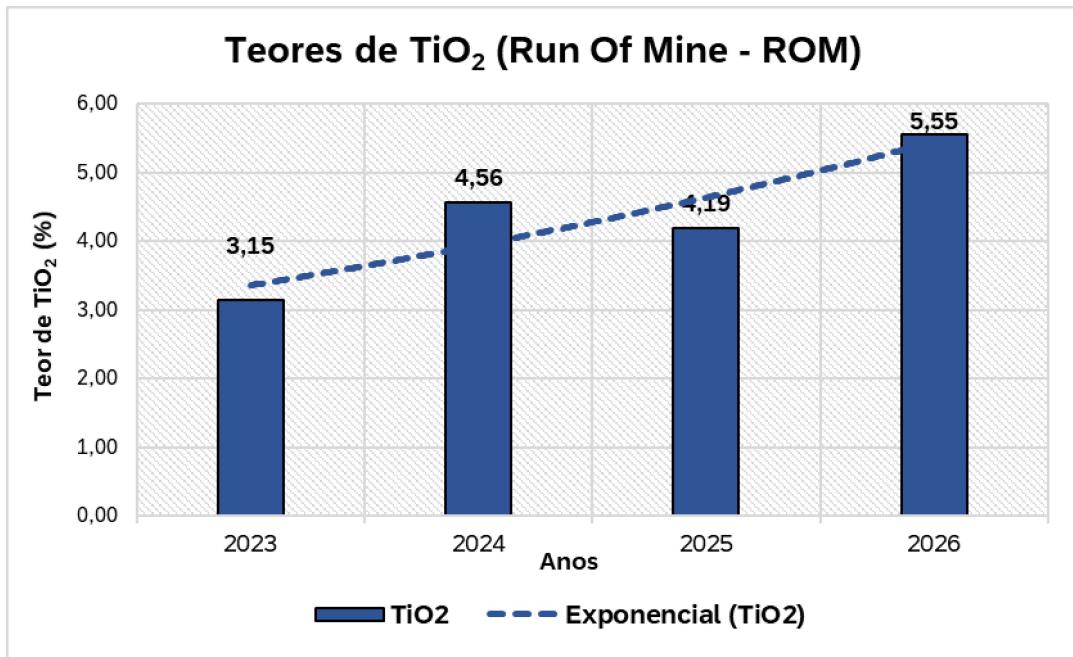


Fonte: (Google Maps, 2023) Modificado

No mais, o beneficiamento mineral de fosfato da empresa estudada é realizado por duas usinas. Nestas, durante o próprio fluxo de beneficiamento para concentração de P_2O_5 acabam produzindo se rejeitos os quais são passivos que incorrem em gastos para transporte, deposição e monitoramento. Contudo, foi observado a oportunidade de aproveitamento econômico destes rejeitos relacionados aos minerais de titânio ocasionando assim, uma oportunidade de retorno financeiro e redução de impactos ambientais com estes resíduos.

Adicionalmente, a lavra da atual mina da empresa apresenta se desenvolvendo para outras áreas de minério, aos quais apresentam teores maiores de minerais contaminantes de titânio associados ao minério de interesse (apatita). Visto tal fato o aumento dos teores deste contaminante na alimentação incidirá em aumentos no teor do mesmo contaminante no rejeito do processo. Sendo está, outra motivação adicional para o desenvolvimento de uma rota focada no aproveitamento deste elemento (Figura 2).

Figura 2 - Aumento de teor de TiO_2 na alimentação (ROM) da usina



Fonte: Elaborado pelo Autor

2 OBJETIVOS

Os objetivos do estudo apresentado podem ser divididos em objetivos gerais e específicos sendo estes mencionados abaixo:

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica e econômica da recuperação de rejeitos magnéticos de alto campo (MAC) das usinas de fosfato da empresa foco de estudo desta dissertação, presente no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I. Por meio do desenvolvimento de uma rota de beneficiamento mineral e química que permita a produção de concentrados de titânio e se possível de fosfato.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar análises químicas, mineralógicas e de dados dos rejeitos para caracterizar as concentrações e origens mineralógicas de titânio e fosfato presentes nos mesmos;
- Realizar a escolha de rejeitos de maior viabilidade de recuperação para a produção de produtos concentrados de titânio;
- Desenvolver uma rota de beneficiamento mineral que permita a recuperação dos minerais de interesse, com a produção de concentrados de titânio e fosfato;
- Avaliar a viabilidade técnica e econômica da rota de beneficiamento mineral proposta, considerando a qualidade dos concentrados produzidos e os custos envolvidos no processo;
- Contribuir para o aumento do valor agregado das atividades de mineração de apatita realizadas no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I, gerando

novas oportunidades de aproveitamento econômico dos rejeitos de tratamento/beneficiamento.

- Desenvolver uma alternativa eficaz aos rejeitos gerados provendo uma redução de impactos ambientais e auxílio na geração de riquezas para o setor mineral da sociedade goiana.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica deste estudo, serão exploradas informações relevantes sobre mineração em geral, mineralogia, processos de concentração, a economicidade do titânio, processos de beneficiamento e geologia do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I.

3.1 MINERAÇÃO E TERMOS

Como citado por Lacerda (2009), a mineração pode ser definida como um conjunto de atividades que envolvem a extração de minerais valiosos presentes no subsolo, com o objetivo de suprir a demanda de matérias-primas necessárias para diversos setores da economia, como a indústria de construção civil, metalurgia, energia e eletrônica, entre outros. Essa atividade é realizada em diversas regiões do mundo e representa uma importante fonte de receita para muitos países. Para entender melhor o processo de mineração, é necessário compreender alguns termos técnicos que são utilizados na área sendo estes mencionados a seguir:

Minério é definido pelo CETEM (2010) como uma substância mineral útil que pode ser extraída com lucro, após a aplicação de métodos de concentração e beneficiamento adequados. Já o estéril é composto por materiais que não possuem valor econômico, ou seja, não há interesse em sua extração, e que precisam ser removidos para que o minério seja acessado (CETEM, 2015).

O rejeito, por sua vez, é o material remanescente do processo de beneficiamento, o qual pode apresentar características físicas, químicas e/ou mineralógicas distintas do minério original, e que não possui valor comercial (CETEM, 2010).

Adicionalmente, para avaliar o processo de beneficiamento realizado na mineração alguns indicadores de performance são utilizados. Em específico, o indicador de performance recuperação metalúrgica, segundo o CETEM (2019), é utilizado para avaliar a eficiência do processo de concentração mineral em relação à

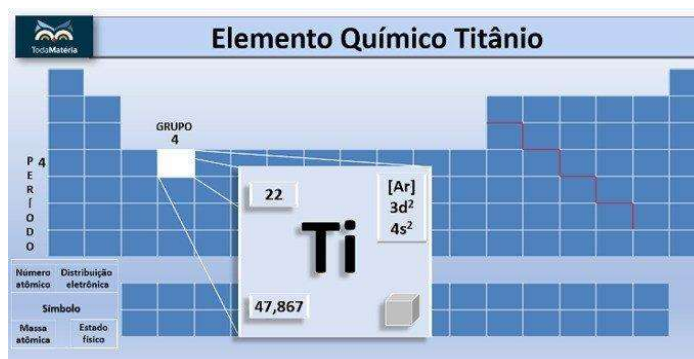
quantidade de metal que é recuperado em relação à quantidade presente no minério. Essa recuperação é medida em percentagem, e indica a proporção do metal que foi efetivamente recuperado em relação à quantidade total presente no minério.

Já a recuperação mássica é uma medida utilizada para avaliar a eficiência do processo de concentração mineral em relação à quantidade de massa que é recuperada em relação à quantidade presente no minério (CETEM, 2015). Essa recuperação também é medida em percentagem, e indica a proporção da massa do minério original que é efetivamente recuperada no processo de concentração.

3.2 O ELEMENTO TITÂNIO (Ti)

A descoberta do elemento titânio (Ti) ocorreu em 1791 por W.Gregor no mineral ilmenita (FeTiO_3). Esse elemento apresenta-se com o número atômico (Z) de 22 e com massa atômica de 47,90 (Da) no grupo dos metais de transição (Figura 3). Adicionalmente, este destaca-se por excelentes propriedades físicas como: ponto de fusão em 1668°C , ponto de ebulição em 3287°C , baixa massa específica ($4,54 \text{ g/cm}^3$) e módulo de tensão de elasticidade (acima de $12,7 \times 10^4 \text{ MPa}$). Sendo que das propriedades mencionadas, destacam-se a massa específica e o módulo de tensão de elasticidade. Por exemplo a massa específica dos aços são entorno de $7,87 \text{ g/cm}^3$, ou seja, o dobro da massa específica do titânio. Adicionalmente, este possui propriedades mecânicas como tensão específica e rigidez muito altas usualmente superior a ligas (BRAGA, FERREIRA e ALVES CAIRO, 2006).

Figura 3 - Imagem do Elemento Titânio na Tabela Periódica



Fonte: (SEMENOV, 2022)

No mais, o Ti apresenta uma alta reatividade que acaba sendo uma desvantagem em seu processamento. Em específico, outros elementos combinam-se facilmente com o titânio principalmente gases como oxigênio e nitrogênio podendo ocasionar perda de ductibilidade deste. Além disso, este elemento apresenta elevada resistência a corrosão, ligas de titânio são capazes de resistir facilmente em meios oxidantes como HNO_3 e agentes redutores como HCl e H_2SO_4 , quando estes encontram-se diluídos. O titânio apresenta baixíssima toxicidade sendo fisiologicamente inerte, contudo, o pó é carcinogênico. Portanto, devido a essas características o mesmo é de excelente utilização na forma metálica ao qual requer biocompatibilidade como; próteses dentárias e médicas (BRAGA, FERREIRA e ALVES CAIRO, 2006).

3.3 A MINERALOGIA DO TITÂNIO

De acordo com o livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações do CETEM em 2008, o elemento titânio pode ser obtido na natureza de forma comercial por fontes minerais, sendo algumas destas descritas abaixo (Figura 4).

Figura 4 - Fotos de Principais Minerais de Titânio



Fonte: (MORAES e SEER, 2018)

3.3.1 Ilmenita

Sua composição é relativa a um óxido de ferro e titânio (FeTiO_3) onde teoricamente apresenta Fe (36,8%), Ti (31,6%) e O (31,6%). O mineral em questão apresenta cor preta, com lustre metálico a submetálico (Figura 4) em sua forma inalterada e fresca (Tabela 1). Adicionalmente, a ilmenita apresenta fórmula geral MTiO_3 , sendo que a letra “M” pode representar os elementos: ferro, magnésio, manganês e zinco.

Outros minerais que pertencem ao mesmo subgrupo são: pyrophanita (óxido de titânio e manganês, ecandrewsita (óxido de titânio, zinco, ferro e manganês); e principalmente a geikielita (óxido de titânio e magnésio). A oxidação e lixiviação do elemento ferro presente na ilmenita gera os minerais secundários de titânio rutilo, anatásio ou leucoxênio (CETEM, 2008). A ilmenita alterada apresenta-se insolúvel em ácido, contudo, se fresca é solúvel em H_2SO_4 e HCl (GARNAR e STANAWAY, 1987).

Tabela 1 - Características Mineralógicas da ilmenita

Propriedades	Ilmenita
Composição química	FeTiO_3
Sistema cristalino	Trigonal
Hábito cristalino	Variado
Cor	Preta
Brilho	Metálico a submetálico
Dureza	5 - 6
Densidade	4,5 - 5 g/cm^3
Fratura	Conchoidal a subconchoidal
Clivagem	Ausente
Transparência	Opaco
Susceptibilidade magnética	Fraca

Fonte: (LUZ e LINS, 2008)

3.3.2 Rutilo

No mesmo contexto, o rutilo apresenta-se como outro mineral economicamente fonte de titânio e de acordo com CETEM em 2008 o rutilo (Figura 4) pode ser descrito como:

“ [...] um dióxido de titânio (TiO_2) essencialmente cristalino. A ocorrência de impurezas, tais como SiO_2 , Cr_2O_3 , V_2O_5 , Al_2O_3 e FeO , invariavelmente reduz o conteúdo de TiO_2 para a faixa de 94 a 98%. O elevado teor em Ti faz com que o rutilo seja o mais valorizado entre os minerais de titânio. O nome rutilo vem do latim rutilus, que significa avermelhado. Pertencem à classe mineralógica do rutilo, a pirolusita (MnO_2) e a cassiterita (SnO_2), entre outros.” (LUZ e LINS, 2008)

De forma similar, a seguir apresenta-se uma listagem de características mineralógicas principais do rutilo na tabela 2.

Tabela 2 - Características mineralógicas do rutilo

Propriedades	Rutilo
Sistema cristalino	Tetragonal
Cor	Marrom amarelado a vermelho escuro
Brilho	Adamantino a submetálico
Dureza	6,0 – 6,5
Densidade	4,3 g/cm ³
Fratura	Superfícies planas (sem clivagem) fraturadas em padrão irregular.
Clivagem	[110] Distinto
Transparência	Transparente, translúcido, opaco

Fonte: (LUZ e LINS, 2008)

3.3.3 Anatásio

O anatásio pode ser descrito como um mineral cristalizado em sistema tetragonal com brilho e cor variáveis (Figura 4). Em específico, o mesmo apresenta-se como um óxido de titânio trimorfo, ou seja, o mesmo representa uma das três

formas polimorfos do rutilo e da brookita. Usualmente grandes quantidades de anatásio são encontrados em depósitos carbonatíficos como os dos municípios de Tapira e Araxá (LUZ e LINS, 2008). No mais, na tabela 3 apresenta-se a listagem de características mineralógicas do anatásio.

Tabela 3 - Características mineralógicas do anatásio

Propriedades	Anatásio
Sistema cristalino	Tetragonal
Cor	Variada (preto, marrom avermelhado, marrom amarelado, azul escuro, cinza)
Brilho	Adamantino, resinoso
Dureza	5,5 a 6,0
Densidade	3,9 g/cm ³
Fratura	Conchoida
Clivagem	[101] Perfeito, [001] Distinto
Transparência	Transparente a translúcido

Fonte: (LUZ e LINS, 2008)

3.4 USOS E APLICAÇÕES

Grande parte dos concentrados de titânio são convertidos em pigmento de titânio (TiO₂) e utilizado na indústria de produção de tintas. Na forma de TiO₂ o material é empregado como pigmento capaz de branquear, conferir luminosidade e opacidade a diversos produtos entre eles: plásticos, papel e tintas. Adicionalmente, o TiO₂ é inerte ao corpo humano não apresentando toxicidade. Sendo assim, usado em produtos que caso apresentassem qualquer toxicidade poderiam ser danosos aos consumidores estes produtos incluem leite desnatado, pasta de dente e protetor solar (MORAES e SEER, 2018). Referencialmente, cerca de 95% das aplicações de titânio apresentam-se relacionadas as atividades acima mencionadas (J MENDO CONSULTORIA, 2010).

Já a produção do metal titânio anualmente apenas 5% do total dos concentrados são aplicados na fabricação deste. Em forma de liga metálica titânio apresenta altíssima resistência a corrosão e força sendo aplicado na indústria aeroespacial (motores de mísseis, estrutura de aviões e veículos espaciais etc).

Além disso, a liga em questão apresenta-se em estudo e desenvolvimento na aplicação de próteses dentárias e médicas (MORAES e SEER, 2018).

No mais, de acordo com J Mendo Consultoria em 2010:

“No Brasil, o maior consumo de titânio é destinado à fabricação de tintas, esmaltes e vernizes (52%), seguido pela siderurgia (36%), produção de ferro-ligas (11%) e outras destinações como soldas, anodos para galvanoplastia, e indústria de pisos e revestimentos que absorve aproximadamente 1%.”

3.4.1 Impacto do fósforo no concentrado de titânio

A presença de contaminantes, como o fósforo, no concentrado de titânio de origem do mineral ilmenita pode ter impactos na produção de produtos, especialmente na indústria de tintas e metais. O fósforo é conhecido por reagir com o dióxido de titânio durante o processo de fabricação da tinta, afetando sua qualidade e estabilidade (Dursun et al., 2015). Altos níveis de fósforo no concentrado de ilmenita podem reduzir a estabilidade do pigmento de dióxido de titânio e aumentar a probabilidade de reações químicas indesejáveis durante o processo de secagem. Essas reações podem levar à formação de compostos indesejáveis, como o ácido fosfórico, que podem afetar a qualidade e a durabilidade da tinta.

Além disso, o fósforo também pode ter um impacto negativo na indústria de metais. Durante o processo de fabricação de ligas metálicas, o fósforo pode formar fases líquidas no metal fundido, o que pode levar à formação de inclusões e, conseqüentemente, à diminuição da qualidade do produto final (Sohn e Fray, 2011). As inclusões são partículas estranhas que se formam durante o processo de solidificação do metal e podem afetar a resistência, a ductilidade e outras propriedades mecânicas do metal.

3.5 REVISÃO DE ESTUDOS DE CONCENTRAÇÃO DO MINERAL ILMENITA A PARTIR DE REJEITOS

Nos dias atuais uma grande variedade de tecnologias de beneficiamento mineral são aplicadas para a realização da concentração do titânio. Especificamente, tecnologias de processamento como separação gravimétrica, separação magnética e flotação são amplamente utilizadas no beneficiamento de minerais contendo ilmenita (Zhai et al., 2020). Nesta revisão bibliográfica, serão apresentados quatro artigos que discutem a recuperação de titânio de origem ilmenítica por meio desses métodos.

O primeiro artigo, de autoria de Chen e Liu (2011), descreve o processo de beneficiamento de um minério de ilmenita por meio de classificação gravimétrica, separação magnética e flotação. O teor de TiO_2 na alimentação era de aproximadamente 10%, e o produto final apresentou teor de 49% de TiO_2 . A flotação foi realizada utilizando-se oleato de sódio como coletor.

O segundo artigo, de Qiu et al. (2013), apresenta um estudo sobre a recuperação de titânio de rejeitos de mineração de ilmenita por meio de flotação direta. O teor de TiO_2 na alimentação era de cerca de 3,6%, e o produto final apresentou teor de 56,1% de TiO_2 . Foi utilizado como coletor um éster sulfônico derivado de álcool graxo.

O terceiro artigo, de Li et al. (2017), apresenta um estudo sobre a recuperação de titânio de rejeitos de mineração de ilmenita por meio de flotação reversa. O teor de TiO_2 na alimentação era de cerca de 6%, e o produto final apresentou teor de 57,3% de TiO_2 . Foi utilizado como coletor amido modificado e como depressor, ácido fosfônico.

Por fim, o artigo de Zhai et al. (2020) trata de uma revisão da literatura sobre o processo de flotação para recuperação de titânio de minérios de ilmenita. Os autores destacam a importância da escolha adequada do coletor, dos depressores e dos pHs de flotação, além de discutirem a influência de outras variáveis, como granulometria, temperatura e tempo de residência, sobre o desempenho do processo. Na próxima etapa será descrito de forma mais detalhada as tecnologias anteriores mencionadas para o beneficiamento de minerais de titânio:

3.5.1 Concentração gravimétrica

A concentração gravimétrica baseia-se na separação de minerais por densidade, tamanho da partícula, formato e sua movimentação em um meio particular (exemplo aquoso). As limitações entorno da separação gravimétrica baseiam-se na grande quantidade de água necessária para sua operação e o tamanho das partículas não podendo ser demasiadamente pequena (<0,02 mm). Especificamente, a ilmenita possui maior peso específico que os demais minerais silicatados sendo assim, um processo bastante utilizado para essa separação em práticas industriais com minérios silicatados. O processo de concentração gravimétrica pode eficientemente concentrar a ilmenita entre materiais de granulometria grosseira a médio com baixo custo, sem poluição e alta eficiência energética. Contudo, a eficiência deste método pode decair caso o material apresente finas granulometrias (ZHAI, CHEN, *et al.*, 2020).

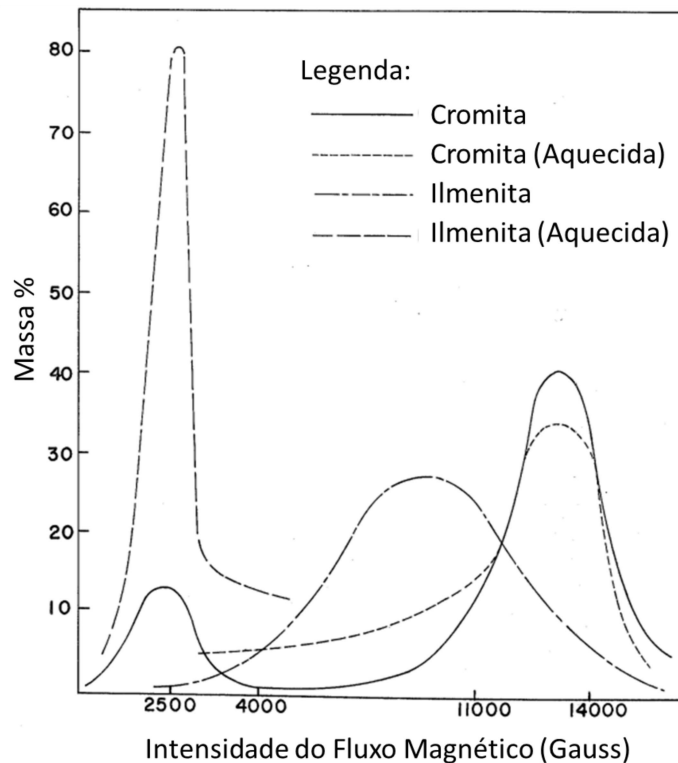
3.5.2 Separação Magnética

Para a produção de concentrado de titânio a separação magnética apresenta-se como uma tecnologia de processamento de alta competência. Em geral, são utilizados diversos tipos de separadores magnéticos: alta intensidade a úmido, alta intensidade a disco seco e também baixa intensidade. Primordialmente, os de baixa intensidade são utilizados para a separação de magnetita e ilmenita fato comum nos depósitos minerais e normalmente seguido da separação de alto campo para aumento dos teores de ilmenita (ZHAI, CHEN, *et al.*, 2020).

Explorando os valores de susceptibilidade magnética da ilmenita. Na criação da patente de Michel Bergeron em 1976 no desenvolvimento de um processo ao qual reduza impurezas de elemento cromo (Cr) para a concentração de ilmenita. Bergeron explorou a susceptibilidade magnética da ilmenita em temperatura natural e sob aquecimento de 750°C por 15 minutos. Na Figura 5, criado por Bergeron destaca-se a maior susceptibilidade da ilmenita quando aquecida sendo atraída em

grande parte da amostra tratada em apenas 2500 Gauss. Já a ilmenita em estado natural (sem aquecimento) ocorrendo seu pico de atração em cerca de 9000 Gauss apesar da grande quantidade de massa mineral contaminante de cromo (BERGERON e PREST, 1976).

Figura 5 - Composição de massas de Ilmenita e Cromita atraídas de acordo com o magnetismo aplicado



Fonte: (BERGERON e PREST, 1976)

Sendo assim, podemos ter em mente a aplicação de valores de 9000 Gauss apresenta-se como o recomendado para a atração da ilmenita a temperaturas ambiente.

3.5.3 Flotação

O processo de flotação baseia-se no uso de uma suspensão de polpa (água) para realização da separação. Onde as partículas as quais desejam-se flotar são

obrigadas a desempenhar um trajeto ascendente. A seletividade deste processo baseia-se na capacidade das partículas de minério prenderem a bolhas ou entre si. Caso a partícula desejada capture uma quantidade interessante de bolhas o conjunto (bolha mais partícula) apresenta uma redução em sua densidade elevando-a até ficar retida em um conjunto de espuma para ser coletada enquanto o material remanescente segue outro trajeto (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

A flotação é frequentemente utilizada para a separação da ilmenita de baixo teor, fina e mineralogicamente complexa (ilmenita agregada com outros minerais de características físicas similares). Usualmente o processo de concentração por flotação não é capaz de por si só prover a concentração de ilmenita nos níveis desejados. Sendo assim, é necessárias etapas de pré-concentração antes da flotação. No mais, antes da flotação é recomendado a remoção da magnetita e titano-magnetita pois a presença da mesma pode ocasionar: deterioração da flotabilidade da ilmenita pois a titano-magnetita apresenta flotabilidade superior a ilmenita, redução de teor e recuperação de ilmenita pois o contaminante em questão pode alocar-se no concentrado e provocar aumento no consumo de reagentes (ZHAI, CHEN, *et al.*, 2020).

Atualmente grande parte dos processos de flotação de ilmenita ocorrem em meio ácido variando o pH de 6 até 2,5. Como modulador para estas flotações usualmente é utilizado o H_2SO_4 ao contrário de HCl e HNO_3 . Tal fato ocorre devido a maior estabilidade e menor custo do H_2SO_4 em relação a capacidade de ativação da superfície da ilmenita (ZHAI, CHEN, *et al.*, 2020).

Além disso, para melhoria da performance de flotação da ilmenita processos de modificação superficial podem ser realizados. Esses processos incluem atividades como: aquecimento, irradiação por microndas, dissolução superficial, oxidação por ustulação, atrição por escrubagem, tratamento ultrasônico entre outros. Referencialmente, segue abaixo algumas comparações de performance de flotações de ilmenita em estudos com e sem modificações superficiais (Tabela 4 e Tabela 5) (ZHAI, CHEN, *et al.*, 2020):

Tabela 4 - Testes de flotação em bancada (+) com e (-) sem modificação superficial por irradiação de micro-ondas em diferentes estudos

Referência/Teor de Alimentação de TiO ₂	Tratamento	Teor no Concentrado (TiO ₂)	Recuperação (TiO ₂)	Dosagem do Reagente
Fan et al. (2009) / 21,4-21,9%	+	36,5%	84,1%	Oleato de sódio 1500 g/t; Silicato de sódio 1000 g/t
	-	36,1%	64,9%	Oleato de sódio 1500 g/t; Silicato de sódio 1000 g/t
Irannajad et al. (2014) / 11,1%	+	20,81%	76,2%	Oleato de sódio 1000 g/t; Pb(NO ₃) ₂ 100 g/t; Silicato de sódio acidificado 1000 g/t; Óleo de pinho 100 g/t
	-	21,1%	65,4%	Oleato de sódio 1000 g/t; Pb(NO ₃) ₂ 100 g/t; Silicato de sódio acidificado 1000 g/t; Óleo de pinho 100 g/t

Fonte:(ZHAI, CHEN, *et al.*, 2020)

Tabela 5 - Testes de flotação em bancada (+) com e (-) sem modificação superficial por dissolução superficial em diferentes estudos

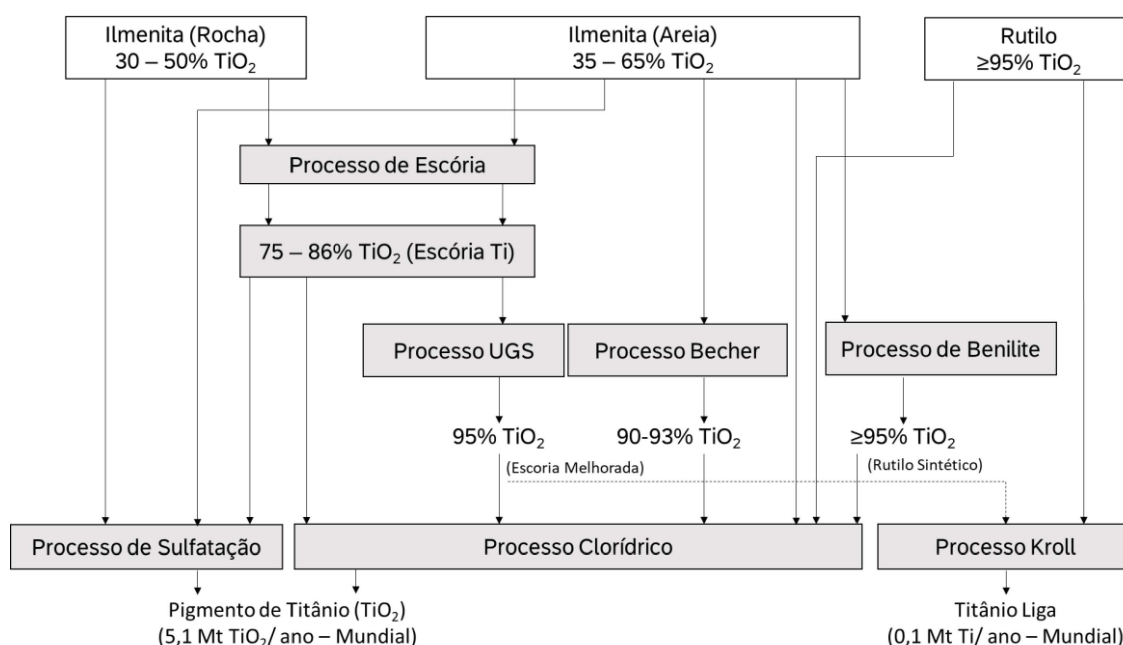
Referência/Teor de Alimentação de TiO ₂	Tratamento	Teor no Concentrado (TiO ₂)	Recuperação (TiO ₂)	Dosagem do Reagente
Zhu et al. (2011) / 8,41–8,88%	+	31,73%	67,02%	Coletor CS 5000 g/t; Depressor OL-T1 1500 g/t
	-	26,7%	68,28%	Coletor CS 5000 g/t; Depressor OL-T1 1500 g/t
Parapari et al. (2017) / 11,1%	+	25,6%	80,6%	Coletor oleato de sódio 1000 g/t; Ativador Pb(NO ₃) ₂ 100 g/t; Óleo de pinho 100 g/t
	-	21,2%	78,3%	Coletor oleato de sódio 1000 g/t; Ativador Pb(NO ₃) ₂ 100 g/t; Depressor quebra-quebra 80 g/t; Óleo de pinho 100 g/t

Fonte: (ZHAI, CHEN, *et al.*, 2020)

3.6 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PRODUTOS DE TITÂNIO (PIGMENTOS & LIGAS)

Usualmente os processos mais comuns para a obtenção de pigmento de titânio consistem em sulfatação e cloração usando matérias primas de concentrado de ilmenita e rutilo, fato este demonstrado na Figura 6 presente. Ademais, a seguir será melhor descrito as etapas e condições de uso para os processos acima citados.

Figura 6 - Requisitos de matérias-primas e demais produtos para os processos



Fonte: (KANG e OKABE, 2013)

3.6.1 Pigmentos de TiO₂ por Sulfatação

Este processo foi o primeiro a ser utilizado em escala comercial na obtenção de pigmento de dióxido de titânio, neste processo o mineral rutilo e o leucoxênio não podem ser usados por serem insolúveis ou parcialmente solúveis (LUZ e LINS, 2008).

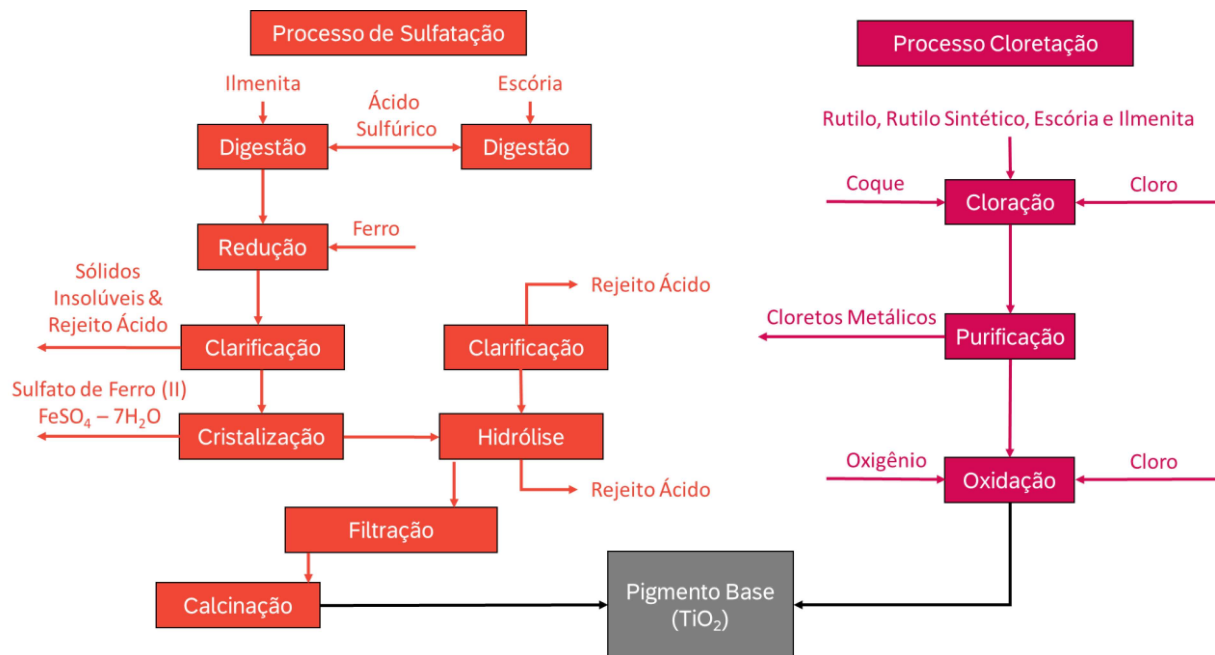
Neste processo a ilmenita é colocada em contato com o ácido sulfúrico (H_2SO_4) a quente ocasionando assim a formação de sulfatos de titânio, ferroso e férrico. Após a formação destes sulfatos os mesmos são removidos e resfriados sendo posteriormente hidrolisados com soda caustica formando hidróxido de titânio ocorrendo a precipitação por hidrólise e posteriormente filtragem do processo. Contudo, esse processo acaba ocasionando um produto de qualidade inferior para várias aplicações além de passivos ambientais significativos (Figura 7) (LUZ e LINS, 2008).

3.6.2 Pigmentos de TiO_2 por Cloretação

Esse processo é executado primordialmente com o mineral rutilo onde é possível a obtenção do pigmento de TiO_2 a baixo custo. O fundamento do processo consiste na reação química de gás cloro quente com o mineral rutilo formando a molécula química TiCl_4 volátil, ao qual sofre o processo de oxidação com ar ou oxigênio a 1000°C gerando assim o composto TiO_2 . Posteriormente cloretos residuais são removidos através de calcinação (Figura 7). Além disso, como etapas finais o produto é cominuído e sofre tratamento superficial afim de adequá-lo para diferentes usos (LUZ e LINS, 2008).

A quantidade de cloreto utilizado no processo em questão é proporcional a quantidade de ferro presente na matéria prima. Portanto, devido aos altos valores de ferro apresentados pelo mineral ilmenita é inviável o uso da mesma neste processo . Adicionalmente, este processo apresenta-se bastante rigoroso em termos de contaminantes pois durante as reações, impurezas podem ocasionar a geração de cloretos com temperaturas de ebulição superior ao do reator. Em específico, elementos contaminantes como tório e urânio são inaceitáveis nesse processo (LUZ e LINS, 2008).

Figura 7 - Fluxograma das etapas dos processos de sulfatação e cloretação

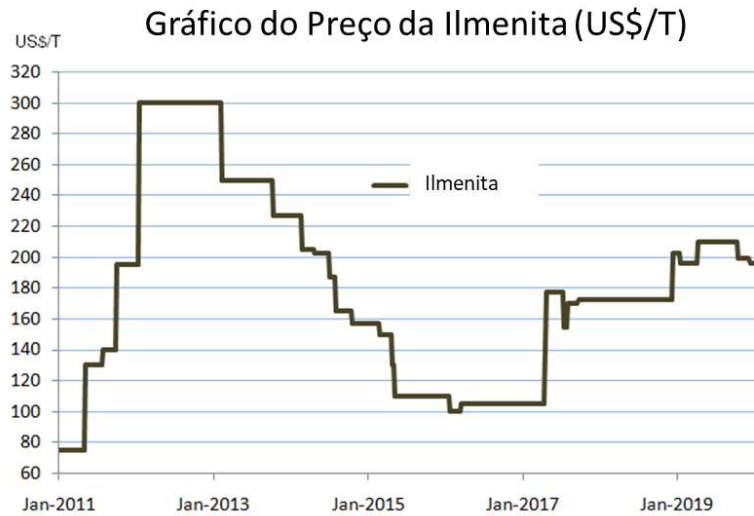


Fonte: (POSTLE, HALLIDAY, *et al.*, 2018)

3.7 VALORES COMERCIALIZADOS & PRODUÇÕES MUNDIAIS

Os valores de concentrado de ilmenita obtiveram uma variação significativa de mercado ao longo dos últimos anos. Contudo, desde 2017 até 2020 os mesmos apresentaram-se mais estáveis. Referencialmente, entre 2017 e 2020 o valor do concentrado ilmenítico (FOB) negociado na Austrália com 54% de TiO_2 cotava-se entre cerca de 170 e 210 dólares americanos a tonelada (Figura 8).

Figura 8 - Histórico de preços de concentrado ilmenítico Austrália (FOB)



Fonte: (CONSENSUS ECONOMICS, 2022)

De forma oposta, recentemente o pigmento titânio produzido pelo processo sulfatação, observou-se os valores FOB do mesmo na China apresentarem grande variação devido a epidemia de COVID-19 em julho de 2021. Especificamente, os preços do produto estavam sendo negociados na faixa de 2600 a 2800 dólares americanos por tonelada comercializada (CLARKE, 2021).

3.7.1 Produção Mundial de Concentrado de Titânio

No que diz respeito a produção, segundo a U.S. Geological Survey, em seu Mineral Commodity Summaries de 2023 os países: China, Moçambique e África do Sul são os líderes mundiais na produção de concentrado de titânio de ilmenita. Sendo a produção de concentrado ilmenítico correspondente a cerca de 60% de todo o concentrado de titânio ilmenítico produzido no mundo. Abaixo são demonstrados os valores de produção de concentrados de titânio nos principais países do mundo em kilo tonelada métrica de TiO_2 (Tabela 6).

Tabela 6 - Principais produtores de titânio no mundo 2021 & 2022

Mineral	País	Produção (2021)	Produção (2022)	Reservas (2022)
Ilmenita	Estados Unidos	100	200	2,000
	Austrália	600	660	160,000
	Brasil	33	32	43,000
	Canadá	430	470	31,000
	China	3,400	3,400	190,000
	Índia	204	200	85,000
	Quênia	181	180	390
	Madagascar	414	300	22,000
	Moçambique	1,100	1,200	26,000
	Noruega	468	430	37,000
	Senegal	482	520	NA
	África do Sul	900	900	30,000
	Ucrânia	316	200	5,900
	Vietnã	122	160	1,600
	Outros	137	77	14,000
Total mundial	8,900	8,900	650,000	
Rutilo	Estados Unidos	-	-	-
	Austrália	190	190	31,000
	Índia	12	11	7,400
	Quênia	72	73	170
	Madagascar	-	-	520
	Moçambique	8	8	890
	Senegal	9	9	NA
	Serra Leoa	123	130	490
	África do Sul	95	95	6,500
	Tanzânia	-	-	20
	Ucrânia	95	57	2,500
	Outros	14	14	-
Total Mundial	618	590	49,000	

Fonte: (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2023)

Em específico, a China é o líder mundial na produção e consumo do concentrado ilmenítico em questão. No ano de 2022, a cerca de 3,4 milhões de toneladas de concentrado de titânio foram importados para a China uma redução de 10% comparada ao ano de 2021. Já a produção brasileira de concentrado de titânio correspondeu no ano de 2022 a cerca de apenas 0,34% da produção mundial. Sendo que o concentrado de titânio produzido nacionalmente apresenta-se em sua maioria exclusivamente originária do mineral ilmenita (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2023).

3.7.2 Produção Mundial de Pigmento de Titânio

Como mencionado anteriormente, de acordo com os dados da U.S Geological Survey de 2023, a China apresenta-se a frente com a maior capacidade produtiva de pigmento de titânio do mundo em 2022 com cerca de 5 milhões de toneladas. Em segundo lugar os Estados Unidos com 1,37 milhões e com alta dependência de importação concentrado de titânio de outros países. Segue abaixo a tabela da capacidade de produção de pigmento de titânio dos principais países do mundo (Tabela 7) (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2023).

Tabela 7 - Capacidade produtiva de pigmento de titânio em 2022 por países (Kt)

País	Capacidade de Produção de pigmentos de titânio em 2022
Estados Unidos	1.370.000
Austrália	260.000
Canadá	104.000
China	5.000.000
Alemanha	472.000
Índia	108.000
Japão	322.000
Cazaquistão	1.000
México	300.000
Rússia	55.000
Arábia Saudita	210.000
Ucrânia	120.000
Reino Unido	315.000
Outros países	784.000
Total mundial (arredondado)	9.400.000

Fonte: (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2023)

A produção nacional de pigmento de titânio ocorre em pequena quantidade não sendo significativa para a listagem de países de maior produção mundial do produto em questão.

3.8 CENÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO DE CONCENTRADO ILMENÍTICO E PIGMENTO DE TITÂNIO (BRASIL)

Atualmente no Brasil a maior mina de produção de concentrados de titânio encontra-se no município de Mataraca cerca de 125 km de João Pessoa no estado da Paraíba. Esta é responsável por 75% da produção total de concentrados de ilmenita e rutilo do Brasil e apresenta-se sobre posse da empresa Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S/A. O restante da produção é realizada pela empresa Titânio Goiás presente no município de Santa Bárbara a 125 km da capital Goiânia. A Titânio Goiás realiza a produção de cerca de 20% do restante da produção de titânio do país sendo a mesma comercializada como magnetita titanífera, para produção de ferro gusa e revestimentos internos de alto forno de pequenas usinas siderúrgicas de minas gerais. O restante da produção advém de minerais radioativos produzidos pelas Indústrias Nucleares do Brasil (J MENDO CONSULTORIA, 2010).

No mais, segundo a J Mendo Consultoria em 2010:

“A Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S/A é principal produtora de concentrados de titânio e a única produtora de dióxido de titânio no país. A empresa Titânio Goiás S/A explora magnetita titanífera de depósitos situados em Goiás, Pernambuco e Bahia e sua produção é direcionada para o mercado interno particularmente usinas siderúrgicas localizadas no centro oeste.”

Adicionalmente, a Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S/A pertence ao conglomerado “Cristal” aos quais possuem a liderança na produção de insumos químicos a base de titânio. O parque produtivo da Millennium é composto da mina de Mataraca na Paraíba e de uma operação de pequeno porte em Santa Bárbara de Goiás.

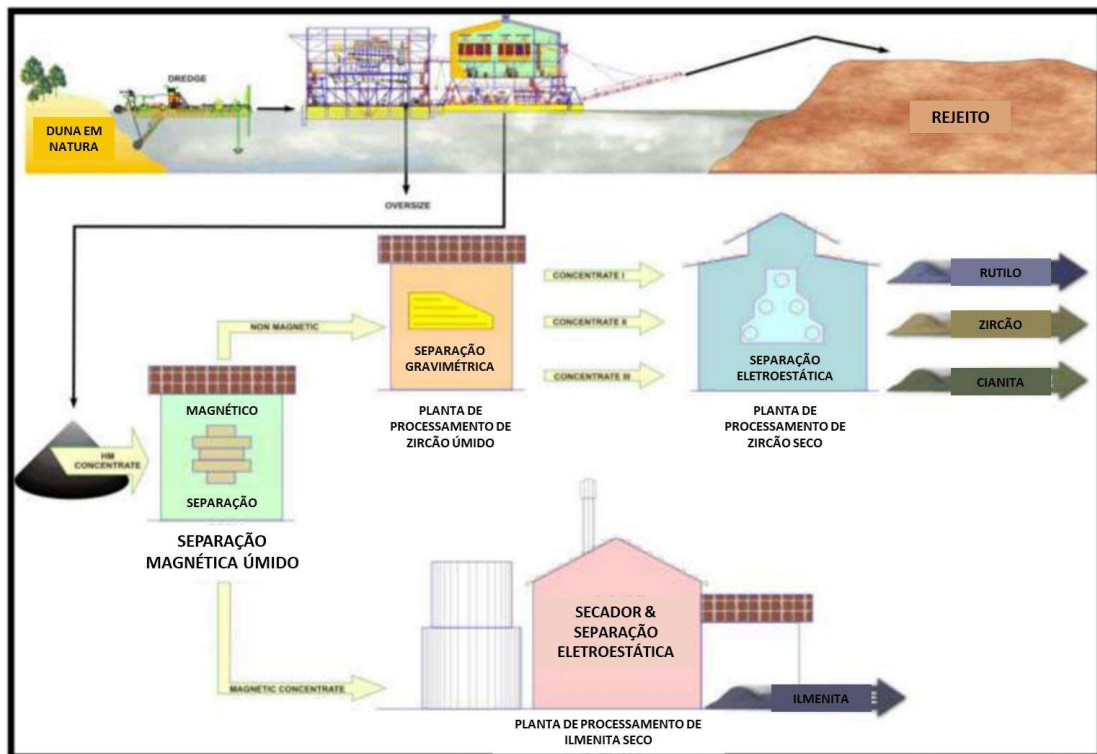
3.8.1 Processo Produtivo da Millennium em Mataraca – PB

Segundo J Mendo Consultoria em 2010 sobre a jazida em Mataraca-PB:

“[...] a jazida é constituída por depósitos sedimentares de origem secundária, constituídos por dunas de deposição recente, que recobrem as rochas sedimentares da Formação Barreiras.” (J MENDO CONSULTORIA, 2010)

O processo de beneficiamento mineral da mesma inicia-se com a supressão vegetal da área de duna ao qual deseja-se realizar a lavra. Posteriormente, a extração do solo é realizada com dragas onde a areia retirada e enviada para uma planta flutuante e posteriormente uma planta de beneficiamento. Nesta planta são realizadas etapas de separação gravimétrica, magnética e eletroestática como demonstrado no fluxograma abaixo (Figura 9) (ALVES, 2013):

Figura 9 - Processo de beneficiamento de run-of-mine (ROM) da Millennium em Mataraca-PB



Fonte: (ALVES, WELLINGTON, 2013)

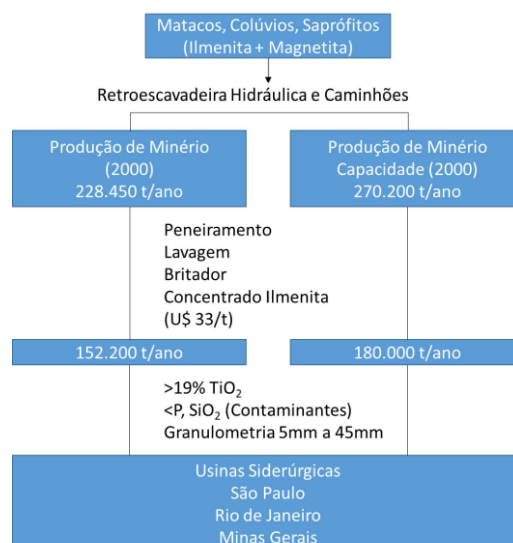
Neste processo, são separados primordialmente os minerais rutilo, zircônio e cianita do mineral ilmenita (ALVES, WELLINGTON, 2013). As maiores produções minerais são de aproximadamente 114.000 t/ano de concentrado ilmenítico, 19.000t/ano de zircão, 1.950 t/ano de rutilo e finalmente 400 t/ano de cianita (J MENDO CONSULTORIA, 2010).

3.8.2 Processo Produtivo da Titânio Goiás em Santa Bárbara de Goiás – GO

Em 1988 ocorreu o início das atividades da empresa Titânio Goiás através de um acordo de exploração de áreas estabelecido com a Metais de Goiás S/A – Metago. Geologicamente, o depósito da operação em questão é baseado em um complexo ígneo gabro-anortosítico no qual o minério explorado ocorre em camadas de ilmenita, magnetita, espinélio e hematita, encaixado em rochas gabróicas. Adicionalmente, a ocorrência mineral de interesse apresenta-se em saprólito com matacões sob forma coluvial.

No mais, o processo de beneficiamento da operação é bem simples requerendo apenas lavra com escavadeira hidráulica, peneiramento, lavagem e britagem o fluxo do beneficiamento em questão apresenta-se disposto abaixo na Figura 10.

Figura 10 - Etapas de beneficiamento e valores operacionais da atividade da empresa titânio Goiás em Santa Bárbara de Goiás – GO



Fonte: (J MENDO CONSULTORIA, 2010)

O foco de mercado da Titânio Goiás é a produção de um concentrado ilmenítico ao qual é adicionado a altos fornos antigos aos quais a Titânio Goiás em 2022 afirma:

Magnetita Titanífera que aplicada na siderurgia aumenta em até 100% a vida dos revestimentos dos altos-fornos, representando uma economia muito significativa para as empresas do setor. O uso desse minério abaixa a temperatura do refratário e da carcaça do forno, reduzindo o desgaste do revestimento interno, aumentando sua vida útil (Figura 11). (TITÂNIO GOIÁS, 2022)

Figura 11 - Desenho de alto forno e área de aplicação de concentrado de titânio



Fonte: (TITÂNIO GOIÁS, 2022)

3.9 GEOLOGIA DA MINA EM OUVIDOR-GO

A mina da empresa utilizada nesta dissertação é localizada no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I presente no estado de Goiás a aproximadamente 15 Km da cidade de Catalão. A jazida baseia-se em uma forma de domo semicircular de aproximadamente 6 km de diâmetro. A mesma pertence ao grupo de complexos alcalinos da província do Alto Paranaíba juntamente com os complexos Araxá, Catalão II, Salitre I e II e Tapira os quais intrudiram em metassedimentos proterozóicos do Grupo Araxá. Nesta Jazida ocorre rochas frescas de glimmeritos as quais são cortadas por carbonatitos, e com corpos restritos de piroxênio e peridotito. Na intrusão carbonatítica temos como alguns dos principais minerais de interesse presentes a apatita, pirocloro e terras raras (LIGUORI IMBERNON, BARROS DE OLIVEIRA e G. FIGUEIREDO, 1994).

A geologia do local sofreu ação intensa de intemperismo, contudo, o relevo foi mantido graças a resistências de rochas quartzíticas que circundam. Este intemperismo foi capaz de prover o aprofundamento de perfis de alteração que em processos tipicamente lateríticos, ocasionaram as concentrações residuais de apatita nos níveis intermediários dos perfis de alteração fato ao qual possibilitou a atual exploração de apatita pela empresa desta dissertação (LIGUORI IMBERNON, BARROS DE OLIVEIRA e G. FIGUEIREDO, 1994).

Como mencionado, devido aos perfis intempéricos providos, atualmente esta mina em Ouvidor-GO, trabalha-se com a seguinte classificação proposta pelos autores Ribeiro, Carvalho e Neto no ano de 1990 em sete tipos de perfis geológicos (Figura 12).

Minério oxidado (ox)

Situado na parte superior do perfil de intemperismo, no nível saprolito isalterítico, este minério apresenta as seguintes características: teor de $P_2O_5 \geq 5\%$, $MgO < 0.5\%$ relação $CaO:P_2O_5$ situada entre 0.5 e 1.25. Material variando de argiloso a arenoso de cor marrom escuro a ocre, friável, com ausência de micas. Mineralogicamente é composto por; apatita, fosfatos secundários da família da crandalita, ilmenita, magnetita, anatásio, óxido de ferro e argilas (Figura 12); (RIBEIRO, 2008)

Minério micáceo oxidado (mox)

Sotoposto ao minério oxidado, apresenta teor de $P_2O_5 \geq 5\%$, $MgO > 0.5\%$ < 1.5 e relação $CaO:P_2O_5$ entre 1.25 e 1,35. Material areno-argiloso de cor marrom, friável. Composto de; apatita, fosfatos secundários da família da crandalita, ilmenita, magnetita, anatásio, óxido de ferro, argilas e restos de vermiculita (Figura 12); (RIBEIRO, 2008)

Minério micáceo de topo (mict)

Sotoposto ao minério micáceo oxidado apresenta teor de $P_2O_5 \geq 5\%$, $MgO > 1.5\%$ < 2.5 , relação $CaO:P_2O_5$ situada entre 1,32 e 1.35. Material argiloso de cor marrom amarelado a marrom claro, friável, com abundância de vermiculita. Sua mineralogia é composta por; apatita, ilmenita, magnetita, anatásio, óxido de ferro, argilas, vermiculita e raros carbonatos (dolomita e calcita) (Figura 12); (RIBEIRO, 2008)

Minério micáceo médio (micm)

Sotoposto ao minério micáceo de topo apresenta teor de $P_2O_5 \geq 5\%$, $MgO > 2.5\%$ 3.5 , relação $CaO:P_2O_5$ entre 1.35 e 1.45. Material argiloso de cor marrom claro, friável, com abundância de vermiculita e flogopita. Os principais minerais são; apatita, magnetita, ilmenita, magnetita, anatásio, óxido de ferro, argilas, vermiculita, flogopita, carbonatos de cálcio e magnésio (Figura 12); (RIBEIRO, 2008)

Minério micáceo de base (micb)

Posicionado na base do nível de saprolito isalterítico apresenta teor de $P_2O_5 > 5\%$, $MgO > 3.5\%$ e < 6.0 , relação CaO/P_2O_5 situada entre 1.45 e 1.60. Composto por material argiloso de cor amarelado claro, friável, com abundância de flogopita e pouca vermiculita. Mineralogicamente é composto por apatita, magnetita, ilmenita, anatásio, óxido de ferro, argilas, flogopita carbonatos de cálcio e magnésio (Figura 12); (RIBEIRO, 2008)

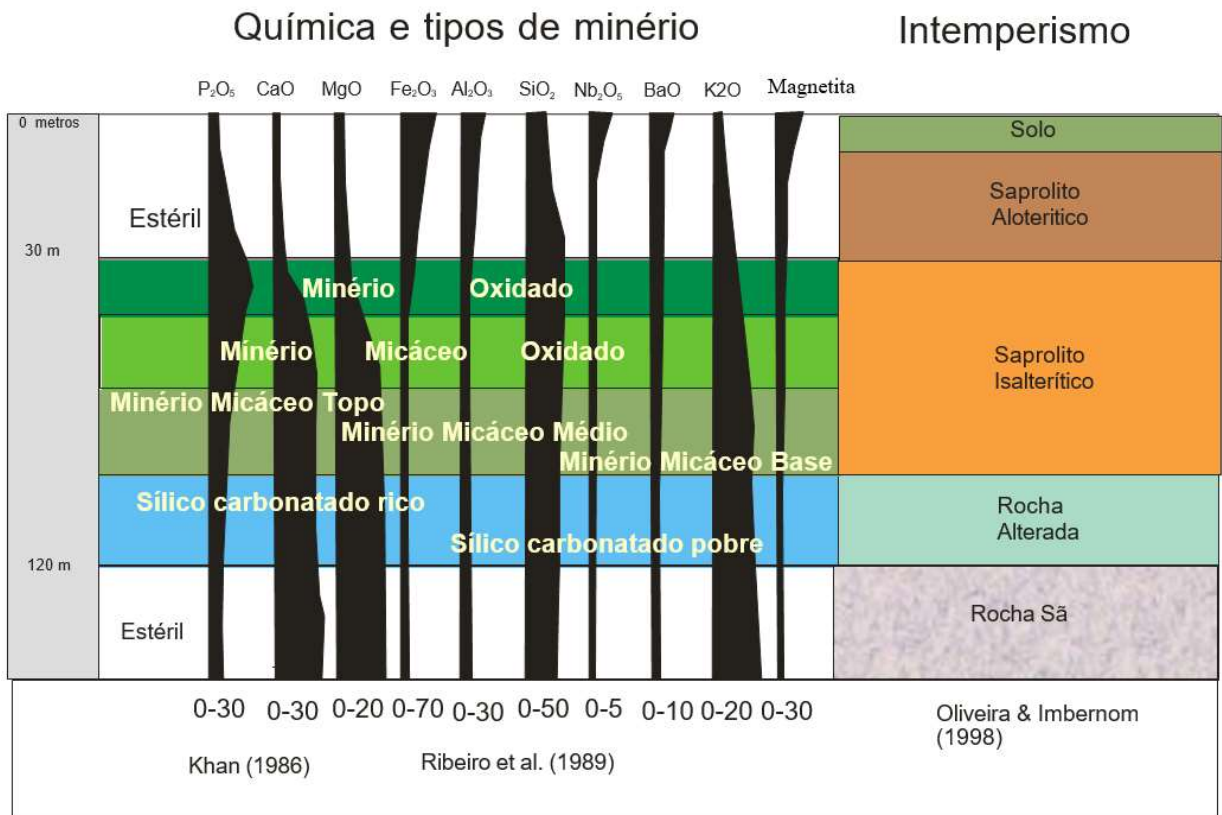
Minério silico-carbonatado rico (msicr)

Posicionado no intervalo de intemperismo denominado de Rocha Alterada apresenta teor de $P_2O_5 > 5\%$, $MgO > 6\%$, relação $CaO/P_2O_5 \geq 1.6$. Material semi argiloso de cor cinza esverdeado, semi-compacto, rico em flogopita e vermiculita. Sua mineralogia é composta de; calcita, dolomita, apatita, flogopita, vermiculita, ilmenita, perovskita, magnetita, óxidos de ferro e argilas. Este tipo, apesar de classificado como minério, não é utilizado comercialmente. Atualmente, grandes investimentos estão sendo feitos para definir uma rota para sua valorização como produto comercial. O atual processo de concentração de apatita é incapaz de obter concentrados com teores de P_2O_5 superiores a 33% (Figura 12). (RIBEIRO, 2008)

Minério silico-carbonatado pobre (msicp)

Ocorre associado ao minério silico carbonatado rico e apresenta teor de $P_2O_5 \leq 8\%$, $MgO > 6\%$, relação $CaO/P_2O_5 \geq 1.6$. Material semi-argiloso de cor cinza, semi-compacto, com abundância de flogopita e rara vermiculita. Mineralogicamente é semelhante ao anterior, porém com menos apatita e ainda sem uma rota de concentração comercial (Figura 12). (RIBEIRO, 2008)

Figura 12 - Relações entre a química, os tipos de minério e os níveis de intemperismo do complexo carbonatítico.



Fonte: (RIBEIRO, 2008)

O Atual processo de beneficiamento de apatita da mineradora estudada faz uso dos perfis minério oxidado (ox), micáceo oxidado (mox), micáceo de topo (mict), micáceo médio (micm) e micáceo de base (micb) para a produção de um concentrado de P₂O₅. Os demais perfis não são aproveitados pela empresa devido a dificuldades técnicas e tecnológicas para concentração destes, sendo o restante tratado como estéril.

3.10 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO

A empresa desta dissertação, realiza o beneficiamento do mineral apatita para a produção de um concentrado de fosfático. Sendo que este beneficiamento ocorre em duas plantas principais (Usina 47 & Usina 76). Ambas as usinas de

fosfato apresentam a mesma rota de beneficiamento. Sendo assim, neste estudo iremos descrever brevemente as etapas de processamento mineral realizadas no beneficiamento de fosfato desta empresa:

3.10.1 Lavra

Na mina da empresa estudada, a lavra do minério ao qual alimenta britagem ocorre de forma a céu aberto. Sendo está utilizando-se de caminhões basculantes Actros 4844 8x4 da Mercedes-Benz com cerca de 30 caminhões e duas escavadeiras para estas atividades de carregamento e transporte.

3.10.2 Britagem

O beneficiamento mineral inicia-se com a britagem onde a mesma opera com a alimentação de 1200 toneladas por hora aproximadamente. Neste processo, o minério alimentado (ROM) é peneirado e o overflow é britado em dois britadores de impacto. Depois da britagem do material o mesmo é “blendado” (misturado), esta mistura é criada em duas pilhas de homogeneização (pilha A de 64.000 e pilha B de 80.000 toneladas). Onde a operação ocorre em um sistema ao qual enquanto uma pilha é criada outra pilha é retomada (Figura 13).

Figura 13 - Fluxo do processo de britagem da mineradora estudada

Fluxo de Processo (Britagem)



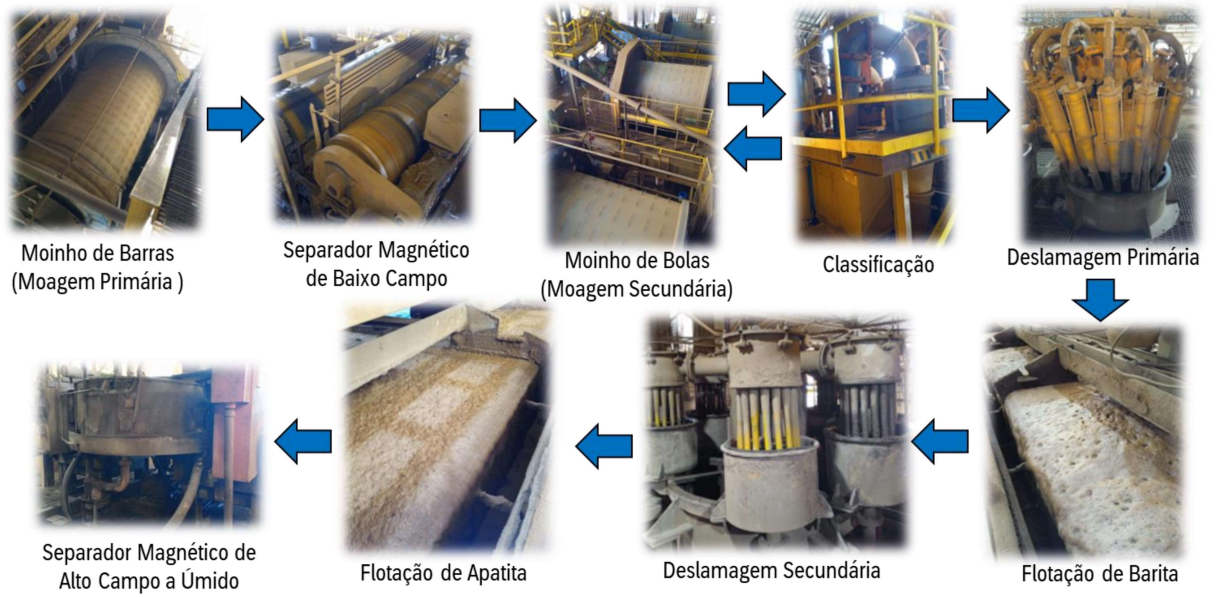
Fonte: Elaborado pelo autor

3.10.3 Beneficiamento de Fosfato

Basicamente, o atual processo consiste em etapas de moagem primária, separação magnética de baixo campo, moagem secundária, deslamagem primária, flotação de barita, deslamagem secundária, flotação de apatita e por fim separação magnética de alto campo a úmido (Figura 14). Neste processo os produtos principais ocorrem na flotação de barita e na flotação de apatita. O bário é um subproduto do processo e na flotação de apatita é realizada a concentração principal para a produção do concentrado final de P_2O_5 no qual alimenta plantas químicas em Catalão-GO.

Figura 14 - Fluxo de processo de beneficiamento de apatita da mineradora

Fluxo de Processo (Plantas 47 & 76)



Fonte: Elaborado pelo autor

4 METODOLOGIA

A metodologia do estudo realizado nesta dissertação pode ser dividida em três partes principais. Sendo a primeira delas relativa aos métodos aplicados para a caracterização química e mineralógica das possíveis matérias primas e produtos gerados. A segunda referente a equipamentos e processos utilizados para o beneficiamento mineral do material. E por fim a última parte relativo a ensaios hidrometalúrgicos executados com o objetivo de obter-se teores mais elevados de titânio com remoção de demais compostos com tratamento químico.

Ademais, é importante mencionar que os ensaios e análises realizadas foram efetuadas nos laboratórios da empresa foco do estudo, devido ao apoio e interesse desta para o desenvolvimento deste estudo.

4.1 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO

Na etapa de caracterização foram realizadas principalmente análises de fluorescência de raio-x (FRX), difração de raio-x (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ademais, informações adicionais das técnicas utilizadas serão mencionadas a seguir.

4.1.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Na realização das caracterizações houve primeiramente a implementação da metodologia de análise por Fluorescência de Raios-X para determinação de óxidos presentes. Em específico, a técnica analítica em questão é baseada em espectros característicos de fluorescência e é utilizada para determinar a composição química de uma ampla variedade de amostras. O método consiste na irradiação do material por raios-x de comprimento de onda curto, resultando em espectros de fluorescência

únicos. A preparação de amostras é simples e rápida, o que combinado com a alta precisão e exatidão torna essa técnica uma ferramenta valiosa na análise química (NASCIMENTO; LÓPEZ, 2022).

Sendo assim, para a análise de FRX (Fluorescência de Raios-X) foram efetuadas a criação de pastilhas das amostras para as mesmas serem colocadas no equipamento. As pastilhas em questão foram criadas com base em fundição. Onde realizou-se a seguinte sequência de atividades: pulverização de amostra, pesagem, adição de reagentes e fundição. Os reagentes utilizados para se confeccionar a amostra foram:

Reagentes:

- Tetraborato de Lítio (Fundente) aproximadamente $3,0000 \text{ g} \pm 0,0020 \text{ g}$.
- Solução de Iodeto de Potássio 50% (Desmoldante) $130 \text{ } \mu\text{l}$ (microlitros).
- Solução de Brometo de Lítio 1:3 (Desmoldante) $150 \text{ } \mu\text{l}$ (microlitros).

Já para realização da atividade de fundição das pastilhas houve a utilização da máquina de fusão elétrica da marca Claisse do modelo TheOx (Figura 15).

Figura 15 - Máquina de fusão elétrica em operação (TheOx) (Imagem Superior) / Elementos da máquina de fusão elétrica (TheOx) (Imagem Inferior)



Fonte:(NASCIMENTO; LÓPEZ, 2022)

Por fim após a criação das pastilhas e posteriormente o resfriamento das mesmas estas são identificadas e analisadas no equipamento de fluorescência de raio X (Figura 16).

Figura 16 - Pastilhas prontas para a leitura no equipamento de FRX



Fonte: Elaborado pelo Autor

No atual estudo apresentado o modelo de equipamento de fluorescência de raio X utilizado foi o Axios da marca Panalytical (Figura 17). Abaixo segue algumas características relativas ao equipamento:

- Análises sólidas em pastilhas.
- Tubo de Raios X: Rh.
- Máscara de análise: 27 mm. Cristais: LiF220, LiF200, Ge111, PE002 e PX1.
- Detector: Fluxo ou Cintilante.

Figura 17 - Equipamento de Fluorescência de raio X Axios da marca Panalytical



Fonte: Elaborado pelo Autor

Adicionalmente, é importante mencionar que as análises químicas efetuadas tiveram suporte dos softwares Axios max e MyLims para operação da fluorescência de raio X e armazenamento de resultados respectivamente.

4.1.2 Difração de Raio-X (DRX)

As análises de caracterização mineralógica deste estudo houve a utilização da difração de raio-x (DRX). De acordo com a instrução de trabalho da empresa sobre Difração de Raios X – DRX em 2023, a difração de raios X (DRX) é uma técnica utilizada na caracterização tecnológica e mineralógica de minérios. A interação de ondas de frequência de raio X com a estrutura cristalina da amostra é o princípio de funcionamento do DRX. Como os comprimentos de onda são da mesma ordem de dimensão que a estrutura cristalina, os cristais funcionam como uma grade para a difração dos raios X. Essa interação é característica para cada arranjo cristalino, o que significa que cada mineral tem um pico característico no difratograma, permitindo sua identificação. O método de difração de raios X é capaz de qualificar e quantificar as fases minerais. A análise qualitativa permite a

identificação dos minerais cristalinos, enquanto a análise quantitativa fornece a proporção dos minerais presentes. É altamente recomendado o uso conjunto de outros métodos de caracterização para obter uma análise com resultados mais confiáveis, além do auxílio de software específico.

Adicionalmente é importante mencionar que a técnica de Rietveld foi aplicada para a caracterização das amostras deste estudo. A mesma pode ser descrita como uma das principais ferramentas utilizadas na análise de difração de raios X (DRX) em amostras policristalinas, que permite determinar a estrutura cristalina e as fases presentes em um material. Segundo Silva et al. (2014), a técnica de Rietveld consiste em um refinamento estrutural global no qual os parâmetros estruturais, como posição atômica, temperatura de Debye-Waller, anisotropia térmica, deslocamento térmico, fatores de ocupação e parâmetros de rede são ajustados simultaneamente para se obter um padrão de difração simulado. Este padrão é então comparado com o padrão de difração experimental, com o objetivo de minimizar a diferença entre eles por meio de métodos de otimização. De acordo com o artigo citado, o método de Rietveld é uma técnica amplamente utilizada na área de mineração para identificar e quantificar fases cristalinas presentes em minerais e rochas, além de permitir a obtenção de informações sobre suas propriedades estruturais.

A fim de realizar o estudo, utilizou-se o difratômetro de raios-X de bancada AERIS Minerals da Panalytical (Figura 18). Este equipamento é capaz de realizar análises de mineralogias complexas sem destruir as amostras.

Figura 18 - Difratômetro de raios-X de bancada AERIS Minerals da Panalytica



Fonte: (MOTA; SOUZA; SANTOS, 2023)

Afim de posicionar as amostras no equipamento para leitura é necessário realizar uma preparação preliminar destes. Nesta preparação é executada uma moagem do material com pistilo até atingir a granulometria de aproximadamente 53 μ m. Onde na sequencia o material é despejado no aro de pastilha e posteriormente espalhado com uma espátula e por fim compactado. Após esta etapa este segue para a leitura no equipamento de difração (Figura 19).

Figura 19 - Amostra moída com utilização de pistilo & posicionamento do material no aro de pastilha



Fonte: (MOTA; SOUZA; SANTOS, 2023)

4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Por fim, na parte de caracterização uma das últimas análises efetuadas foram análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Em específico, segundo Silva et al. (2018) o MEV é uma técnica de análise microestrutural que utiliza um feixe de elétrons para produzir imagens de alta resolução da superfície da amostra. A amostra é bombardeada com elétrons e os sinais resultantes são capturados e convertidos em imagens por um computador. A partir dessas imagens, é possível analisar a topografia, a morfologia e a composição química da amostra em escala microscópica. O artigo de Silva et al. destaca a aplicação da técnica de MEV na análise mineralógica de materiais, permitindo a identificação e caracterização de minerais presentes nas amostras estudadas. A técnica é particularmente útil para a

análise de minerais que apresentam tamanho de grão muito pequeno ou que possuem morfologias complexas. No mais, o equipamento utilizado para as análises de MEV apresentadas foi o VEGA3 da marca Tescan (Figura 20).

Figura 20 - Equipamento de MEV modelo VEGA3 da marca Tescan



Fonte:(TESCAN, 2023)

Ademais, a preparação das amostras para serem levadas no equipamento incluem a preparação de seções polidas. Onde primeiramente uma pequena quantidade de amostra é colocada em um molde e é adicionado carbono produzindo uma mistura. Posteriormente é confeccionado uma resina e adicionado a mesma ao molde. Após esses passos o molde é enviado para uma estufa para secar e endurecer e o molde na sequencia sendo serrado em três ou quatro partes. Nas quais, algumas são arquivadas e outras passam pelo processo anterior novamente onde são reembutidas e posteriormente polidas para análise (Figura 21).

Figura 21 - Molde de seção polida e silicone para revestimento de molde (esquerda). Moldes com amostras posicionadas (centro). Seções polidas prontas (direita)



Fonte: (MOTA; SANTOS, 2023)

4.2 METODOLOGIA DE BENEFICIAMENTO MINERAL

Neste teste os seguintes processos e procedimentos de beneficiamento mineral foram abordados:

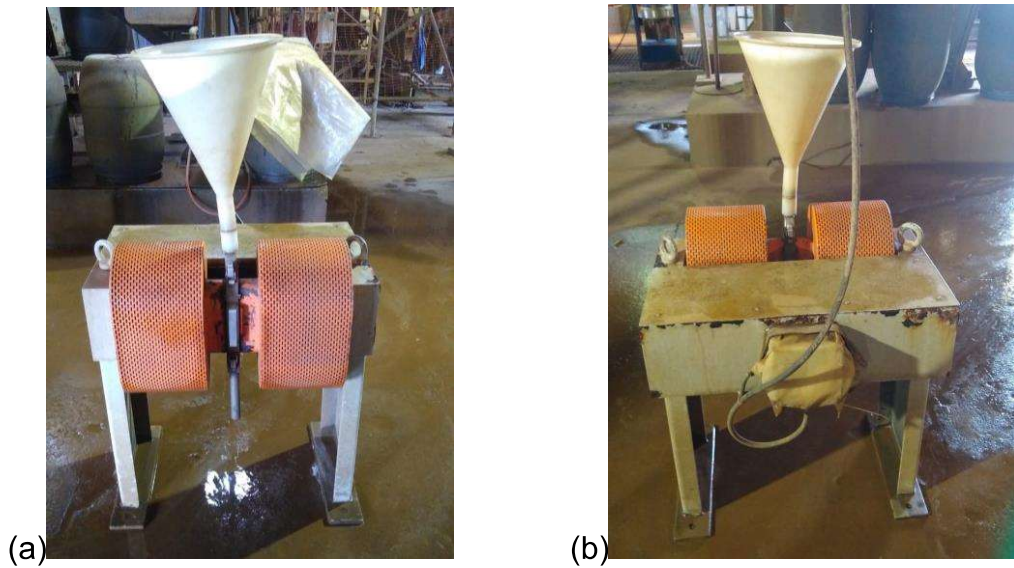
4.2.1 Separação Magnética de Baixo Campo (Esferas)

Separação magnética de baixo campo utilizando separador magnético de esferas com a utilização de 1000 Gauss. Adicionalmente, nesta separação é realizado a etapa *rougher* e *scavenger* removendo material magnético como rejeito.

4.2.2 Separação Magnética de Alto Campo (Matriz)

Separação magnética realizada no equipamento de alto campo do laboratório o qual faz uso de matrizes. Abertura da matriz utilizada 2,5 mm e corrente de 18,9 A ou 16000 Gauss segundo o aparelho (Figura 22). Adicionalmente, nesta separação é realizado a etapa *rougher* e *cleaner* removendo material não-magnético como rejeito.

Figura 22 - Separador magnético de alto campo (matriz) utilizado (a)Frente (b)Verso

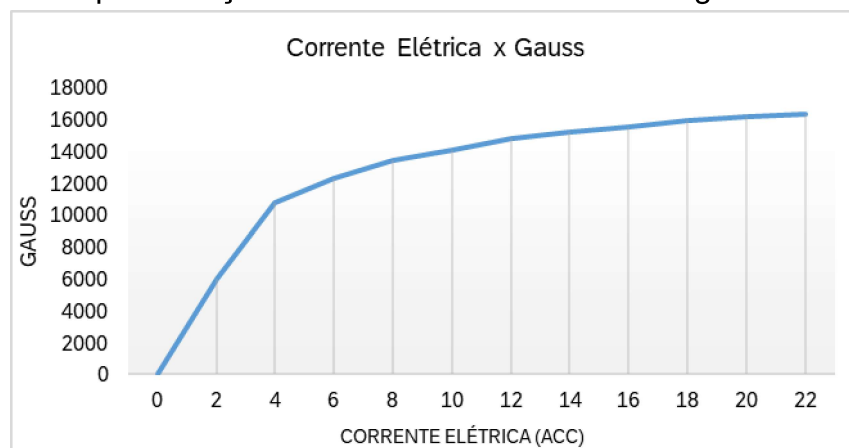


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Separação Magnética de Baixo Campo (Matriz)

Separação magnética similar a anterior realizada em equipamento de alto campo pelo uso de matrizes, utilizando 0,6 A de corrente aproximadamente de 1000 a 2000 Gauss segundo o aparelho (Figura 3). Nesta etapa também é realizada a separação na *rougher* (1ª etapa) e *scavenger* (2ª etapa) removendo material magnético como rejeito.

Figura 23 - Representação de corrente x intensidade magnética do separador



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.4 Deslamagem & Escrubagem

Usualmente, atividade realizada antes da flotação de sílica. Em específico, a escrubagem é realizada entre o pH 11 a 12 com a adição de soda caustica da empresa Ultrapar para modulação da polpa de minério. Além disso, esta é feita na rotação de 1500 RPM durante 15 minutos. Já a deslamagem (Figura 24) ocorre utilizando o apex de 4 mm na pressão de 3,5 a 4 Kgf/m². Tal etapa é realizada afim de remover partículas finas e demais reagentes aos quais apresentam-se presentes aderidas na superfície do minério.

Figura 24 - Deslamagem laboratorial utilizada para os ensaios (a)lateral (b)frente

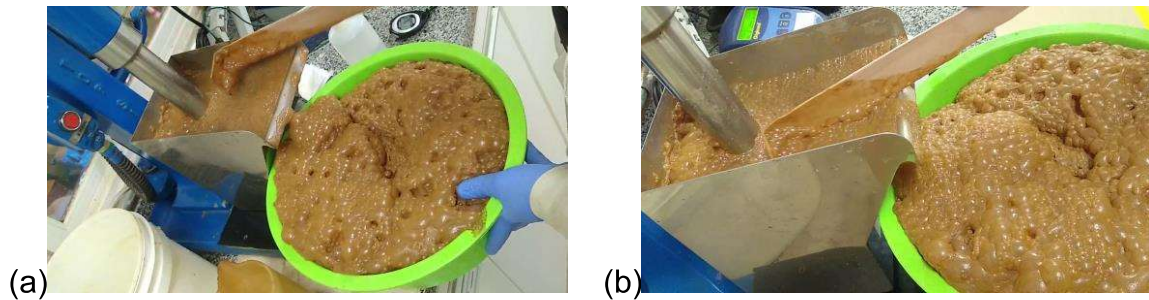


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.5 Flotação de Sílica Padrão

A flotação de sílica (Figura 25) é executada utilizando o reagente Flotigam EDA (surfactante catiônico, amina modificada) em duas etapas *rougher* (1^a etapa) e *cleaners* (2^a etapa), onde ambos os concentrados são somados, pesados e analisados quimicamente. Adicionalmente, faz-se o uso do amido de milho Stargill (polissacarídeo de amilose e amilopectina, carboidrato complexo) da empresa Cargill como depressor (Tabela 8).

Figura 25 - Aparência da flotação laboratorial de sílica em execução (a & b)



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 - Tabela de dosagens de reagente para a flotação de sílica

Flotação de Sílica

Atividade	Coletor (Flotigam EDA) 600 g/t	Depressor (Amido) 700 g/t	PH (Padrão)
Rougher	50%	100%	9,5
Cleaner	50%	0%	10,0

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6 Flotação de Titânio

A flotação foi executada utilizando um acetato diamina, e um tensoativo não-iônico adicionalmente um antiespumante. Esta flotação ocorre dividida em uma flotação *rougher* de 4 etapas (todos os overflows são juntados para a formação de apenas um concentrado *rougher*) ao qual segue para quatro etapas de flotações *cleaners*. A preparação do coletor é realizada em uma proporção 3:1 em acetato diamina e tensoativo. Especificamente, as dosagens e a partição das dosagens estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9 - Tabela de dosagem de reagentes para a flotação de titânio

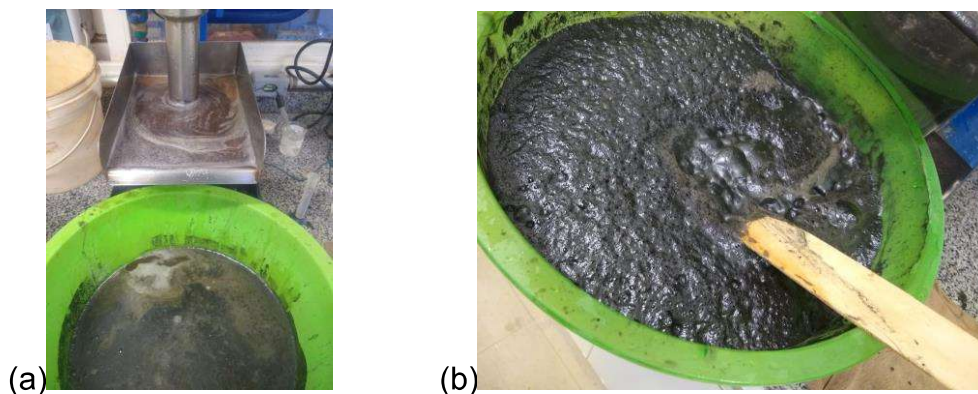
Flotação de Titânio

Atividade	Solução de Coletor (Acetato diamina + Tensoativo) 700 g/t	Antiespumante 300 g/t	PH (Padrão)
Rougher - Etapa 1	40%	40%	4,0
Rougher - Etapa 2	20%	20%	4,0
Rougher - Etapa 3	20%	20%	4,0
Rougher - Etapa 4	20%	20%	4,0
Cleaner 1	120 g/t	0	2,8
Cleaner 2	0	0	2,6
Cleaner 3	0	0	2,4
Cleaner 4	0	0	2,0

Fonte: Elaborado pelo autor

O grande número de etapas de flotação ocorreu para identificar a quantidade necessária de etapas *cleaners* para alcançar a qualidade de teor de TiO_2 desejada (Figura 26). No caso, esta grande quantidade de etapas *cleaners* permite somar as massas de flotado das mesmas e verificar o melhor ponto de equilíbrio em termos de teor e recuperação metalúrgica de TiO_2 .

Figura 26 - Etapa de flotação *rougher* laboratorial de titânio em execução (a & b)

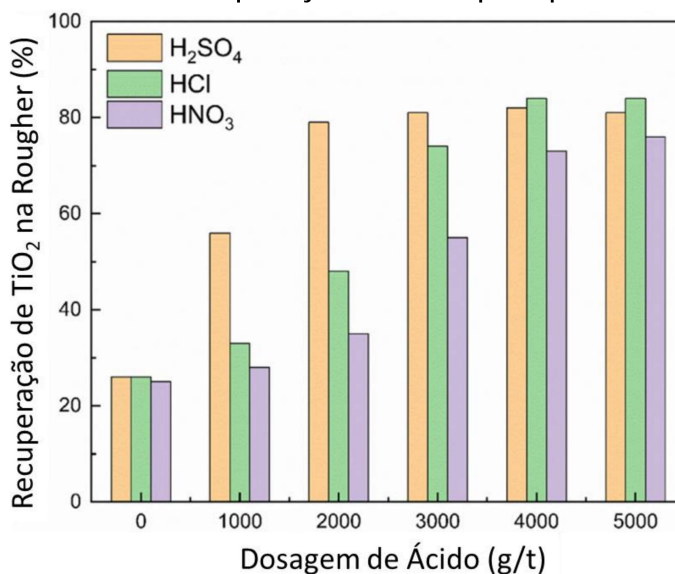


Fonte: Elaborado pelo autor

Adicionalmente, flotações de titânio podem utilizar como moduladores de pH diversos tipos de ácidos; sulfúrico, fosfórico, fluossilícico, clorídrico, nítrico etc. Contudo, estudos de Bulatovic e Wyslouzil apresentados no artigo “Process development for treatment of complex perovskite, ilmenite and rutile ores” de 1993, o

ácido sulfúrico demonstrou-se de prover uma maior recuperação de titânio na flotação como demonstrado no gráfico abaixo no estudo do mesmo (Figura 27).

Figura 27 - Gráfico de recuperação do TiO₂ por tipo e dosagem de ácido



Fonte: (ZHAI, CHEN, *et al.*, 2020)

Sendo assim, ao longo dos ensaios a alternativa de ácido sulfúrico e fluossilícico (nomenclatura padrão, devido a testes realizados anteriormente) foi explorado nos ensaios de rota. A variação do tipo de ácido apresenta-se como mais uma variável para a obtenção de uma rota ótima além da concentração de ácido utilizada.

4.3 METODOLOGIA DE HIDROMETALÚRGIA

Ensaio de hidrometalúrgia realizados neste trabalho contemplaram as etapas de digestão, lixiviação, hidrólise, filtragens e calcinação. A priori, realizou-se os ensaios com os seguintes parâmetros (Tabela 10).

Tabela 10 - Parâmetros utilizados para os ensaios de concentração hidrometalúrgica de titânio

Amostra	Digestão			Lixiviação			Hidrólise		
	H ₂ SO ₄ g	Temp. Chapa (°C)	Tempo (h)	H ₂ O g	Temp. Chapa (°C)	Tempo (h)	Proporção (Licor : Água) 1 : X	Temp. Chapa (°C)	Tempo (h)
25,00	30,00	140	02:30	140	60	00:40	5	95	03:00

Fonte: Elaborado pelo autor

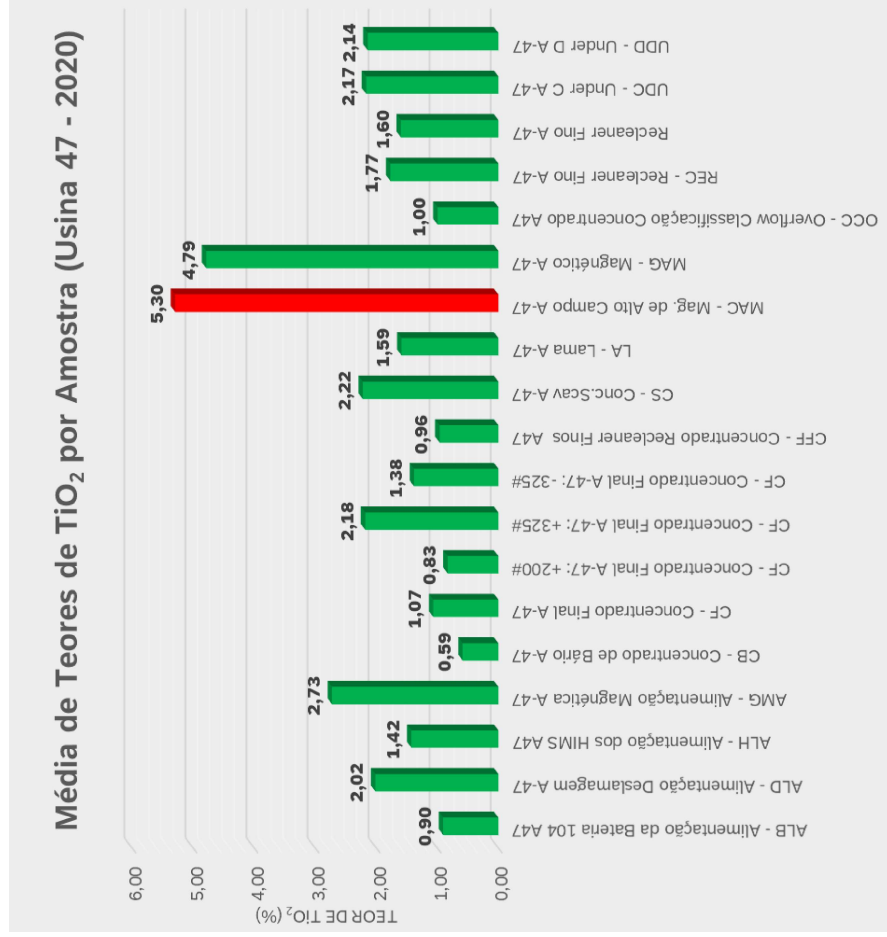
De modo geral, os procedimentos e parâmetros utilizados para os ensaios foram:

- I. - Adicionar o ácido sulfúrico na amostra dentro de um béquer;
- II. - Deixar na chapa;
- III. - Adicionar água imediatamente após a cura;
- IV. - Lixiviar a 300 rpm;
- V. - Filtrar: Medir o licor; secar o resíduo a 65°C, calcinar (700°C) e fazer semiQ;
- VI. - Colocar água e o licor para aquecerem separadamente até 60°C;
- VII. - Juntar os dois e esperar o sistema ficar turvo;
- VIII. - Adicionar mais 10% do volume inicial da água e aumentar a temperatura para 95°C com agitação;
- IX. - Filtrar o produto da hidrólise (precipitação): Descartar o licor; secar o precipitado a 65°C, calcinar (700°C) e fazer SemiQ.

5 ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO TITÂNIO PRESENTE

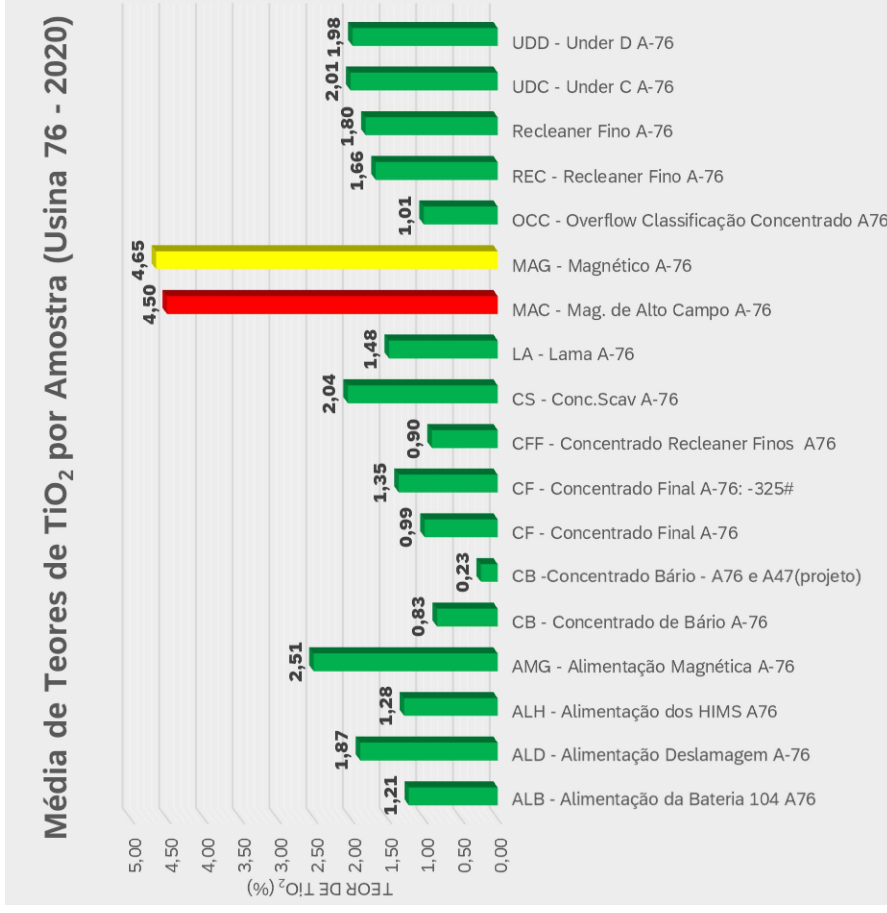
Com base na rastreabilidade dos teores de TiO_2 presentes em amostras das plantas de beneficiamento de fosfato. Um levantamento histórico de dados referente a teores de TiO_2 presente em diferentes pontos das usinas de beneficiamento foi executado. Em especial, os teores de TiO_2 foram encontrados em quantidades interessantes para aproveitamento no rejeito magnético de alto campo (MAC) e de baixo campo (MAG) como demonstrado nos gráficos a seguir (Figura 28 e Figura 29).

Figura 28 - Teores de TiO₂ em rejeitos (Usina 47)



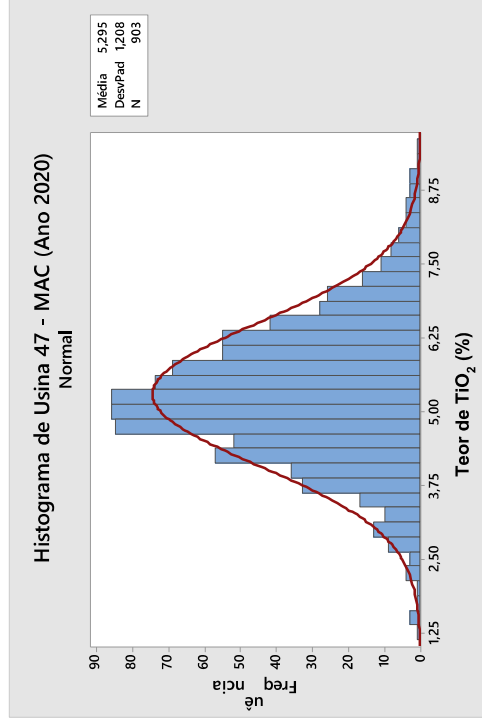
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 29 - Teores de TiO₂ em rejeitos (Usina 76)



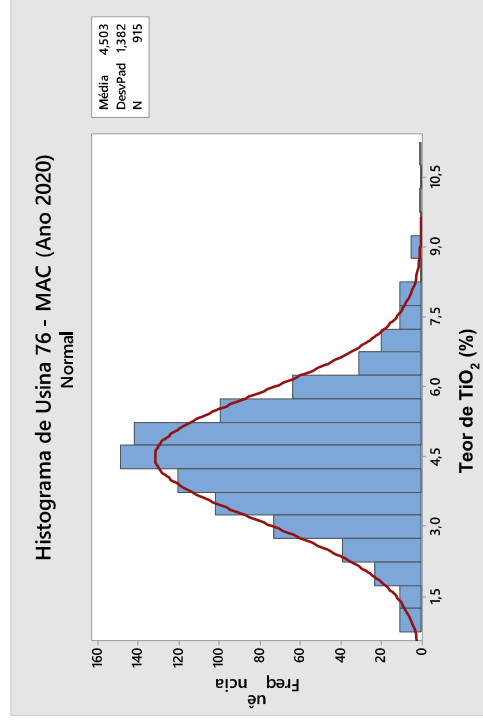
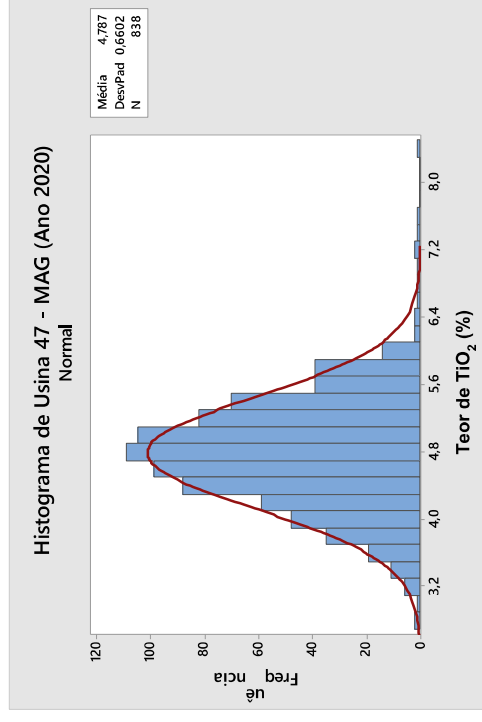
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 30 - Histogramas de teores de TiO₂ (MAC) Us. 47&76

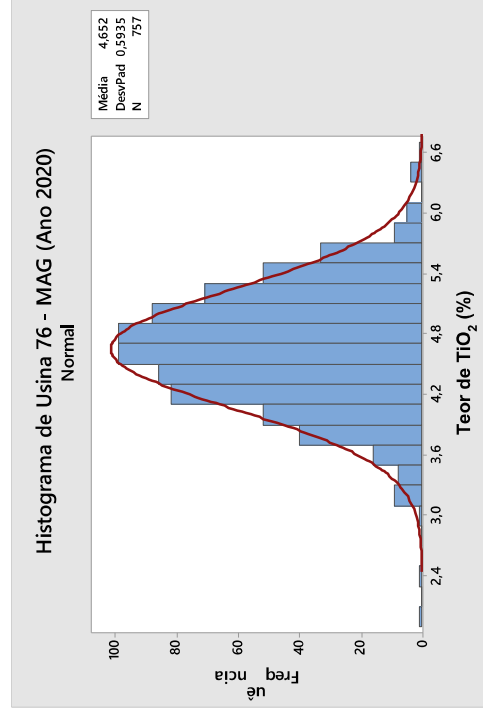


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 - Histogramas de teores de TiO₂ (MAG) Us. 47&76



Fonte: Elaborado pelo autor



Os dados providos pelos gráficos anteriores e outras informações internas da empresa indicam que a opção de estudo de beneficiamento do rejeito de magnético de alto campo (MAC), tornou-se mais atrativa que o rejeito de baixo campo devido as quatro motivações principais listadas abaixo:

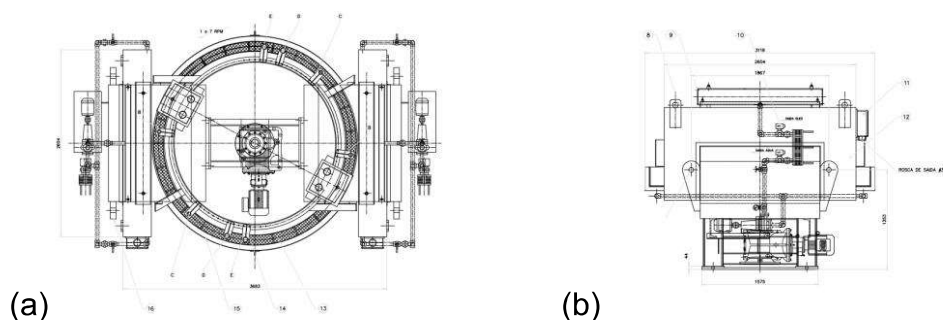
- I. Atualmente a mineradora já desenvolve outro estudo de aproveitamento do MAG para outros fins o qual já se apresenta mais adiantado. Sendo assim, o estudo deste não se apresentou de interesse para a empresa ao qual provê suporte a dissertação realizada.
- II. Apesar dos teores médios de TiO_2 apresentarem-se similares, o rejeito MAC provê picos maiores que o rejeito MAG. Possibilitando assim nos picos de teores melhores enriquecimentos de TiO_2 . Considerando ainda a alta dificuldade do beneficiamento devido aos baixos teores médios do rejeito (5%) (Figura 30 e 31) em comparação a outras iniciativas de beneficiamento.
- III. Adicionalmente, no rejeito MAC há uma perda considerável de P_2O_5 ocorrendo no final do processo de concentração de fosfato. Por conseguinte, o estudo com o enriquecimento do TiO_2 pode proporcionar um subproduto apatítico o qual pode ser reaproveitado ou simplesmente reenviado ao reprocessamento da usina de beneficiamento para aumento de eficiência, fato buscado nos objetivos específicos deste estudo.
- IV. Apesar da presença dos teores médios similares (MAC e MAG), há indícios que o beneficiamento do material MAC ser tecnicamente mais acessível que o passivo MAG devido a mineralogia e granulometria associada em estudos anteriores realizados pela empresa.

Referente aos teores de TiO_2 , o rejeito MAC das Usinas apresenta uma média no ano de 2020 de 5,3% e 4,5% nas Usinas 47 & 76 respectivamente. Especificamente, os valores máximos e mínimos de TiO_2 para a Usina 47 no rejeito MAC vão de 1,18% até 9,56% e na Usina 76 de 2,05% até 6,56% como demonstrado nas Figura 30 e 31. Os valores mais baixos de TiO_2 presentes na Usina 76 podem estar associados a baixa performance operacional dos separados magnéticos de alto campo presentes. Possíveis causas são: vida útil do equipamento e operação em capacidade máxima de alimentação.

5.1.1 Caracterização Química & Granulométrica do MAC (Magnético de Alto Campo)

O rejeito magnético de alto campo provido pelas usinas 47 & 76 advém de um equipamento separador magnético de alto campo a úmido (WHIMS) da empresa Inbras – Equipamentos Magnéticos (Figura 32).

Figura 32 - Vistas do equipamento WHIMS (a)Superior e (b)Lateral



Fonte: Arquivos da Empresa

Especificamente, este equipamento provê um campo de aproximadamente 7000 Gauss (0,7 T) para a separação do produto de interesse (apatita) para o não magnético e o rejeito composto de minerais ferríferos para o magnético. A composição média deste rejeito no ano de 2020 apresenta-se demonstrada na tabela abaixo após o tratamento de outliers de operação (Tabela 11).

Tabela 11 - Média de teores de óxidos durante o ano de 2020 no rejeito MAC

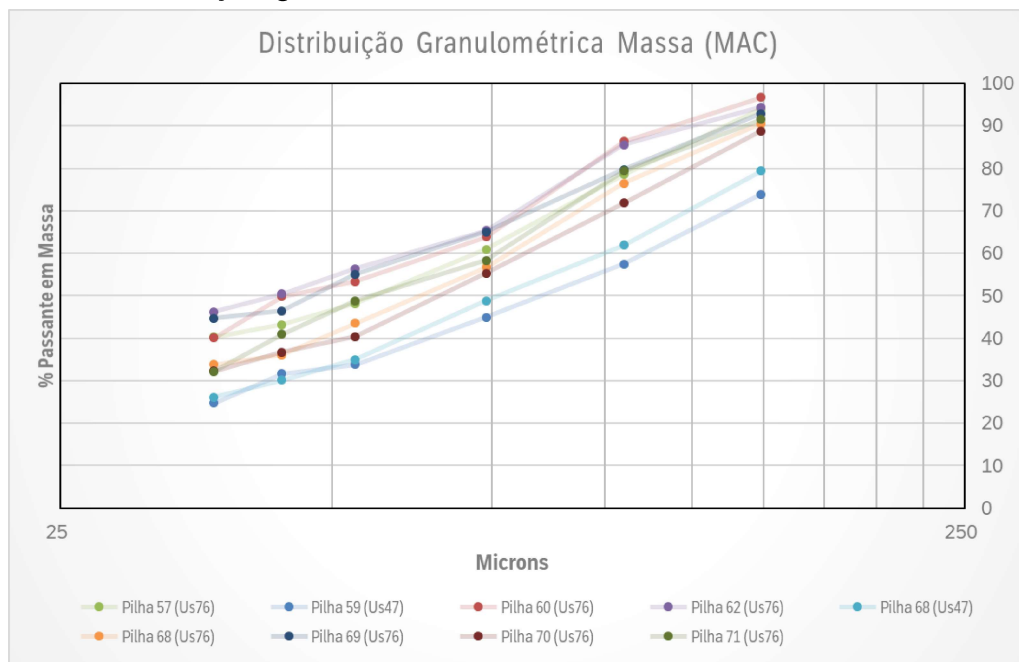
Material do WHIMS (Wet High Intensity Magnetic Separator) / Alto Campo											
	Fe₂O₃	P₂O₅	SiO₂	TiO₂	CaO	Al₂O₃	MnO₂	BaO	MgO	PbO	Nb₂O₅
Percentil 95%	39.87	23.99	8.44	7.11	32.32	1.63	1.36	1.76	1.9	0.01	0.53
Mediana	31.08	18.73	5.59	4.89	24.61	0.86	0.93	1.05	1.13	0.01	0.4
Percentil 5%	21.36	14.50	3.89	2.70	14.00	0.49	0.59	0.67	0.67	0.01	0.32

Fonte: Elaborado pelo autor

Ademais, durante o mesmo período (2020) aleatoriamente 9 amostras de rejeito de alto campo (MAC) das usinas 47 & 76 as quais alimentaram as usinas de

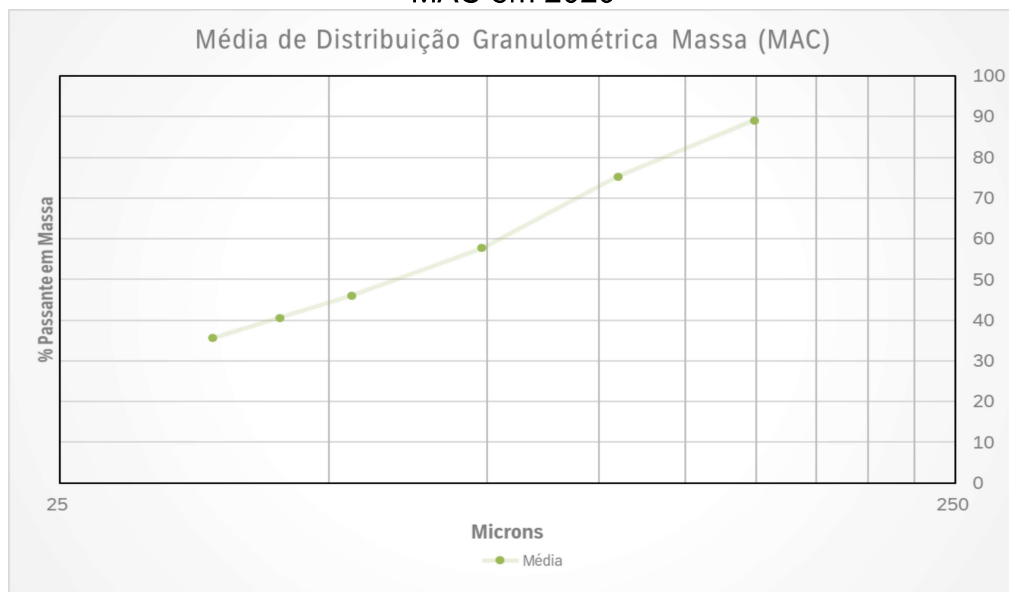
fosfato em diferentes pilhas foram coletadas. Nestas foram realizadas análises químicas por faixa granulométrica do material para melhor compreensão do produto de alimentação do estudo. Primeiramente, segue abaixo a distribuição granulométrica do material apresentada em dois gráficos. O primeiro com o resultado das 9 amostragens realizadas e o segundo contendo a média aritmética das distribuições das massas das amostras (Figura 33 e 34 respectivamente).

Figura 33 - Distribuição granulométrica de 9 amostras aleatórias do MAC em 2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 - Média de distribuição granulométrica de 9 amostras aleatórias do MAC em 2020

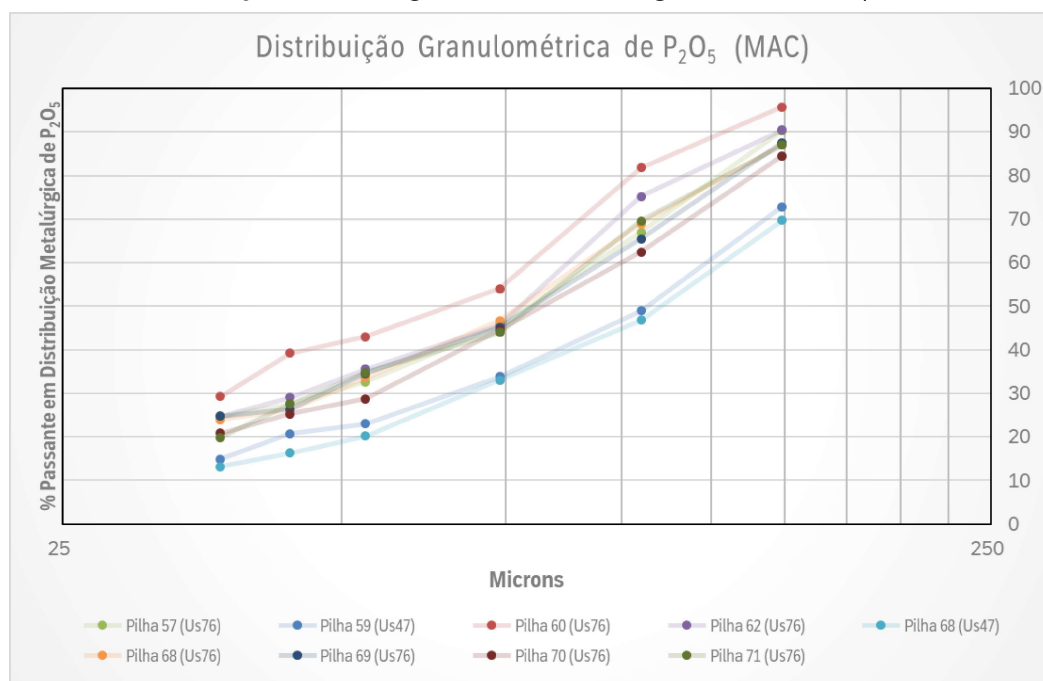


Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o resultado das amostras podemos perceber uma variação considerável entre a granulometria destas. Na média, é possível afirmarmos que o P80 da amostra se encontra próximo de 105 micras (150 mesh). Aliado a esta informação temos também que pouco mais que 35% da massa total da amostra apresenta-se passante em 37 Micras (400 mesh). Em suma, é possível compreender que a amostra MAC é trata se de uma amostra relativamente fina.

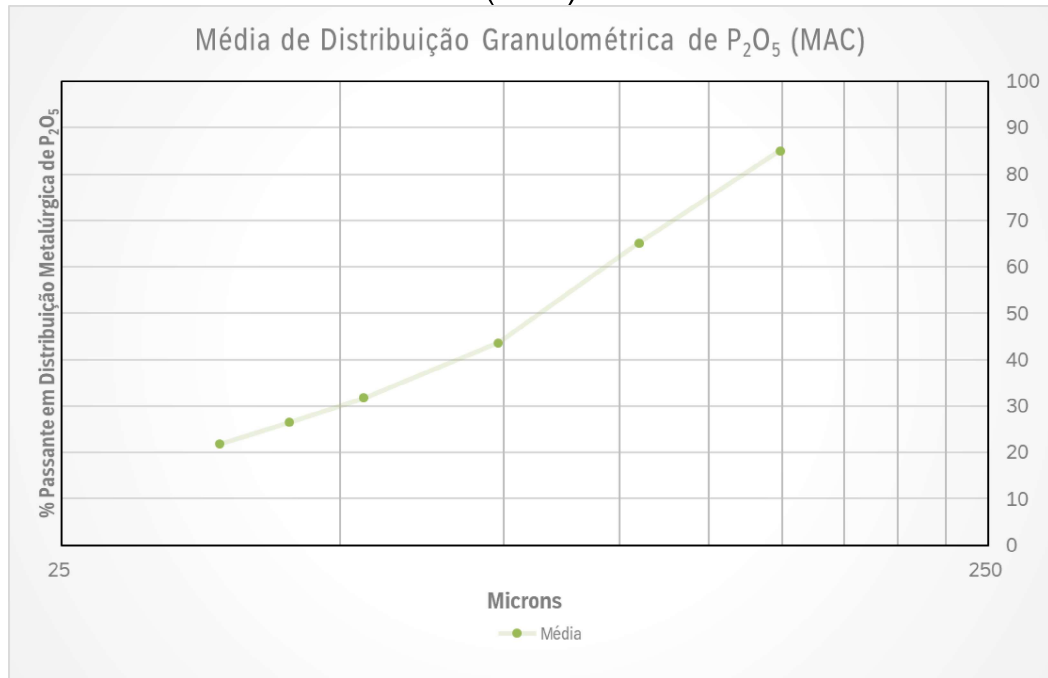
Ademais, quando analisamos a distribuição metalúrgica de P_2O_5 comparativamente ao TiO_2 nas granulometrias presentes da análise. Podemos verificar que o mesmo (P_2O_5) apresenta uma tendência de se alocar na granulometria mais grossa do rejeito MAC. Especificamente, na granulometria de 53 micras (270 mesh) temos aproximadamente 70% de todo o P_2O_5 contido retido das amostras. No mais, na granulometria de 37 micras (400 mesh) apenas cerca de 20% do material apresenta-se passante (Figura 35 e 36).

Figura 35 - Distribuição metalúrgica de P_2O_5 em granulometria (9 amostras MAC)



Fonte: Elaborado pelo autor

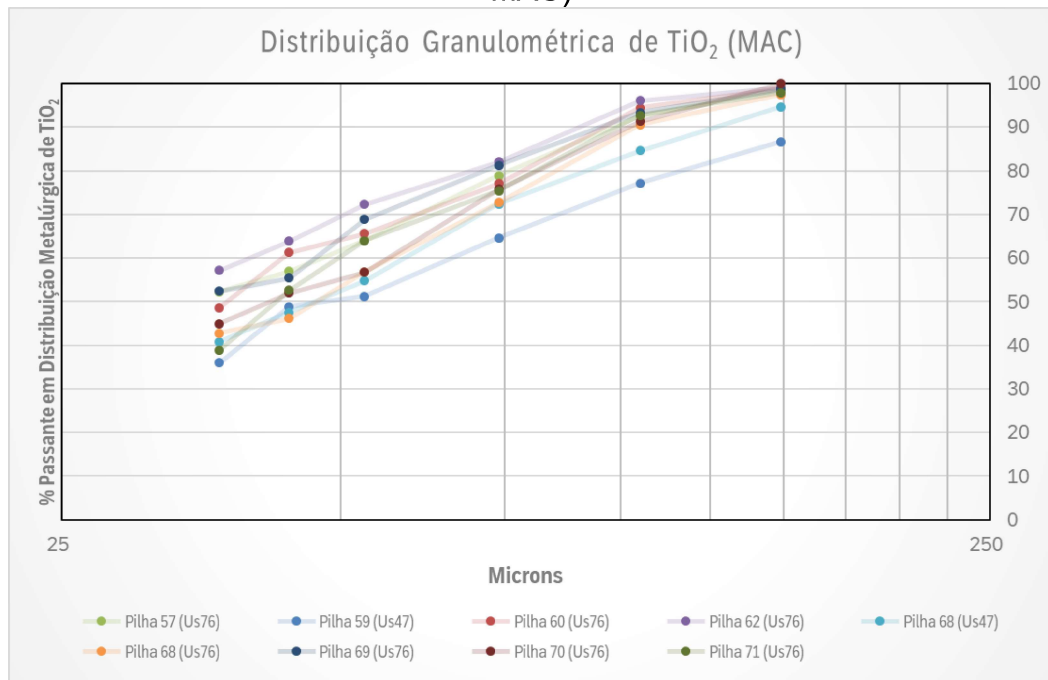
Figura 36 - Média de distribuição metalúrgica de P_2O_5 em granulometria (MAC)



Fonte: Elaborado pelo autor

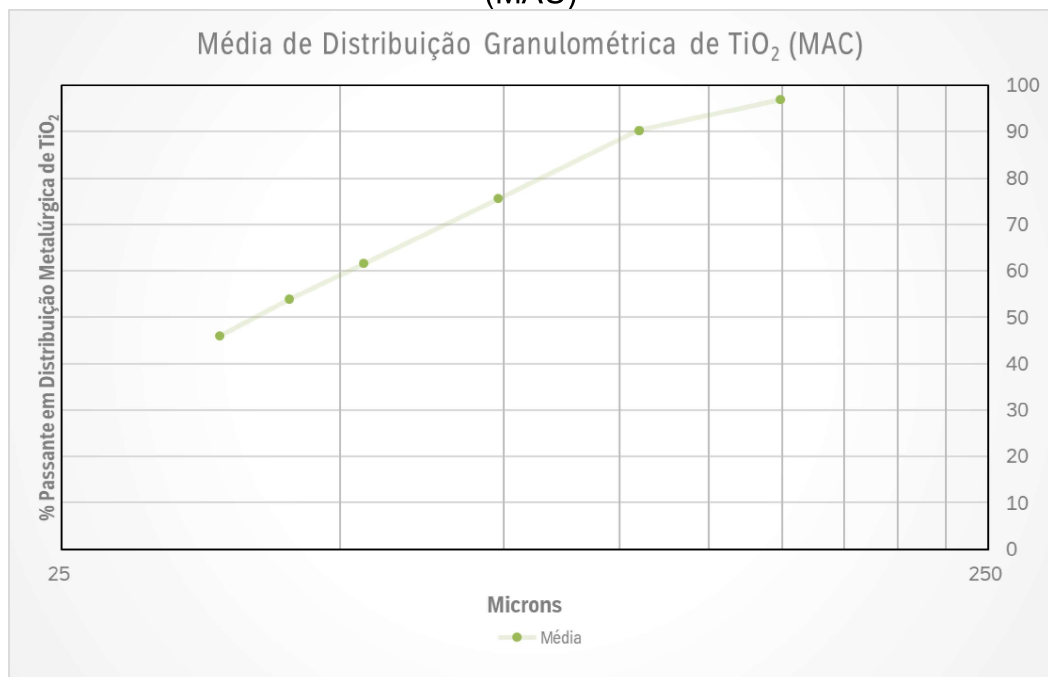
De forma oposta, quando analisamos o principal óxido de interesse neste estudo de recuperação, o TiO_2 notamos o comportamento oposto ao apresentado pelo P_2O_5 . Ou seja, o óxido de TiO_2 aloca-se na fração fina do material MAC. Exemplificando, quando analisamos os gráficos de distribuição granulométrica & metalúrgica de TiO_2 notamos que na granulometria de 53 micras (270 mesh) cerca de menos da metade do TiO_2 (40%) apresenta-se retido. E na granulometria de 37 Micras (400 mesh) temos que 46% do material apresenta-se passante pouco mais que o dobro apresentado pelo P_2O_5 (Figura 37 e 38).

Figura 37 - Distribuição metalúrgica de TiO₂ em granulometria (9 amostras MAC)



Fonte: Elaborado pelo autor

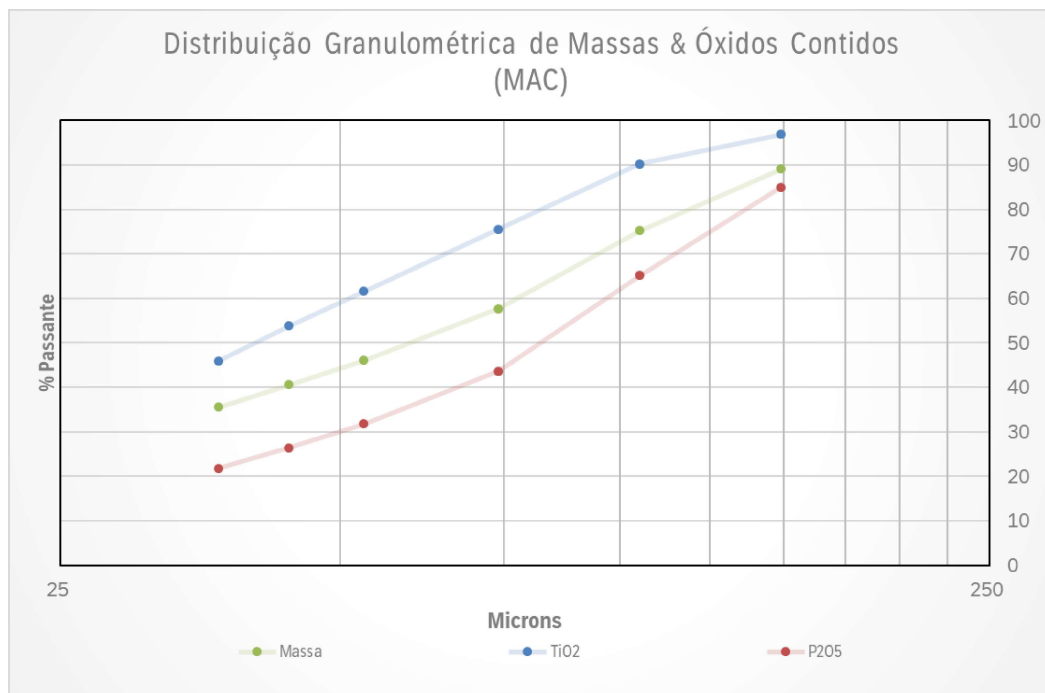
Figura 38 - Média de distribuição metalúrgica de TiO₂ em granulometria (MAC)



Fonte: Elaborado pelo autor

De forma a concluir o comparativo realizado segue o gráfico de distribuição granulométrica cruzando a distribuição mássica e a distribuição metalúrgica dos óxidos de Ti e P (Figura 39).

Figura 39 - Comparativo de distribuições metalúrgicas (TiO_2 & P_2O_5) e mássica em termos de granulometria (média de 9 amostras aleatórias do MAC no ano de 2020)



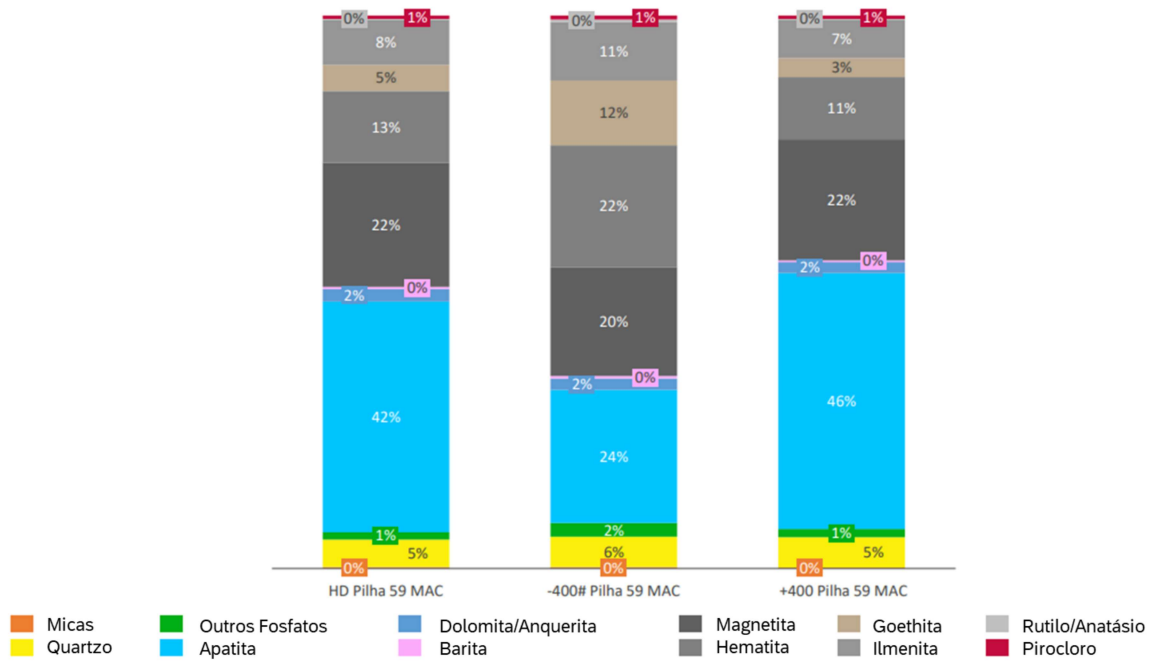
Fonte: Elaborado pelo autor

Em suma, há uma tendência clara da alocação do TiO_2 na fração granulométrica mais fina enquanto o P_2O_5 tende a alocar-se nas frações mais grosseiras do rejeito.

5.1.2 Caracterização Mineralógica do MAC (Magnético de Alto Campo)

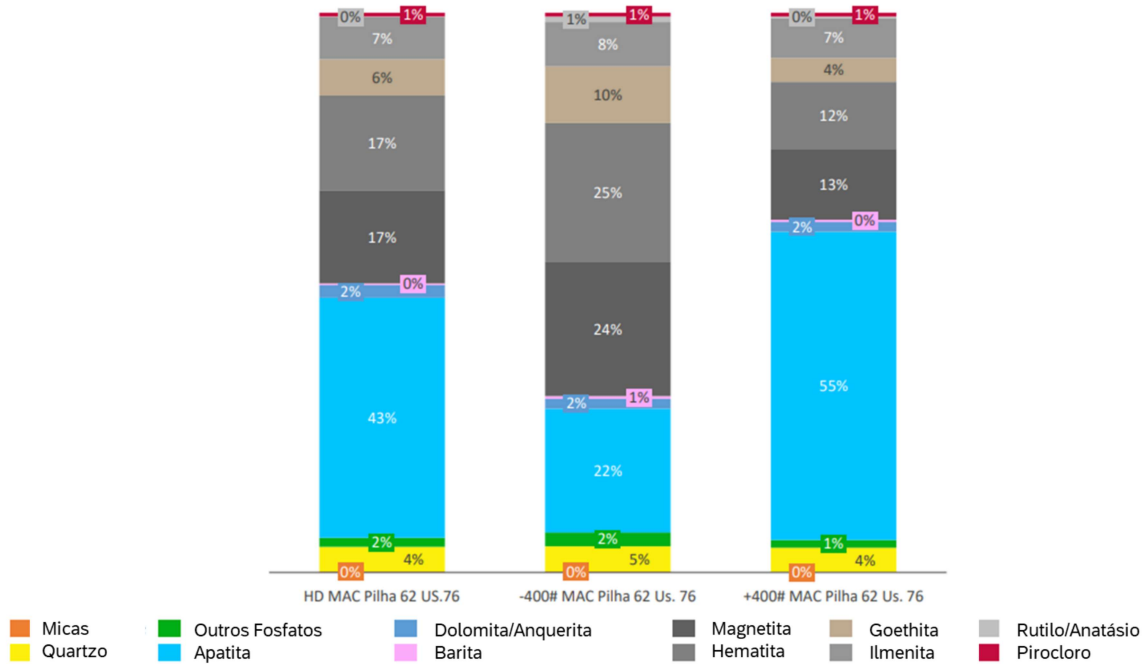
Para melhor compreensão do material foco do estudo de aproveitamento, análises mineralógicas em difração de raio-x (DRX) foram realizadas com três amostras aleatórias das nove amostras citadas anteriormente (amostras das pilhas de minério 59, 71 e 76). Contudo, essas amostras foram analisadas em três diferentes formas sendo: granulometria tal qual amostrada, retido em 37 micras (+400 mesh) e passante de 37 micras (-400 mesh). Segue abaixo os resultados das análises mineralógicas realizadas (Figura 40, 41 e 42).

Figura 40 - Caracterização geológica (DRX) da pilha de minério N°59 de 2020



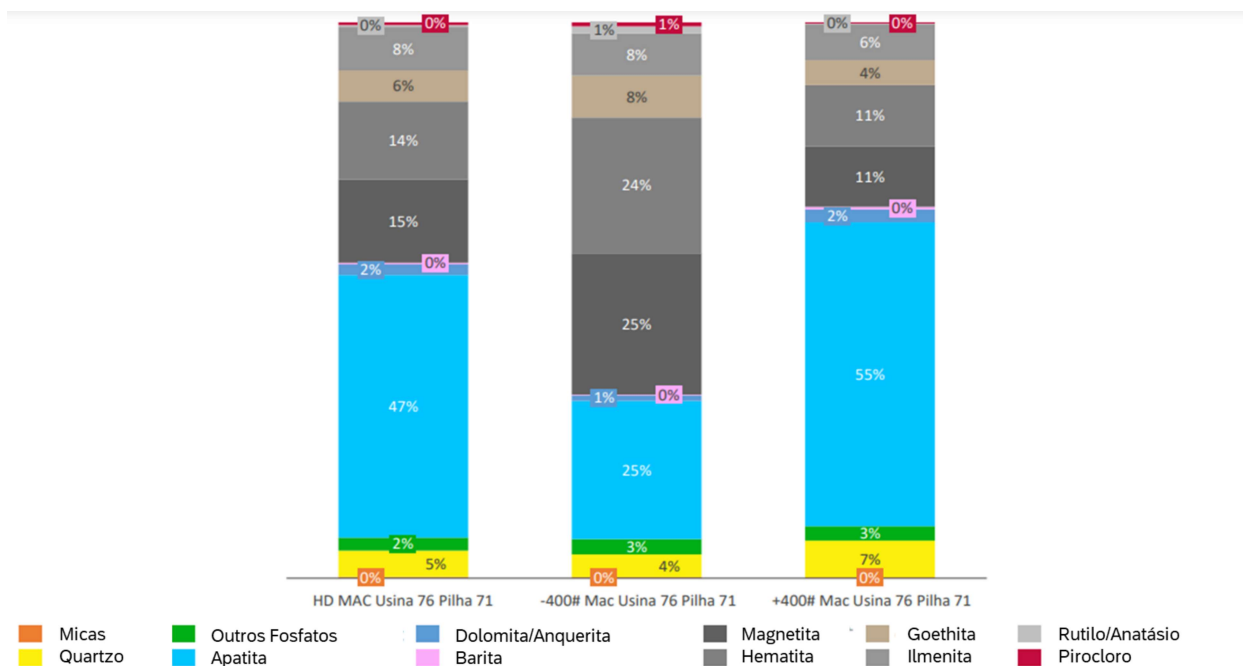
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 - Caracterização geológica (DRX) da pilha de minério N°62 de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42 - Caracterização geológica (DRX) da pilha de minério N°76 de 2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados das mineralogias das três diferentes amostras do rejeito MAC analisadas em DRX apresentam-se bastante similares entre si (Figura 40, 41 e 42).

Começando pelo elemento fósforo presente nas amostras, as análises indicam duas origens principais do mesmo: uma delas sendo o mineral de apatita provavelmente devido ao processo de enriquecimento de apatita da planta. A segunda origem mineral em cerca de 1% até 2%, é descrito nas análise como outros fosfatos. Pela geologia do local podemos inferir que a monazita seja um destes outros minerais fosfáticos os quais contribuem para a presença do elemento fósforo na amostra.

A apatita que representa a principal fonte de fósforo na composição do material, mineralogicamente segue a mesma tendência de partição metalúrgica mencionada anteriormente na análise granulométrica. Onde os óxido de fósforo se aloca na granulometria mais grossa, neste caso +400 Mesh. De forma oposta, outros minerais fosfáticos como possivelmente a monazita apresentam uma leve tendência de alocação na granulometria -400 Mesh.

Identificar que grande parte do teor de óxido de fósforo (P_2O_5) presente no MAC advém da apatita é um fator positivo. Visto que, para compreendermos que o

P₂O₅ presente no MAC seja passível de aproveitamento econômico na cadeia produtiva este necessita não ser originário de fosfatos secundários.

Agora analisando a questão da presença dos minerais que possuem óxido de ferro na composição da amostra (com excessão de ilmenita nesta análise) estes apresentam-se de forma bem variada onde temos:

Grande presença de magnetita sendo esta usualmente a maior quantidade de mineral de composição ferrífera apresentada na amostra com 15% até 22% na amostra de granulometria tal qual (nomeclatura HD). No mais, juntamente com os demais minerais de composição ferrífera podemos notar o enriquecimento dos mesmos presentes nas frações menores que -37 micras (-400 mesh).

O segundo mineral de composição ferrífera presente é a hematita com o mesmo comportamento de concentração em granulometrias mais finas e quantidades bem similares a magnetita mencionada anteriormente. Este variando de 13% a 17% na amostra de granulometria tal qual.

Por fim, com excessão da ilmenita temos a goethita sendo este último na menor concentração de 5% a 6% na amostra tal qual. Ademais, também seguindo o mesmo comportamento dos demais minerais quando cruzamos concentração e granulometria.

Mudando o foco do elemento analisado para a sílica (Si) é claro verificar que a maioria senão toda totalidade desta advém do mineral de quartzo presente nas amostras em quantidades pequenas de 4% a 5% concentrando-se também em granulometrias mais finas.

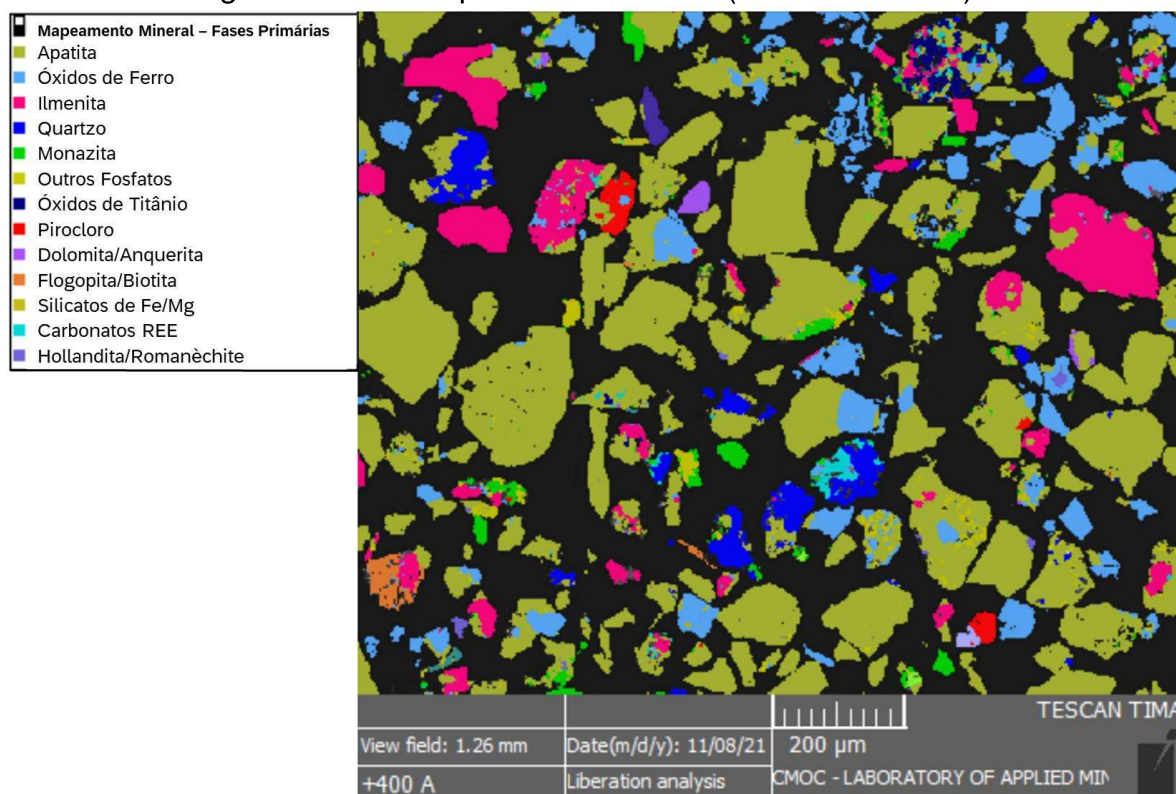
Por outro lado os óxidos de magnésio identificados na amostra, podem ter duas origens principais de acordo com a análise de DRX e mineralogia local. Sendo uma delas a dolomita e outra presumidamente advinda de titanomagnetitas presentes na amostra (geikielita) o qual discutiremos mais a frente.

Das três grandes formas mineralógicas quais o óxido de titânio pode se manifestar (rutilo, anatásio & ilmenita) a análise mineralogia demonstra claramente que a origem do óxido de titânio presente é de ilmenita sendo este de 7% a 8% da composição mineralógica da amostra tal qual. Tal fato é imprescindível para a recuperação econômica deste material, pois concentrados de ilmenita e rutilo apresentam-se como os principais minérios de titânio para uso econômico. No mais, a mineralogia também sugere quantidades ínfimas de anatásio ou rutilo, inrisórias a ponto de dificultar o beneficiamento. Por fim, as imagens dos difratogramas de forma

qualitativa das amostras mencionadas acima, com e sem interpretação (dados primários), podem ser encontradas no Anexo A deste estudo para melhor análise.

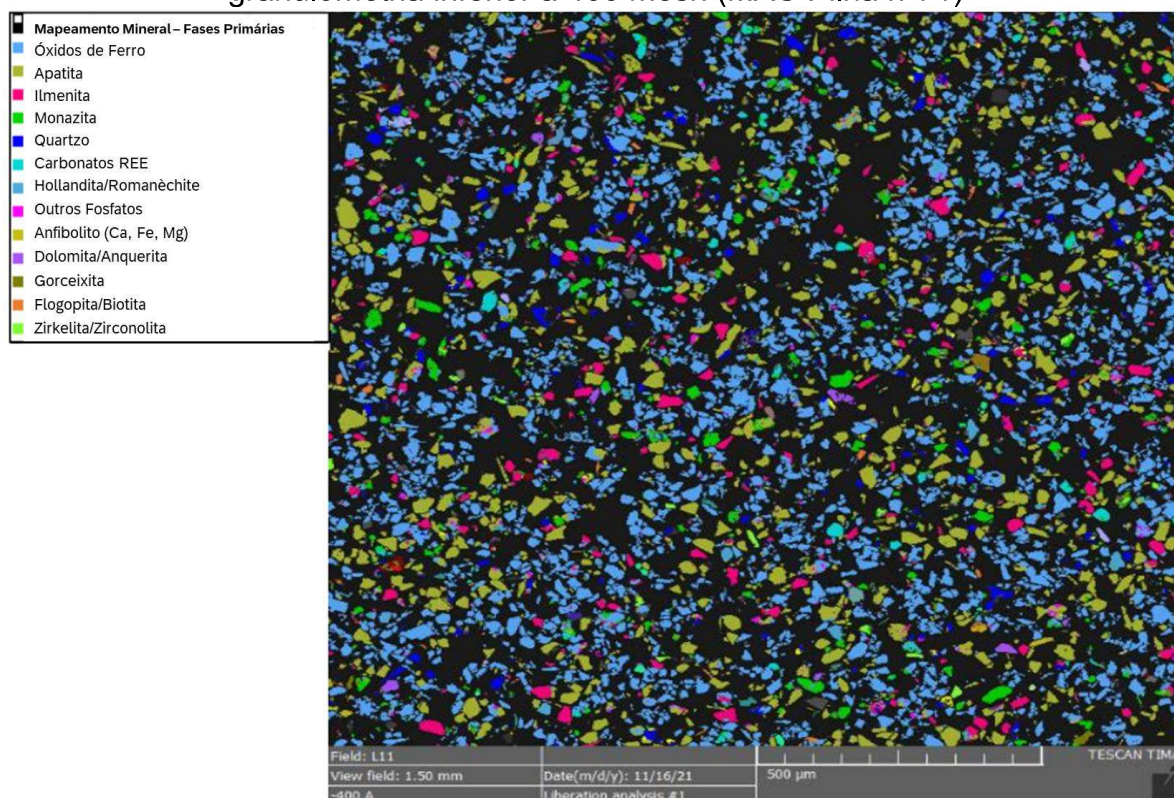
Ademais, afim de aumentar ainda mais os conhecimentos a respeito do material foco deste estudo em questão a amostra MAC da pilha de minério de número 71 foi melhor explorada. Especificamente, as duas amostras de granulometria inferior e superior a 37 micras ou 400 mesh como demonstrado anteriormente (+400 Mesh e -400 Mesh) foram analisadas em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e em espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Inicialmente estão demonstrados abaixo as análises em microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 43 e 44).

Figura 43 - Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostra de granulometria superior a 400 mesh (MAC Pilha nº71)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 44 - Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostra de granulometria inferior a 400 mesh (MAC Pilha nº71)



Fonte: Elaborado pelo autor

Nas imagens apresentadas de +400 Mesh e -400 Mesh respectivamente, podemos notar que na imagem de +400 Mesh é possível melhor visualizar as associações de fases mineralógicas presentes. Infelizmente devido a própria granulometria a matrix, a imagem de -400 Mesh apresenta-se complexa e de difícil interpretação. Entretanto, observando a primeira imagem (+400 Mesh) é possível extrair informações interessantes.

A primeira delas relaciona-se com as partículas de ilmenita (rosas) apresentarem-se numericamente conectadas com partículas de apatita (verde escuro). Demonstrando assim a necessidade de melhor liberação do mineral ilmenita para beneficiamento afim de reduzir teores de fósforo contaminantes oriundos de associações com apatita. Adicionalmente, outra questão notada é a grande presença de apatita (verde escuro) associada com óxidos de ferro (azul claro). Tais fatos são indicativos das razões a cerca de altos teores de P_2O_5 presentes no rejeito magnético do separador de alto campo (MAC). Em outras palavras, a associação mineral entre apatita e minerais ferrosos (óxidos de ferro e

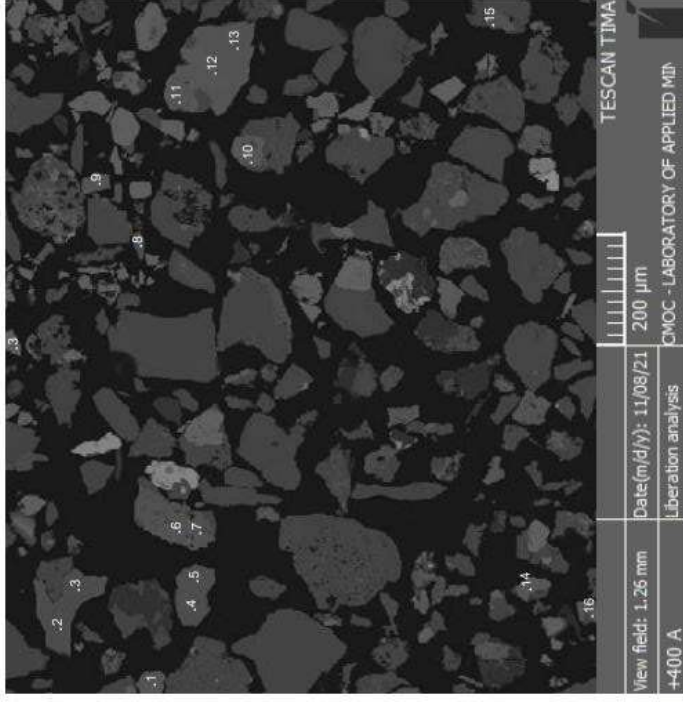
ilmenita), acabam arrastando por magnetismo as partículas de apatita para a parte magnética do separador devido a parte de ferrosa presente.

Entretanto, na mesma imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) podemos notar grãos de apatita completamente liberados presentes na amostra. Indicando assim, certa ineficiência do processo em termos de seletividade entre minerais. Portanto, a presença dos altos teores de P_2O_5 no rejeito magnético de alto campo (MAC) é oriundo em grande parte da apatita seja ela por não liberação de grãos com associação ferrosa ou pela própria ineficiência do processo (equipamento) em questão em se obter seletividade.

De acordo com Marcia Saito em 2021, em um relatório da empresa contendo análises de liberação mineral (MLA) das amostras do rejeito MAC na pilha nº9 do ano de 2020. Nesta amostra em granulometria superior a 37 microns (400 mesh), cerca de 60% da apatita presente no MAC das usinas 47 & 76, apresentava-se livre de associações e o restante (40%) demonstrava-se com associações a minerais ferrosos (MMSAITO CONSULTORIA E GEOLOGIA, 2021). Em suma, a atual análise também converge para o relatório apresentado. Sendo capaz até mesmo inferir com base na análise de MLA reportada que aproximadamente 60% das perdas de P_2O_5 no magnético de alto campo com granulometria superior a 37 microns (400 mesh) são devido a ineficiências operacionais e 40% devido a associações de apatita e minerais ferrosos (grau de liberação).

Adicionalmente, como mencionado análises de energia dispersiva (EDS) foram realizadas afim de quantificar os teores de elementos presentes nos grãos de ilmenita da amostra analisada. Em específico, em ambas as amostras (+400 Mesh e -400 Mesh) 16 pontos do mineral de ilmenita da imagem anterior foram analisados e seus resultados apresentam-se nas tabelas abaixo (Tabela 12 e 13).

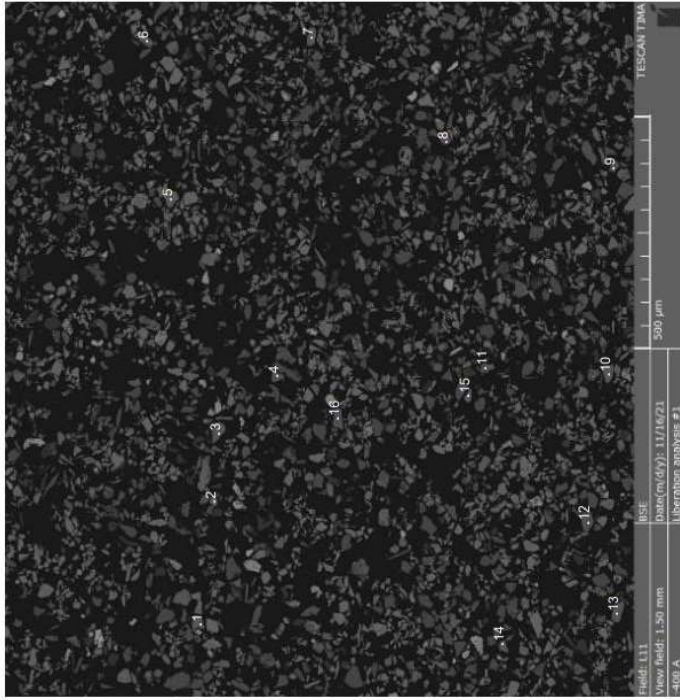
Tabela 12 - Análise de espectroscopia por energia dispersiva em 16 pontos de aleatórios de ilmenita na amostra de pilha N°71 em granulometria superior a 400 mesh



Spectrum	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
1	24.46	1.54	0.95	0.02	1.98	0.41	38.23	0.89	0.12	5.69	25.72
2	25.11	8.59	0.89	0.01	1.92	0.41	41.57	0.85	0.08	2.72	17.85
3	25.11	8.59	0.89	0.01	1.92	0.41	41.57	0.85	0.08	2.72	17.85
4	24.85	8.32	0.86	0.01	1.75	0.34	41.83	0.86	0.09	2.29	18.81
5	24.85	8.32	0.86	0.01	1.75	0.34	41.83	0.86	0.09	2.29	18.81
6	26.36	2.19	0.88	0.04	1.64	0.52	42.23	0.92	0.29	1.69	23.24
7	26.26	2.27	0.89	0.04	1.66	0.54	42.49	0.92	0.22	1.71	22.98
8	25.42	9.21	0.9	0.01	1.71	0.35	41.92	0.96	0.07	2.38	17.07
9	24.08	2.11	0.72	0.01	1.46	0.38	38.78	0.86	0.09	3.44	28.07
10	23.81	0.77	0.75	0.04	2.00	1.29	37.06	0.79	0.14	2.91	30.44
11	24.28	3.98	0.80	0.01	2.05	0.38	39.43	0.85	0.12	1.46	26.64
12	24.28	3.98	0.80	0.01	2.05	0.38	39.43	0.85	0.12	1.46	26.64
13	24.28	3.98	0.80	0.01	2.05	0.38	39.43	0.85	0.12	1.46	26.64
14	23.03	0.75	0.83	0.01	1.92	0.89	38.71	0.77	0.08	4.75	28.24
15	25.07	5.3	0.84	0.02	2.01	1.39	40.15	0.82	0.07	1.76	22.57
16	24.62	0.67	0.87	0.06	1.84	1.13	38.16	0.85	0.1	4.18	27.53

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 - Análise de espectroscopia por energia dispersiva em 16 pontos de aleatórios de ilmenita na amostra de pilha N°71 em granulometria inferior a 400 mesh



Spectrum	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
1	24.96	0.52	0.89	0.02	1.59	0.32	41.32	0.86	0.12	4.98	24.41
2	23.38	1.16	1.29	0.03	2.06	0.16	38.9	0.67	0.06	3.01	29.28
3	27.34	0.47	1.00	0.02	2.15	0.77	42.51	0.91	0.09	2.94	21.79
4	25.59	8.82	0.84	0.01	1.73	0.54	41.35	0.86	0.08	2.14	18.03
5	24.18	0.62	0.88	0.02	1.77	0.36	39.99	0.79	0.17	3.51	27.72
6	23.22	1.33	0.71	0.02	1.18	0.31	40.73	0.75	0.03	3.48	28.24
7	24.16	0.47	1.00	0.02	1.65	0.30	37.97	0.8	0.05	3.96	29.61
8	23.64	9.5	0.98	0.01	1.84	0.27	42.75	0.74	0.10	3.93	16.24
9	24.75	8.16	0.89	0.01	1.36	0.33	41.85	0.87	0.04	1.77	19.96
10	23.72	3.36	0.86	0.01	1.88	0.45	39.55	0.85	0.15	5.24	23.94
11	27.17	0.24	1.16	0.02	1.97	0.35	41.99	0.89	0.07	0.85	25.30
12	24.05	8.58	0.89	0.01	1.79	0.41	42.09	0.76	0.06	4.39	16.97
13	26.97	0.61	0.96	0.01	2.05	0.23	42.89	0.89	0.07	1.23	24.08
14	24.03	3.85	0.74	0.02	1.29	0.46	40.15	0.89	0.07	2.03	26.46
15	23.9	0.83	0.89	0.01	1.68	0.64	38.5	0.84	0.06	4.13	28.51
16	24.61	7.95	0.93	0.01	1.96	0.32	41.53	0.76	0.09	1.81	20.03

Fonte: Elaborado pelo autor

A presente análise de EDS é capaz de prover informações pertinentes acerca da composição química da ilmenita do rejeito magnético de alto campo (MAC) (Tabela 12 e 13). Primeiramente, devemos notar que a ilmenita da amostra nos 32 pontos analisados (16 pontos +400 Mesh e 16 pontos -400 Mesh) obteve resultados do elemento titânio (Ti) variando de 37,06% até 42,89%. Os teores providos pela análise sugerem um teor interessante para o aproveitamento do mineral em questão.

Contudo, os teores de fósforo presentes (P) de 1,18% até 2,15%, magnésio (Mg) de 0,24% até 9,5% e manganês (Mn) de 0,85% até 5,69% sugerem a presença de exsoluções de estes elementos na ilmenita. Em específico, os teores de fósforo (P) de 1,18% até 2,15% sugerem um alto teor deste elemento intrínseco na estrutura do minério. Sendo assim, a separação física do beneficiamento mineral será provavelmente incapaz de prover um produto com baixíssimo teor de fosforo (P) ou seu óxido (P₂O₅). Em outras palavras, a análise infere que a separação de beneficiamento será capaz de produzir um concentrado de titânio, contudo, o contaminante fósforo estará presente devido este apresentar-se intrínseco na estrutura do mineral sendo necessário ataques químicos (exemplo lixiviação) para remoção significativa do mesmo.

Adicionalmente, podemos notar que os teores de MgO variam consideravelmente durante as análises dos 32 pontos. Este fato também infere a presença de outra fase do mineral ilmenita na amostra em específico: a geikielita cuja fórmula molecular é MgTiO₃. Esta composição molecular explicaria satisfatoriamente os teores de Mg apresentados pelas análises em EDS nos pontos como sugeridos de ilmenita anteriormente. No mais, outro item interessante a ser notado são valores consideráveis do elemento vanádio (V) presente (0,67% até 0,96%).

Por fim, um ponto positivo a ser notado são baixíssimos teores do elemento cromo (Cr) no material sendo assim um ponto positivo a baixa concentração do elemento contaminante em questão para um possível concentrado de ilmenítico.

Em suma, podemos ver que a ilmenita oriunda do rejeito magnético de alto campo (MAC) possui valores interessantes de titânio (Ti) em sua composição. Contudo, há fortes indícios da existência de bastante exsoluções de outros elementos em sua composição sendo estes: fósforo (P), magnésio (Mg), manganês (Mn) e vanádio (V). Entretanto, a contaminação por cromo aparentemente não será um problema para a produção do concentrado de ilmenita.

6 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO MINERAL (TESTE I)

Com base nas informações obtidas na fase de caracterização foram executados ensaios com o material do MAC da Pilha 39 de 2021 (Tabela 14), este seguiu a execução de 22 rotas sendo estas apresentando nomenclaturas de “A” até “X”. Nestes ensaios a rota poderia ser iniciada com o material presente no MAC em duas granulometrias:

- Granulometria Padrão – Granulometria In-situ presente na saída MAC
- Granulometria -270# - Granulometria cominuída por moinho de bolas até a obtenção de 95% do material passante em 270#. No mais, utilizando ciclos de moagem de 5 minutos inicialmente devido à alta dureza do material, elevado BWI (Bond Work Index).

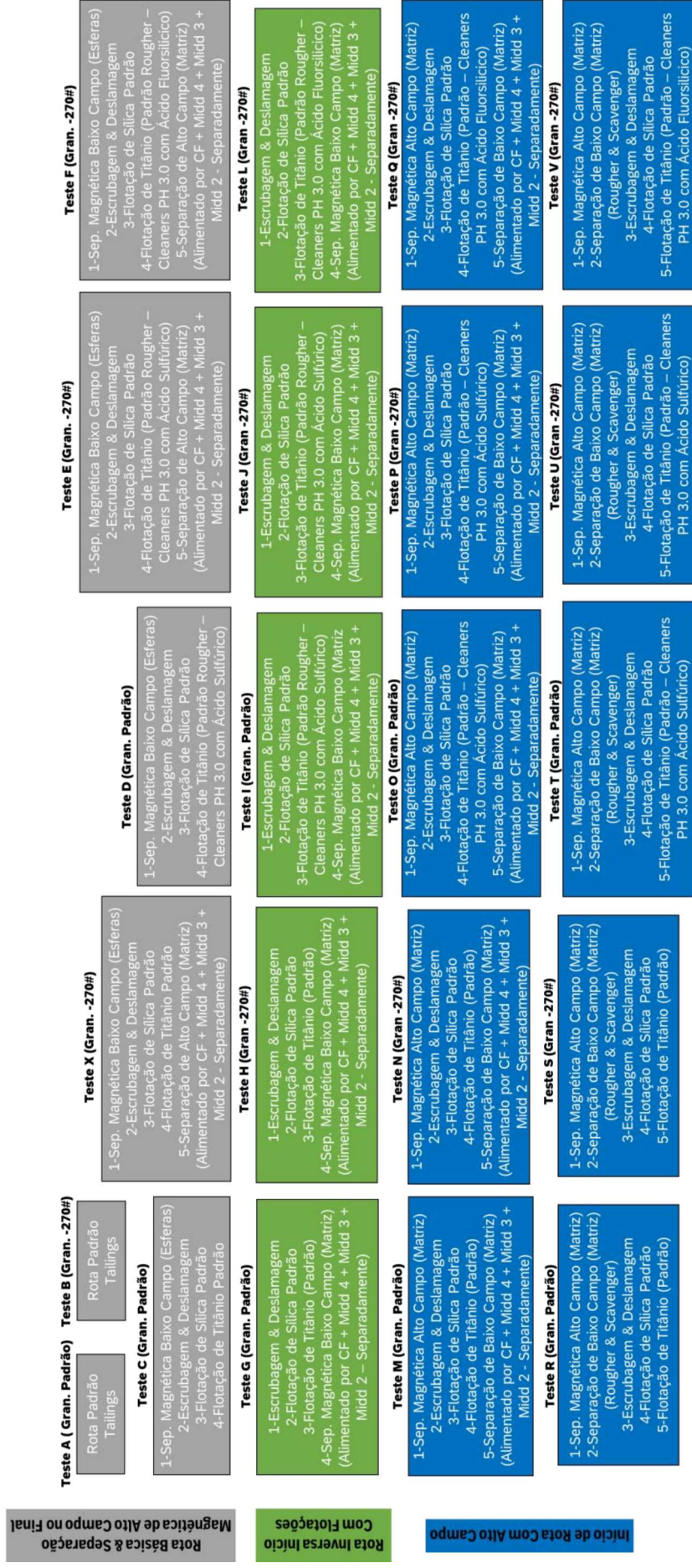
Tabela 14 - Teores de alimentação do Teste I

	Fe2O3	Nb2O5	P2O5	SiO2	TiO2
Alimentação Teste A	28,63%	0,36%	18,40%	4,51%	5,21%

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir é demonstrado a sequência de etapas para cada rota abordada durante os 22 ensaios (letra “A” até “V”) do teste I (Figura 45).

Figura 45 - Descrição de ensaios e etapas para cada teste realizado (Teste I – Ensaios da letra “A” até “V”)



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a realização da análise dos resultados obtidos com o teste, um gráfico de teor de TiO_2 no concentrado final por recuperação metalúrgica de TiO_2 foi gerado. Neste gráfico, cada curva presente representa uma rota realizada onde cada curva apresenta 5 pontos. Sendo que a contagem dos pontos se inicia no menor valor de recuperação metalúrgica de TiO_2 (ponto 1) representado pelo concentrado final de uma rota utilizando 1 flotação *rougher* e 4 flotações *cleaners* e aumenta até atingir o maior valor de recuperação metalúrgica (ponto 5) representado pelo resultado de apenas 1 flotação *rougher* e nenhuma *cleaner*. Especificamente, a composição dos fluxos de flotação dos pontos pode ser vista na tabela abaixo (Tabela 15).

Tabela 15 - Descrição de pontos pela composição de concentrados da flotação de titânio

Concentrados	Pontos
CF	1
CF + Midd 4	2
CF + Midd 4 + Midd 3	3
CF + Midd 4 + Midd 3 + Midd 2	4
CF + Midd 4 + Midd 3 + Midd 2 + Midd 1	5

Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo assim, neste gráfico (Figura 46) quanto mais a curva desloca-se para o canto superior direito melhor o resultado apresentado pela rota (melhor teor final e maior recuperação metalúrgica de TiO_2).

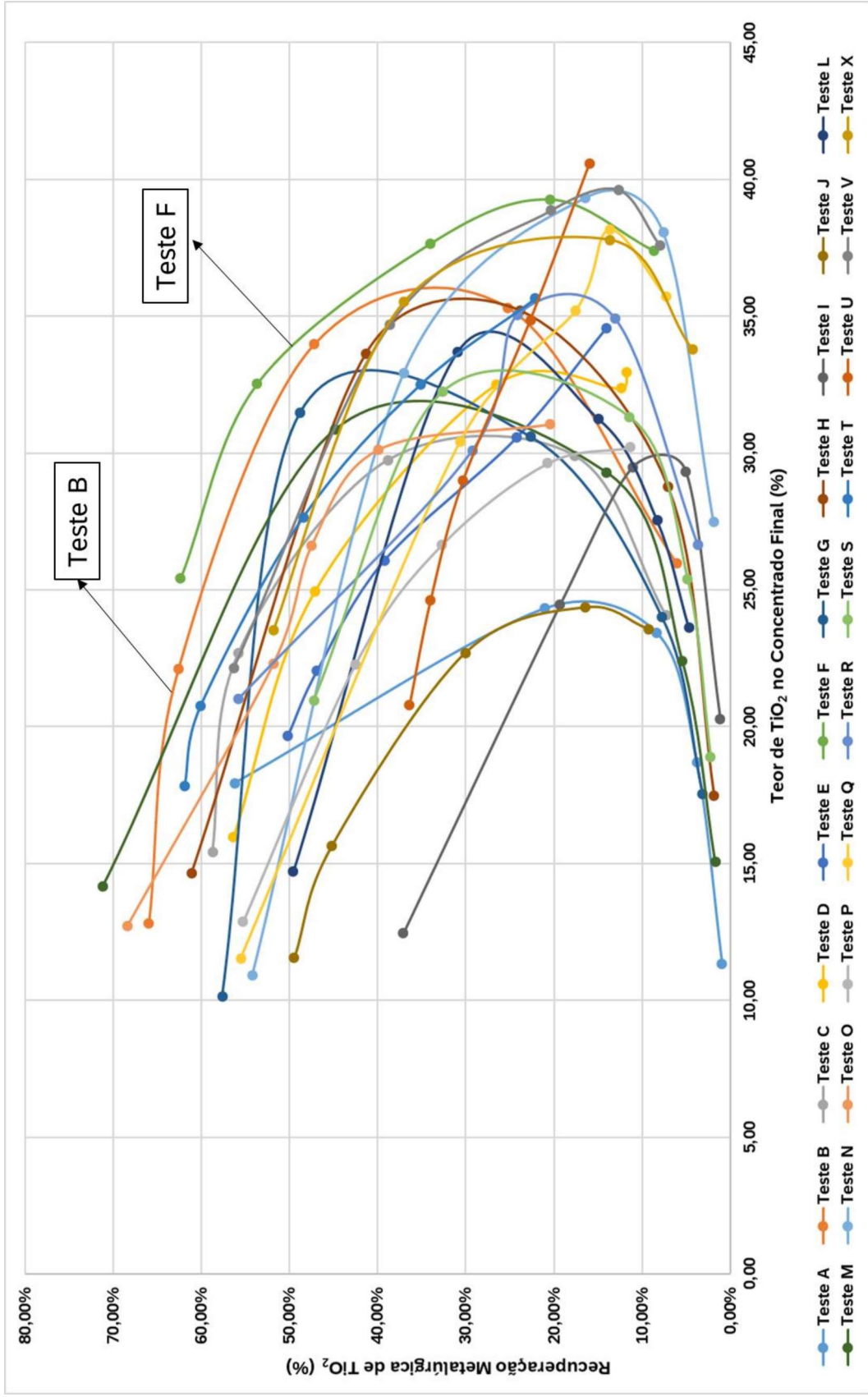
6.1 RESULTADOS OBTIDOS – CONCENTRAÇÃO DE TiO_2

Sendo assim, os melhores resultados apresentados no teste em termos da performance para enriquecimento e recuperação de TiO_2 foram as rotas B & F (Figura 46). Outras rotas apresentaram teores de TiO_2 próximas a 40%, contudo, recuperações metalúrgicas de TiO_2 baixas (<20%) as quais inviabilizam o processo. No mais, podemos concluir que para as rotas analisadas o valor superior a 40% de

TiO₂ para a produção de um concentrado ilmenítico em baixo teor de alimentação das rotas (5,21%) é limitado fortemente pela recuperação metalúrgica de TiO₂.

Especificamente, comparando os resultados da rota B e F na Figura 46 a rota F foi capaz de apresentar melhores resultados que a rota B em termos de qualidade e recuperação metalúrgica. Adicionalmente, o fosforo (P) o qual apresenta-se como um contaminante prejudicial para a comercialização do produto apresentou menores valores na rota F (Tabela 16). Em suma, a rota F apresentou uma performance superior que a rota B para a concentração do TiO₂. No mais, a Tabela 17 contendo a especificação completa dos produtos providos pela rota F é demonstrada a seguir.

Figura 46 - Gráfico de teor de TiO₂ x recuperação metalúrgica de TiO₂ para cada rota realizada no teste I



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16 - Resultado da composição de fluxos da flotação de titânio nos ensaios de melhor performance (F & B)

Teste	Amostra	Massa Seca	Rec. Mássica	Teor de TiO ₂	Gramas de TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂	Teor de P	Teor de P ₂ O ₅	Gramas de P ₂ O ₅	Recuperação Metalúrgica de P ₂ O ₅	Teor de Nb ₂ O ₅	Gramas de Nb ₂ O ₅	Recuperação Metalúrgica de Nb ₂ O ₅
Teste F	CF	41,04	1,20%	37,40	15,35	8,67%	0,81	1,86	0,76	0,12%	0,66	0,27	2,49%
	CF + Midd 4	92,29	2,71%	39,27	36,24	20,46%	0,66	1,52	1,40	0,22%	0,39	0,36	3,30%
	CF + Midd 4 + Midd 3	159,89	4,69%	37,65	60,20	33,99%	0,68	1,55	2,48	0,39%	0,32	0,51	4,73%
	CF + Midd 4 + Midd 3 + Midd 2	292,65	8,59%	32,52	95,16	53,72%	0,81	1,85	5,43	0,86%	0,31	0,91	8,39%
	CF + Midd 4 + Midd 3 + Midd 2 + Midd 1	434,75	12,76%	25,42	110,51	62,39%	1,16	2,67	11,61	1,84%	0,32	1,38	12,71%
Teste B	CF	42,31	1,17%	25,97	10,99	6,10%	1,58	3,62	1,53	0,22%	7,09	3,00	26,47%
	CF + Midd 4	128,78	3,56%	35,31	45,47	25,23%	1,31	3,00	3,86	0,56%	2,55	3,29	28,99%
	CF + Midd 4 + Midd 3	250,60	6,92%	33,97	85,12	47,23%	1,62	3,71	9,30	1,34%	1,48	3,70	32,64%
	CF + Midd 4 + Midd 3 + Midd 2	510,48	14,10%	22,11	112,85	62,62%	3,22	7,39	37,73	5,45%	0,92	4,71	41,58%
	CF + Midd 4 + Midd 3 + Midd 2 + Midd 1	927,50	25,61%	12,82	118,90	65,98%	7,07	16,21	150,33	21,70%	0,60	5,55	48,94%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17 - Composição de teores de óxidos na melhor rota de ensaio (rota F)

Teste	Composição da Amostra	TiO ₂	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO ₂	Nb ₂ O ₅	P	PbO	S	SiO ₂	SnO	Ta ₂ O ₅	ThO ₂	U ₃ O ₈
Teste F	CF	37,40	0,12	0,30	2,24	23,84	0,20	5,62	4,15	0,66	0,80	0,07	0,03	0,31	0,14	0,19	0,14	0,01
Teste F	CF + Midd 4	39,27	0,06	0,18	1,66	25,59	0,14	6,28	3,99	0,39	0,65	0,04	0,02	0,18	0,07	0,12	0,07	0,01
Teste F	CF + Midd 4 + Midd 3	37,65	0,04	0,17	1,64	28,37	0,10	5,95	3,72	0,32	0,67	0,03	0,03	0,13	0,06	0,09	0,04	0,01
Teste F	CF + Midd 4 + Midd 3 + Midd 2	32,52	0,03	0,19	1,95	34,56	0,08	4,80	3,16	0,31	0,80	0,03	0,04	0,20	0,05	0,07	0,03	0,01
Teste F	CF + Midd 4 + Midd 3 + Midd 2 + Midd 1	25,42	0,02	0,26	2,94	42,70	0,08	3,65	2,51	0,32	1,15	0,03	0,07	0,37	0,07	0,07	0,02	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os teores obtidos na Tabela 17 podemos ver que o produto gerado apresenta baixos teores de contaminantes como Al_2O_3 e SiO_3 pontos positivos para a produção de um concentrado de qualidade. Contudo, os teores de fósforo (P) apresentam-se significativos para especificação do produto de forma geral. Adicionalmente, os valores de MgO presentes nos concentrados juntamente com o mineral ilmenita nos confirma o indicativo da presença de altas quantidades de geikielita (MgTiO_3) o qual é um membro do grupo da ilmenita.

De forma geral balanceando a performance de recuperação metalúrgica e os teores de TiO_2 os melhores produtos apresentados são:

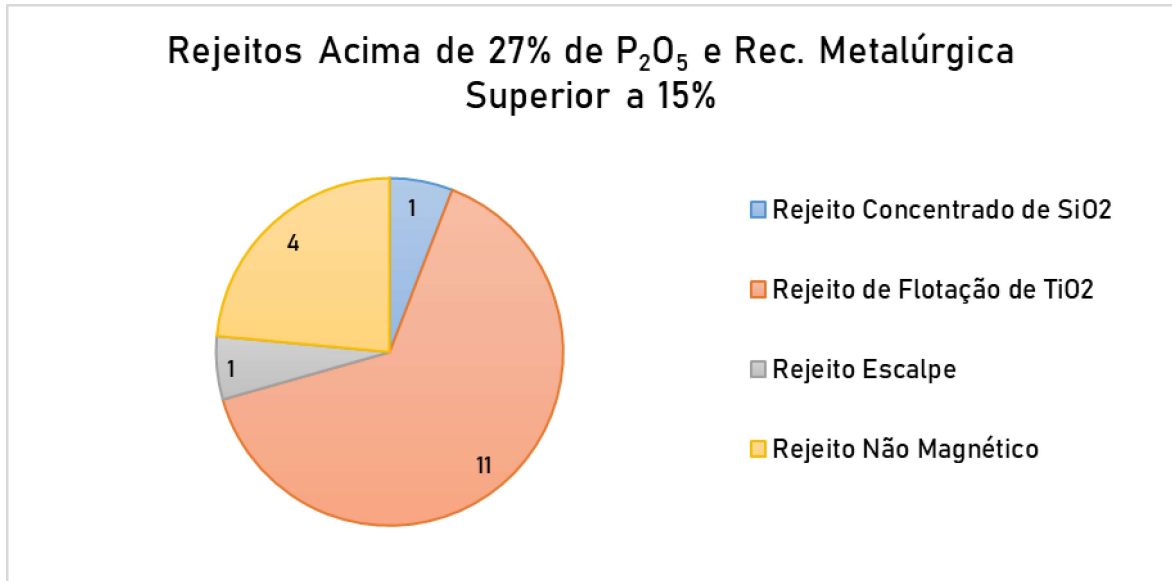
- Teor de TiO_2 37,65%, Recuperação Metalúrgica de TiO_2 33,99% e Recuperação Mássica Global 4,69%
- Teor de TiO_2 32,52%, Recuperação Metalúrgica de TiO_2 53,72% e Recuperação Mássica Global 8,59%

6.2 RESULTADOS OBTIDOS – CONCENTRAÇÃO DE P_2O_5

Quando analisamos a rota em questão há a presença de determinados pontos de rejeito onde ocorre uma concentração alta de P_2O_5 . Sendo assim, este rejeito pode tornar-se um produto secundário do processo de beneficiamento de TiO_2 , sendo esses um dos itens complementares do objetivo específico deste estudo.

Nas rotas abordadas todos os dados de rejeitos foram filtrados seguindo a seguinte eliminação: rejeitos com o teor de P_2O_5 superior a 27% & com recuperações metalúrgicas globais de P_2O_5 superiores a 15%. Em suma, basicamente teores de concentrado apatítico interessantes (>27%) em uma boa recuperação metalúrgica. Aplicando essa classificação podemos identificar 17 rejeitos no total aos quais possuem estas características e estes apresentam-se dispostos no gráfico abaixo (Figura 47).

Figura 47 - Análise de rejeitos das rotas com base em teor de P₂O₅ e partição (recuperação) metalúrgica de P₂O₅



Fonte: Elaborado pelo autor

Com estes dados é possível notar que o rejeito da flotação de TiO₂ possui uma alta capacidade de se tornar um subproduto de concentrado de P₂O₅. Em outras palavras, em cerca de 64,7% dos rejeitos de alta qualidade de P₂O₅ tem sua origem no rejeito de TiO₂. No mais, segue abaixo a Tabela 18 contendo especificadamente os fluxos de rejeito e rotas capazes de apresentar teor de P₂O₅ superior a 27% e com recuperações metalúrgicas globais superiores a 15%.

Tabela 18 - Teores e recuperações de rejeitos de rota os quais apresentaram melhores resultados para aproveitamento de concentrado apatítico (P₂O₅)

Teste	ID Amostra	Fe ₂ O ₃	Recuperação Mássica	P ₂ O ₅	Recuperação Metalúrgica de P ₂ O ₅
Teste B	Rej. Ti Teste B -270#	2,32	23,39%	34,18	41,78%
Teste A	Rejeito Ti P.39-A MAC	5,47	20,94%	32,26	36,71%
Teste C	Rej. Ti MAC TESTE C P.39-A	5,91	32,04%	31,58	55,17%
Teste X	Rej. Ti Teste X	9,18	20,95%	30,58	35,69%
Teste A	Escalpado Ti P.39-A MAC	7,71	17,06%	29,56	27,41%
Teste D	Rej. Ti TESTE D MAC P.39-A	9,56	37,73%	29,49	60,80%
Teste G	Rej. Ti Teste G	12,89	52,18%	28,53	75,84%
Teste L	Conc. de Silica Teste L	7,98	52,26%	28,39	71,69%
Teste F	Rej. Ti Teste F	12,5	23,60%	28,32	37,40%
Teste T	Rej. Ti Teste T	13,03	10,63%	28,31	18,99%

Teste M	Não Mag. 18,9A Teste M P.39-A	5,98	32,40%	27,91	49,82%
Teste E	Midd 1 Teste E	12,25	16,19%	27,9	26,65%
Teste M	Rejeito Ti Teste M P.39-A	12,53	20,53%	27,84	31,49%
Teste O	Não Mag. 18,9A Teste O P.39-A	6,8	31,67%	27,69	46,33%
Teste O	Rej. Ti Teste O P.39-A	14,01	19,93%	27,6	29,05%
Teste R	Não Mag. Teste R	7,26	36,64%	27,26	54,14%
Teste T	Não Mag. Teste T	6,56	35,31%	27,22	60,65%

Fonte: Elaborado pelo autor

É interessante notar na Tabela 18 os valores dos produtos providos pelas rotas que apresentaram as melhores performances de produção de concentrado ilmenítico (Rota B e F).

Posteriormente, realizando uma análise na curva de leitura adequada para altos valores de P_2O_5 , podemos perceber que o valor apresenta-se superior ao indicado anteriormente como sugerido, atingindo assim 29,80% e 36,62% de P_2O_5 (Tabela 19). No mais, observamos ainda que um dos principais contaminantes do concentrado de P_2O_5 presente é o Fe_2O_3 . Na rota B, os teores de Fe_2O_3 apresentaram-se baixos cerca de 2,26% obtendo o melhor teor de P_2O_5 36,62%. Já na rota F atingimos o valor de 29,80% de P_2O_5 com teores de Fe_2O_3 elevados de 12,22%. Portanto, fomos capazes de apresentar rejeitos apatíticos de teor elevado de P_2O_5 e recuperações metalúrgicas interessantes, como apresentado abaixo:

- Rota B – Teor de 36,62% de P_2O_5 com 43,87% de Recuperação Metalúrgica Global de P_2O_5 e 23,89% de Recuperação Mássica Global
- Rota F – Teor de 29,80% de P_2O_5 com 37,61% de Recuperação Metalúrgica Global de P_2O_5 e 23,60% de Recuperação Mássica Global

Ademais, segue abaixo as especificações do produto gerado:

Tabela 19 - Avaliação da capacidade de recuperação de P_2O_5 das rotas F & B

ID Amostra	Al_2O_3	BaO	CaO	CaO/ P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	Nb_2O_5	P_2O_5	SiO_2
Rej. Ti Teste F	0,67	1,88	39,70	1,33	12,22	0,98	0,15	29,80	0,67

ID Amostra	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	CaO/P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SiO ₂
Rej. Ti Teste B -270#	0,33	1,03	48,17	1,32	2,26	0,72	0,05	36,62	0,16

Fonte: Elaborado pelo autor

A principal diferença entre a qualidade e recuperação metalúrgica de P₂O₅ apresentados pelo subproduto da rota B e F em questão está correlacionada a dois itens:

- I. Melhor performance de seletividade realizada no Teste B na etapa de flotação de sílica quando comparada ao Teste F. Especificamente, há uma grande perda de P₂O₅ na flotação de SiO₂ executada pelo Teste F quando comparamos ao Teste B, como demonstrado na Tabela 20 a seguir.

Tabela 20 - Comparativo de performance de partição metalúrgica de P₂O₅ na flotação de sílica entre rotas F & B

Teste	ID Amostra	P ₂ O ₅ (%)	Recuperação Metalúrgica de P ₂ O ₅ (%)
F	Rej. Ti Teste F FRX002	29,80	37,61%
F	Conc. Sílica Teste F FRX002	27,15	50,83%
B	Rej. Ti Teste B -270# FRX002	36,62	43,87%
B	Conc. Sílica Teste B -270# FRX002	8,09	2,88%

Fonte: Elaborado pelo autor

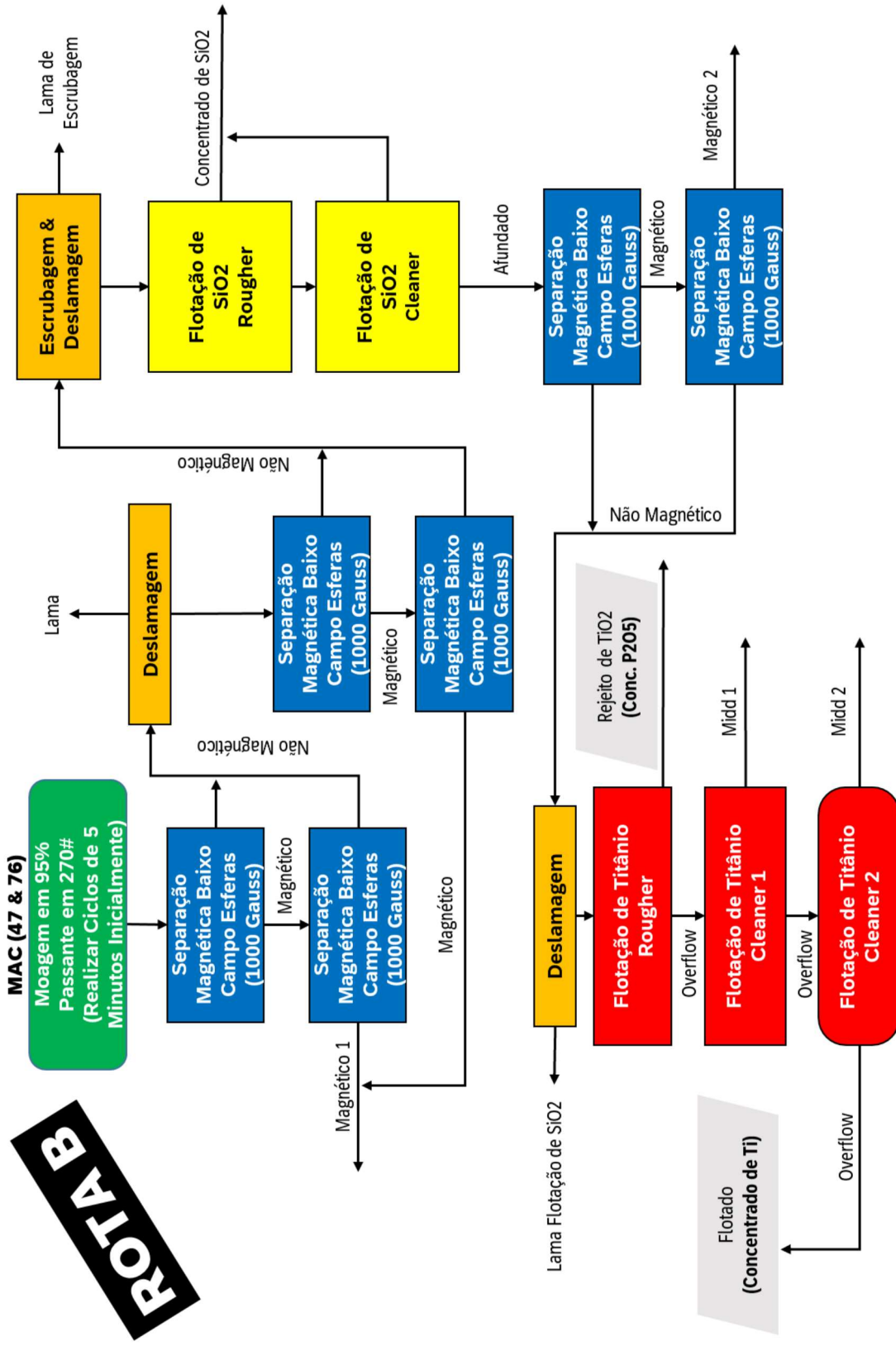
- II. Maior quantidade de etapas de separação magnética de baixo campo presentes no Teste B (3 Etapas – *Rougher & Scavenger*) em comparação ao Teste F (1 Etapa – *Rougher & Scavenger*).

O fluxograma de ambas as rotas (B & F) apresentam-se detalhadamente demonstradas abaixo (Figura 48 e 49). Melhorias na rota apresentadas (rota F) serão abordadas no próximo ensaio desta obra.

No mais, com base nos dados analisados podemos também inferir que os teores de MgO mais elevados presentes no subproduto de concentrado apatítico podem ser de titânio remanescente do mineral gerkeilita e não de origem dolomítica.

Sendo assim, podemos verificar com estes resultados a capacidade do processamento do rejeito MAC (Magnético de Alto Campo) para prover materiais interessantes como o concentrado ilmenítico e apatítico de baixo teor.

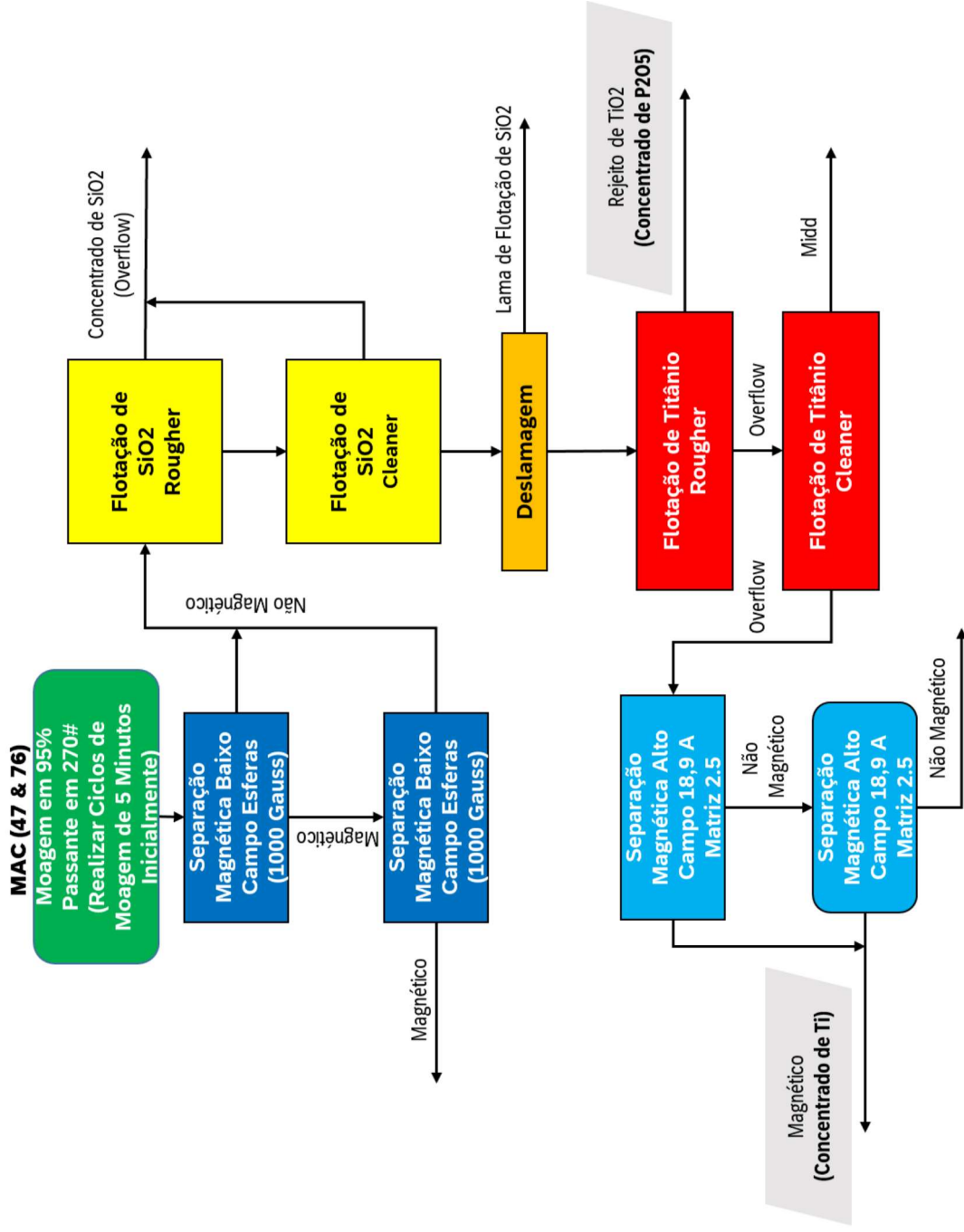
Figura 48 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota B



Fonte: Elaborado pelo autor

ROTA F

Figura 49 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota F



Fonte: Elaborado pelo autor

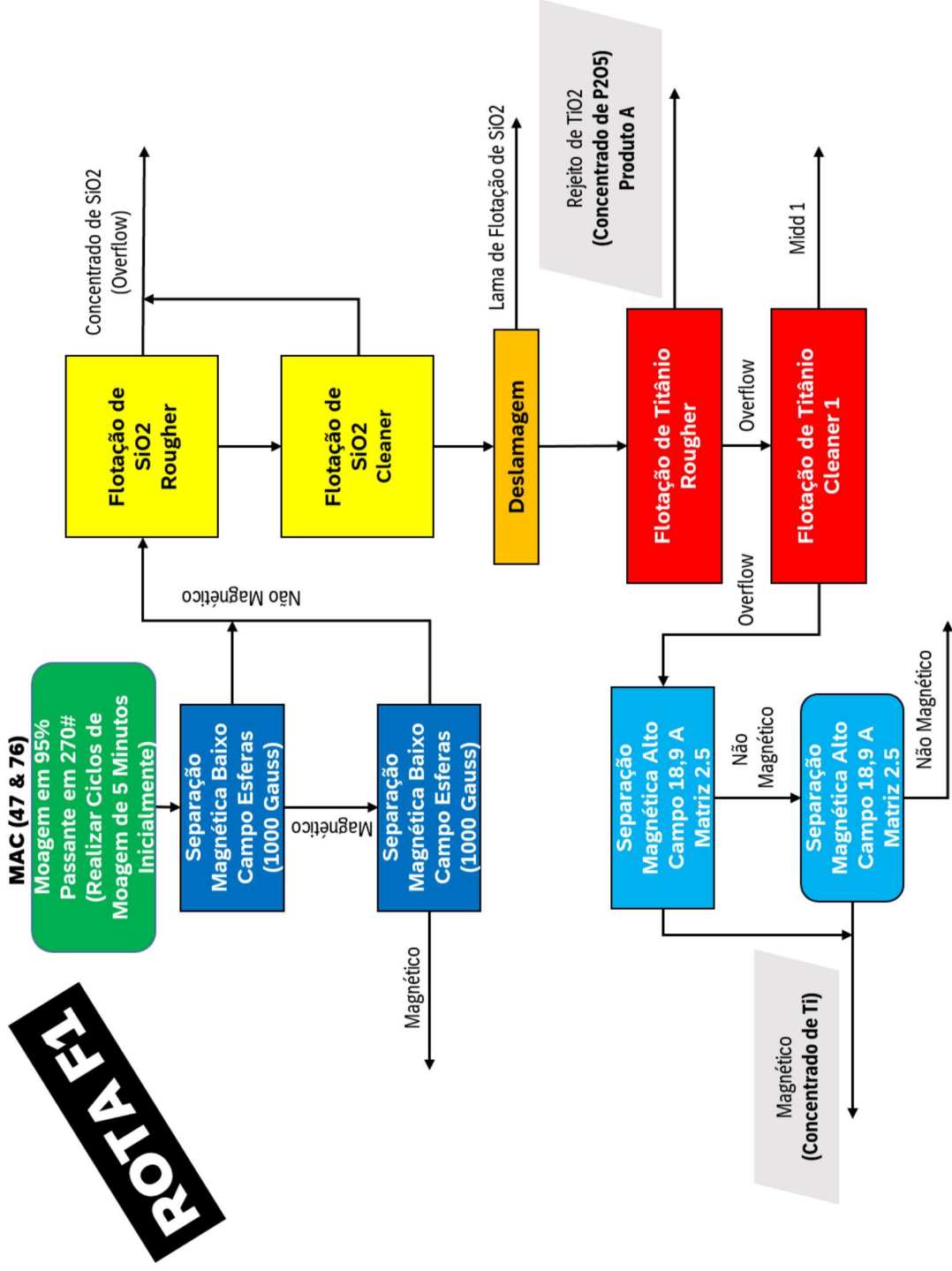
7 APERFEIÇOAMENTO DE ENSAIO DE BENEFICIAMENTO MINERAL (TESTE II)

O teste anterior demonstrou uma boa oportunidade de produção de concentrado ilmenítico e um subproduto apatítico. Contudo, melhorias em relação a rota podem ser realizadas, principalmente focadas na obtenção de um subproduto apatítico de melhor teor e possivelmente maior recuperação metalúrgica de P_2O_5 .

Seguindo este objetivo o teste II foi executado, para otimizar o subproduto de concentrato apatítico principalmente (P_2O_5) e posteriormente titanífero (TiO_2). Portanto, a rota F foi modificada entre rota F1 e rota F2 sendo a principal diferença das mesmas a presença da etapa de escrubagem e deslamagem. Em específico, a rota F1 é igual a rota F original utilizado no experimento anterior já a rota F1 utiliza-se da adição da escrubagem e deslamagem antecedendo a flotação de SiO_2 .

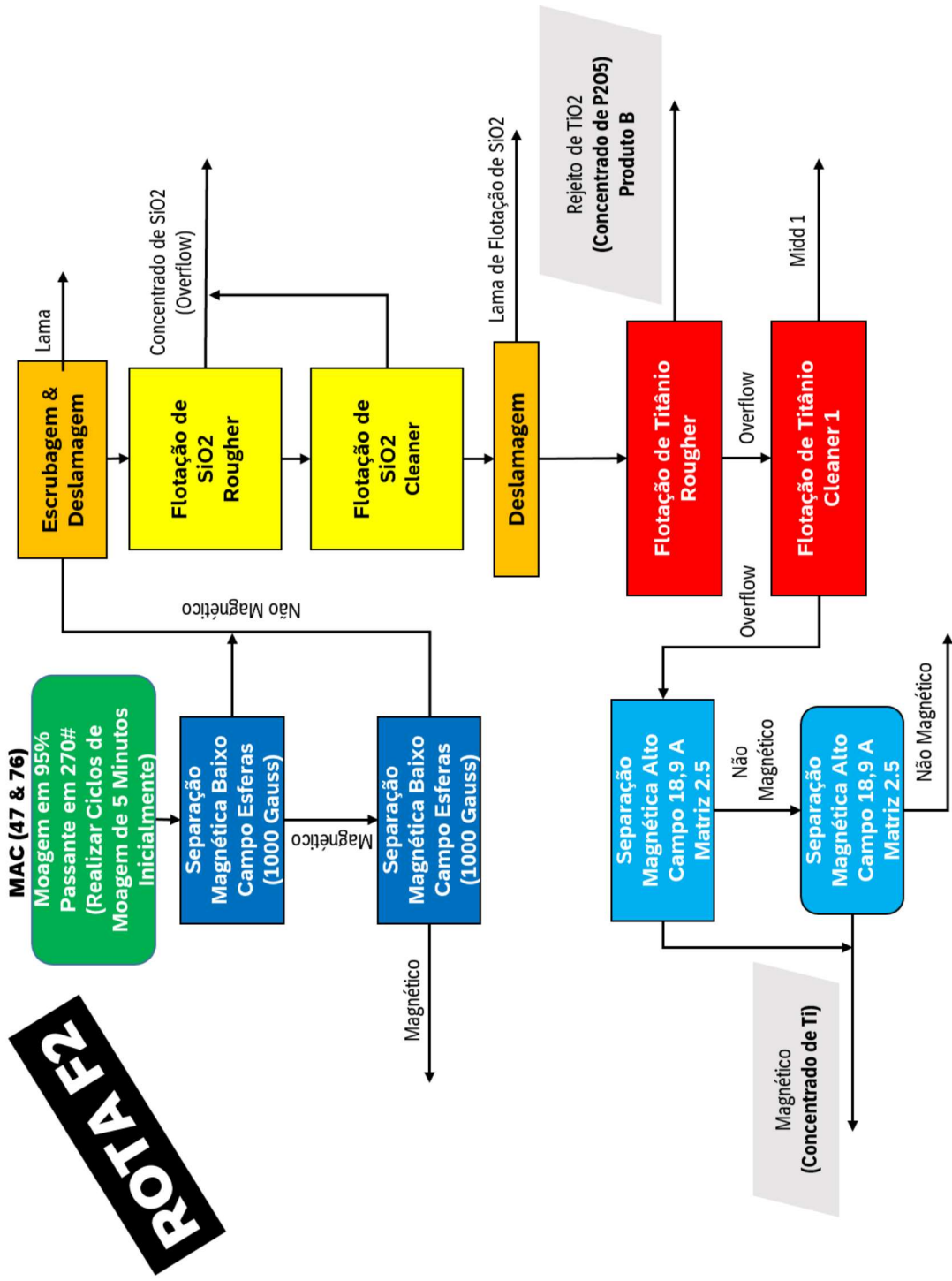
Complementarmente, neste teste é avaliado a adição de uma etapa de separação magnética de baixo campo (1000 Gauss) e alto campo (16000 Gauss) no rejeito da flotação de titânio. Ou seja, no concentrado apatítico para aumento dos teores de P_2O_5 e redução dos teores de Fe_2O_3 apresentados. No mais, devido a interessante performance obtida pelo rota B no teste anterior (Teste I) a mesma também foi realizada com os demais ensaios para assim aferir uma rota final de beneficiamento mineral. As rotas B, F1 e F2 estão representadas abaixo além da adição de separações magnéticas no final da rota como demonstrado nas Figura 50, 51, 52 e 53.

Figura 51 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota F1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 52 - Fluxograma de etapas de processo de beneficiamento da rota F2

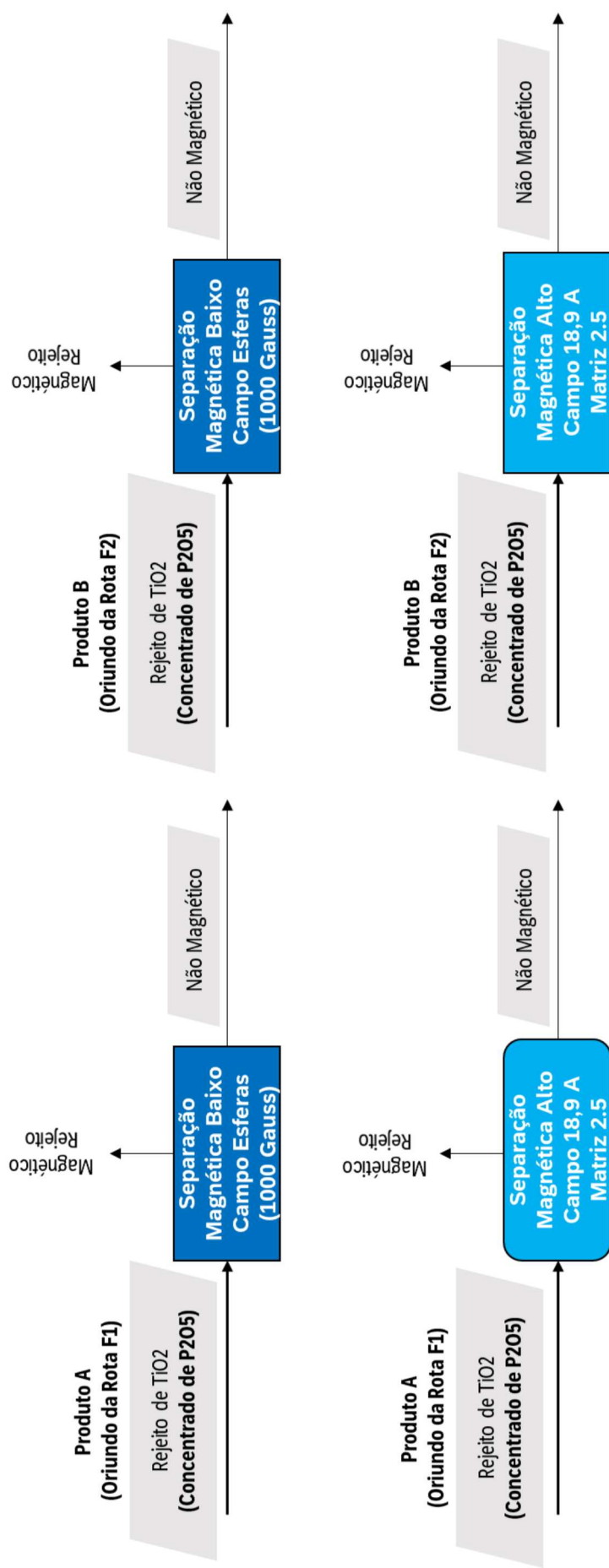


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 53 - Rotas de separações magnéticas de baixa e alta para redução de teores de ferro nos fluxos de concentrado apatítico

ROTA F1

ROTA F2



Fonte: Elaborado pelo autor

O material para o teste II foi coletado durante a pilha N°83 de 2021, este apresentou um teor de TiO₂ superior ao teste I anterior atingindo valores de 9,17% nas análises químicas (Tabela 21). Teor este elevado, contudo, dentro dos valores de padrão de processo do rejeito de alto campo demonstrados no ano de 2020. Entretanto, é importante ressaltar que este teor de alimentação de TiO₂ mais elevado que a média foi capaz de exercer um resultado mais positivo (teores mais elevados no produto) entre os testes durante o estudo em questão. Complementarmente, afim de obter um maior controle da amostra foi realizado uma análise química de cada faixa granulométricas da alimentação do teste (rejeito de alto campo) os resultados da mesma de forma condensada apresentam-se na Tabela 22.

Tabela 21 - Teores de alimentação do Teste II

	Fe₂O₃	Nb₂O₅	P₂O₅	SiO₂	TiO₂
Alimentação do Teste B	33,08%	0,41%	15,01%	4,46%	9,17%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 22 - Distribuição de massa, P₂O₅ e TiO₂ da alimentação do teste II

Microns	Dist. Em Massa			Dist. Em P ₂ O ₅			Dist. Em TiO ₂		
	(g)	% Retida Simples	% Passante Acumulada	Teor (%)	% Teor Simples	% Teor Acumulada	Teor (%)	% Teor Simples	% Teor Acumulada
+ 53	53,64	27,60	72,40	16,75	30,70	30,70	10,36	30,73	30,73
+ 44	27,65	14,23	58,17	15,46	14,60	45,30	10,93	16,71	47,44
+ 37	15,58	8,02	50,15	15,83	8,43	53,73	10,19	8,78	56,22
+ 25	12,34	6,35	43,80	14,64	6,17	59,90	11,31	7,72	63,94
- 25	85,12	43,80	0,00	13,79	40,10	100,00	7,66	36,06	100,00
	Soma Calculada (g)		193,33	Teor Calculado (%)		15,06	Teor Calculado (%)		9,31
	Soma Amostrada (g)		206,88	Teor Amostrado (%)		15,01	Teor Amostrado (%)		9,17
	Desvio (%)		-6,07	Desvio (%)		0,35	Desvio (%)		1,47

Fonte: Elaborado pelo autor

7.1 RESULTADOS OBTIDOS – CONCENTRAÇÃO DE TiO₂

Primeiramente, realizando o teste com a rota B foi possível obter um concentrado final com o teor de 45,25%, com 47,49% de recuperação metalúrgica global de TiO₂ e 9,67% de recuperação mássica total da rota (Tabela 23).

Tabela 23 - Balanço de massa de fluxos de rejeito e concentrado da rota B

ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Magnético 1 (LIMS)	37,64%	7,54	30,80%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Lama	7,62%	4,08	3,37%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Lama Flot. SiO ₂	0,14%	7,58	0,12%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Conc. SiO ₂	10,91%	4,19	4,96%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Magnético 2 (LIMS)	0,07%	8,12	0,06%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Rej. TiO ₂	26,37%	0,66	1,89%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
MIDD 1	5,21%	10,97	6,21%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
MIDD 2	2,37%	19,77	5,10%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Conc. TiO ₂	9,67%	45,25	47,49%
		TiO ₂ Alimentação do Teste (Recalculado)	
		9,21%	

Fonte: Elaborado pelo autor

Adicionalmente como mencionado, a utilização de mais etapas *cleaners* na flotação de titânio podem ser empregadas afim de se aumentar o teor de

concentrado final ao custo de menor recuperação metalúrgica de TiO_2 . Para a rota B com base no último teste, foi estabelecido a utilização de duas etapas *cleaners* para aumento do teor de concentrado e balanceamento de recuperação metalúrgica de TiO_2 . Entretanto, caso seja necessário em nível laboratorial e industrial é possível se efetivar manobras operacionais para aumento de recuperação de TiO_2 e ainda mantendo um teor considerável caso um material rico de alimentação esteja presente. Por exemplo, é possível em um material de elevado teor de alimentação como o do Teste II remover uma etapa *cleaner* ocasionado redução de teor, mas um aumento de recuperações. Ou seja, adicionar o rejeito da última etapa *cleaner* (MIDD2) ao concentrado de flotação. Em suma, podemos ter os seguintes resultados de produtos na Rota B com uma ou duas etapas de flotação *cleaner*:

- Com Duas *Cleaners* (Foco Qualidade) – Concentrado: Teor de TiO_2 45,25%, Recuperação Metalúrgica de TiO_2 47,49% e Recuperação Mássica 9,67%
- Apenas Uma *Cleaner* (Foco Recuperação) - Concentrado: Teor de TiO_2 40,23%, Recuperação Metalúrgica de TiO_2 52,59% e Recuperação Mássica 12,04%

Sendo assim, realizando os cálculos de média ponderada de teor final e a adição dos valores de recuperações. Obteve-se um aumento significativo de recuperação metalúrgica e ainda mantendo um teor razoável de TiO_2 no concentrado de 40,23%. Contudo, um ponto negativo que deve ser considerado é o aumento de teores de P_2O_5 caso este incremento de recuperação por remoção de uma flotação *cleaner* ocorra. Em específico, o concentrado final de TiO_2 com duas *cleaners* apresenta um teor de 1,49% deste contaminante (P_2O_5) (P 0,65%) onde o teor do MIDD2 (rejeito da última *cleaner*) por si só apresenta 5,79% de P_2O_5 (P 2,52%). Realizando assim a adição dos dois produtos a média ponderada de massa dos teores de P_2O_5 seria em torno de 2,34% (P 1,02%). Outros contaminantes como: SiO_2 , CaO e Al_2O_3 sofreriam efeitos similares devido a maior contaminação presente no MIDD 2.

Analisando agora os resultados obtidos pela rota F1 apresentamos as seguintes performances demonstradas na Tabela 24.

Tabela 24 - Balanço de massa de fluxos de rejeito e concentrado da rota F1

ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Magnético 1 (LIMS)	25,64%	5,2	14,64%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Conc. SiO ₂	33,20%	4,57	16,66%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Lama Flotação SiO ₂	0,94%	7,87	0,82%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Rej. TiO ₂	29,14%	5,64	18,04%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
MIDD 1	1,30%	14,05	2,01%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Ñ Magnético (HIMS)	5,34%	44,32	26,01%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Conc. de TiO ₂	4,43%	44,8	21,82%
		TiO ₂ Alimentação do Teste (Recalculado)	
		9,11%	

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da Rota F1 apresentaram a capacidade de concentração para a obtenção de um teor de 44,80% de TiO₂ no produto final com uma recuperação metalúrgica de TiO₂ de 21,82% e mássica de 4,43%. No mais, é possível notar que na última etapa do processo de enriquecimento foi observado um efeito similar ao da Rota B onde devido ao alto teor de alimentação ocasionou consequentemente um elevado teor de TiO₂ ao rejeito da última etapa neste caso: o não magnético de alto campo (teor equivalente ao concentrado) (Tabela 25). Contudo, de forma similar podemos notar que apesar do rejeito não magnético de alto campo apresentar o

mesmo teor de TiO₂ do concentrado final este apresenta teores mais elevados de contaminantes (Al₂O₃, BaO, CaO, MgO e P₂O₅)

Tabela 25 - Teores de TiO₂ e óxidos contaminantes no magnético e não magnético de alto campo (etapa final) da Rota F1

ID Amostra	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Ñ Magnético (HIMS)	0,28	0,17	2,16	17,93	12,37	0,45	1,81	0,01	44,32
Conc. De TiO ₂	0,01	0,03	0,88	23,4	10,85	0,16	0,86	0,01	44,80

Fonte: Elaborado pelo autor

Entretanto, caso seja necessário é possível realizar as mesmas manobras de aumento de recuperação metalúrgica da Rota B. No caso, *by-pass* (desvio) do separador magnético de alto campo efetivando assim a somatória de massas do não magnético de alto campo e o concentrado final de TiO₂. Portanto, dessa forma a última etapa do processo de beneficiamento (separação de alto campo), continuará presente. Sendo ativada caso necessite de controles de contaminantes ou caso rejeitos de baixo teor de TiO₂ sejam fornecidos na alimentação inicial da rota. Tal ativação aumentaria assim o nível de stress do processo de beneficiamento mineral. Portanto, podemos ter os seguintes materiais na Rota F1:

- Com Separação Magnética de Alto Campo (Foco Qualidade) – Concentrado: Teor de TiO₂ 44,80%, Recuperação Metalúrgica de TiO₂ 21,82% e Recuperação Mássica 4,43%
- Sem Separação Magnética de Alto Campo (Foco Recuperação) - Concentrado: Teor de TiO₂ 44,54%, Recuperação Metalúrgica de TiO₂ 47,83% e Recuperação Mássica 9,78%

Já analisando os resultados da rota F2 podemos observar que os mesmos se apresentaram bastante positivos, segue os resultados obtidos na Tabela 26.

Tabela 26 - Balanço de massa de fluxos de rejeito e concentrado da rota F2

ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Magnético (LIMS)	24,45%	4,98	13,50%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Lama Escrubagem	10,22%	4,09	4,63%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Conc. SiO ₂	13,26%	4,64	6,82%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Lama Flotação SiO ₂	0,10%	7,4	0,08%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Rej. TiO ₂	32,86%	1,2	4,37%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
MIDD 1	4,94%	13,31	7,28%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Ñ Magnético (HIMS)	6,90%	40,15	30,70%
ID Amostra	Recuperação Mássica	TiO ₂	Recuperação Metalúrgica de TiO ₂
Conc. TiO ₂	7,28%	40,39	32,61%
		TiO ₂ Alimentação do Teste (Recalculado)	
		9,02%	

Fonte: Elaborado pelo autor

Na rota F2 podemos observar uma maior recuperação metalúrgica de TiO₂ apresentado pelo concentrado final comparativamente a rota F1. Em específico, os resultados da Rota em questão foram 40,39% de teor de TiO₂, Recuperação Metalúrgica de TiO₂ 32,61% e Recuperação Mássica de 7,28%. Ademais, podemos notar que apesar do rejeito de não magnético de alto campo apresentar o teor similar ao do concentrado final este também apresenta um teor mais elevado de contaminantes (Al₂O₃, BaO, CaO, MgO, SiO₂ e P₂O₅) (Tabela 27).

Tabela 27 - Teores de TiO₂ e óxidos contaminantes no magnético e não magnético de alto campo (etapa final) da Rota F2

ID Amostra	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Ñ Magnético (HIMS)	0,28	0,23	2,76	20,90	10,80	0,64	2,41	0,21	40,15
Conc. De TiO ₂	0,01	0,07	1,09	26,23	9,75	0,25	1,09	0,01	40,39

Fonte: Elaborado pelo autor

No caso, observamos o mesmo comportamento dos estágios finais apresentados pela Rota B e Rota F1. Sendo assim, efetivando a somatória de massas do não magnético de alto campo e o concentrado final de TiO₂ considerando a ativação da última etapa do processo de beneficiamento circunstancial é possível obter os seguintes resultados:

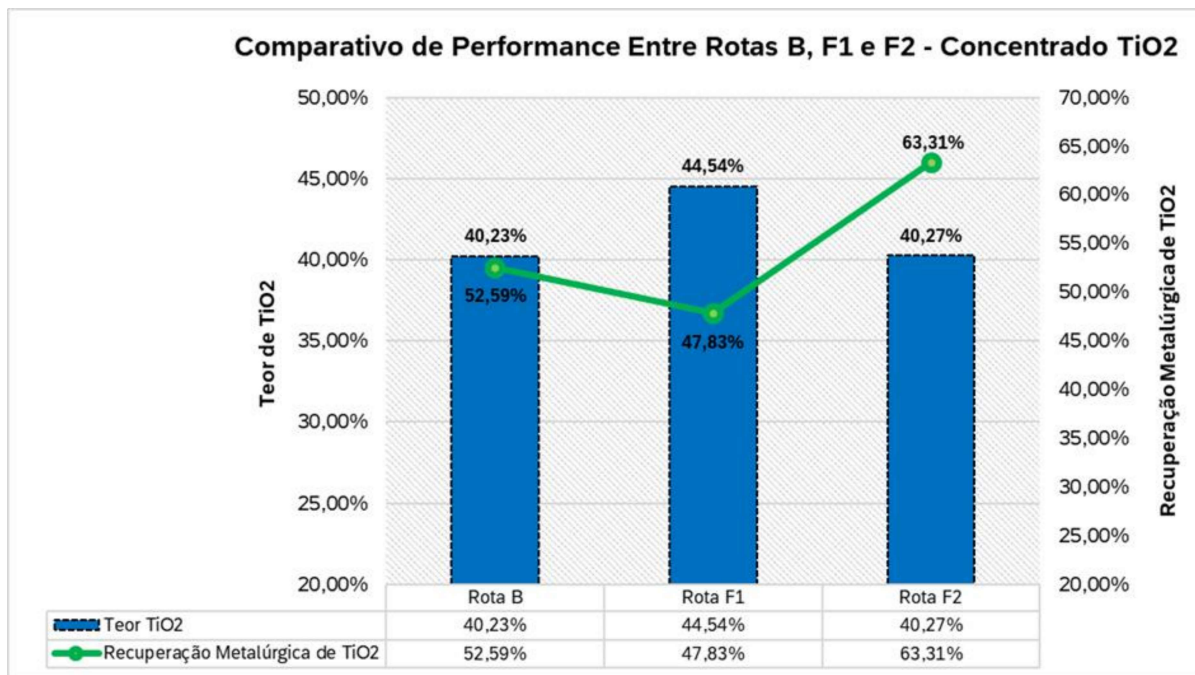
- Com Separação Magnética de Alto Campo (Foco Qualidade) – Concentrado: Teor de TiO₂ 40,39%, Recuperação Metalúrgica de TiO₂ 32,61% e Recuperação Mássica 7,28%
- Sem Separação Magnética de Alto Campo (Foco Recuperação) - Concentrado: Teor de TiO₂ 40,27%, Recuperação Metalúrgica de TiO₂ 63,31% e Recuperação Mássica 14,18%

7.1.1 Comparativo de Rotas – Concentração de TiO₂

Com os resultados em questão obtidos, podemos realizar um comparativo entre a performance das rotas apresentadas. Em todos os cenários de rota apresentados no teste II apresentou-se interessante manter a etapa final de enriquecimento. Seja esta a adição de mais uma etapa de flotação *cleaner* (Rota B) ou a separação magnética de alto campo (rotas F1 e F2) como uma etapa auxiliar em momentos de stress ou controle de contaminantes. Devido a esses resultados, com base nas especificações e valores de concentrado de TiO₂ no mercado global a proposta mais sensata para uma produção a nível industrial investigada neste

estudo seria a adoção da estratégia de maior recuperação metalúrgica para este cenário do teste II. Sendo assim, realizamos um comparativo entre os resultados obtidos pelas rotas no cenário de maior recuperação metalúrgica. O comparativo destes resultados é apresentado na Figura 54.

Figura 54 - Comparativo de concentrados produzido pelas rotas B, F1 e F2



Fonte: Elaborado pelo autor

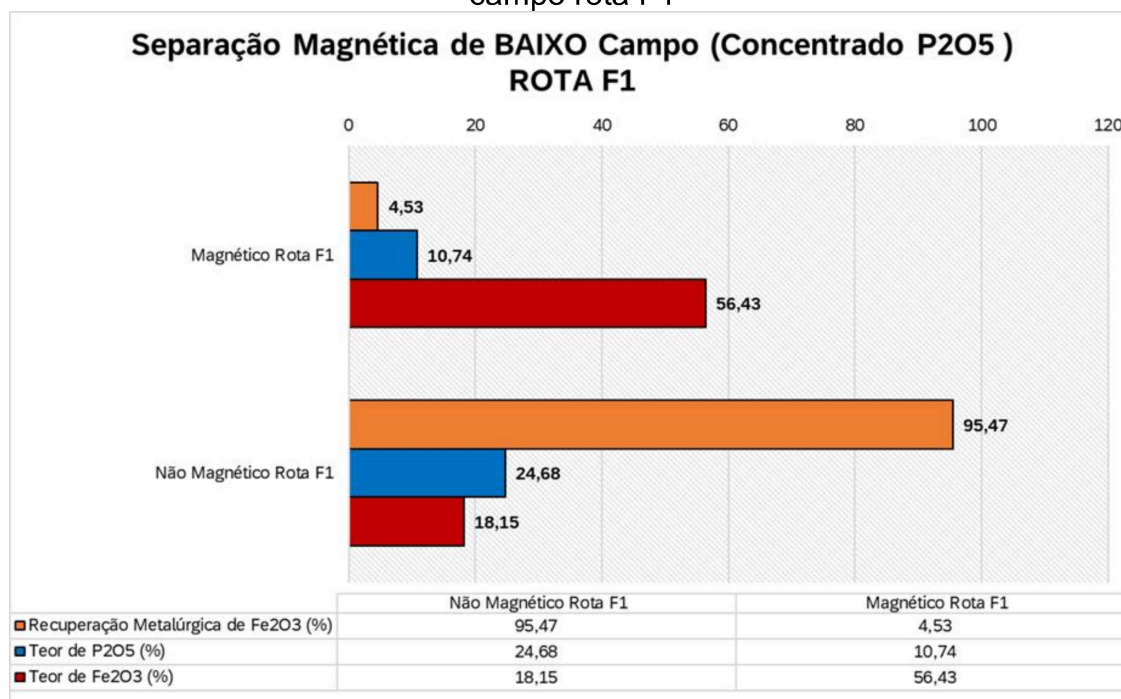
Nesta Figura 54, podemos notar que a rota B e F2 apresentam teores de concentrado final equivalentes (40,23% e 40,27%), contudo, a recuperação metalúrgica da rota F2 é significativamente superior a Rota B em 10,72%. Sendo assim, para a obtenção de um concentrado ilmenítico a rota F2 apresenta-se superior a Rota B.

Agora realizando o comparativo dos resultados obtidos na rota F2 e a rota F1, podemos notar uma maior recuperação metalúrgica de TiO₂ da rota F2 em compensação de um menor teor de TiO₂ no concentrado em comparação a rota F1. Em suma, a rota F1 apresenta um teor 4,27% superior e uma recuperação metalúrgica 15,48% inferior em comparação a Rota F2. Com base nesses valores para uma estratégia mais industrial focada em maiores recuperações metalúrgicas de TiO₂ a rota F2 apresenta-se inicialmente mais favorável.

7.2 RESULTADOS OBTIDOS – CONCENTRAÇÃO DE P₂O₅

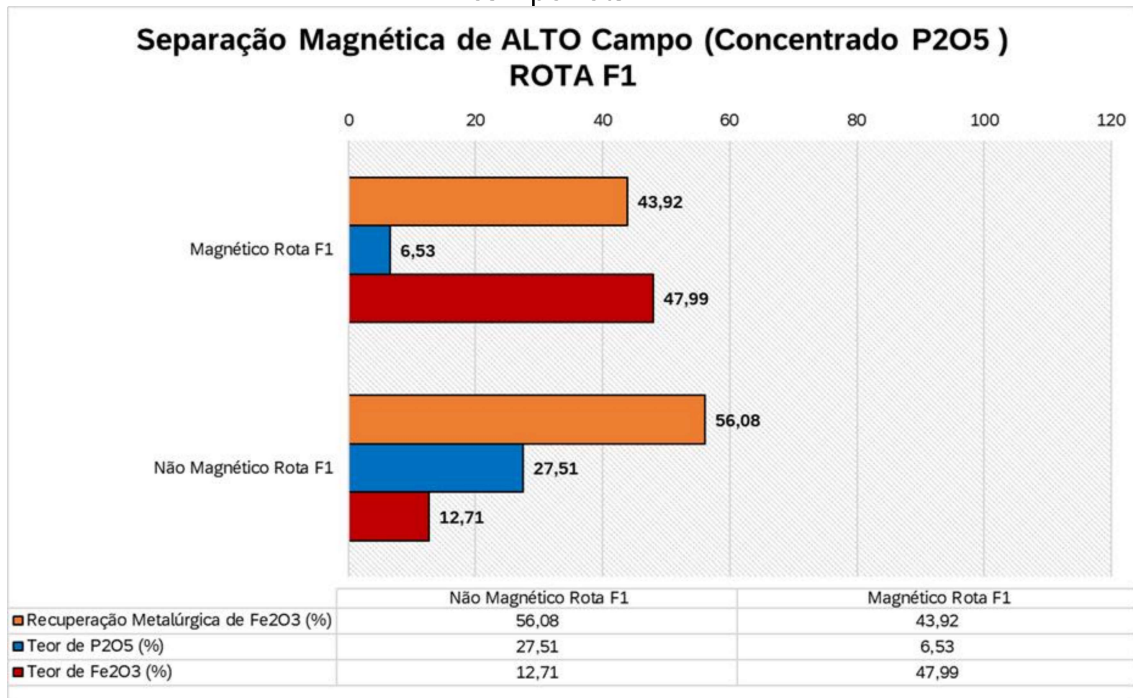
Neste estudo, o próximo passo consiste na análise dos resultados obtidos das rotas B, F1 e F2 na produção de concentrado apatítico oriundo do rejeito da flotação de TiO₂. Sendo assim, primeiramente iremos analisar os resultados providos pela realização da separação magnética de baixa e de alta ao rejeito da flotação de TiO₂ (Concentrado Apatítico). Em específico, se as separações foram capazes de reduzir o teor de Fe₂O₃ presente e qual das duas apresentaram-se mais efetivas para a redução do contaminante em questão (Fe₂O₃). Os resultados da separação magnética realizada no concentrado apatítico da rota F1 apresenta-se na Figura 55 e 56.

Figura 55 - Resultados de remoção de Fe₂O₃ e concentração de P₂O₅ em baixo campo rota F1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 56 - Resultados de remoção de Fe₂O₃ e concentração de P₂O₅ em alto campo rota F1



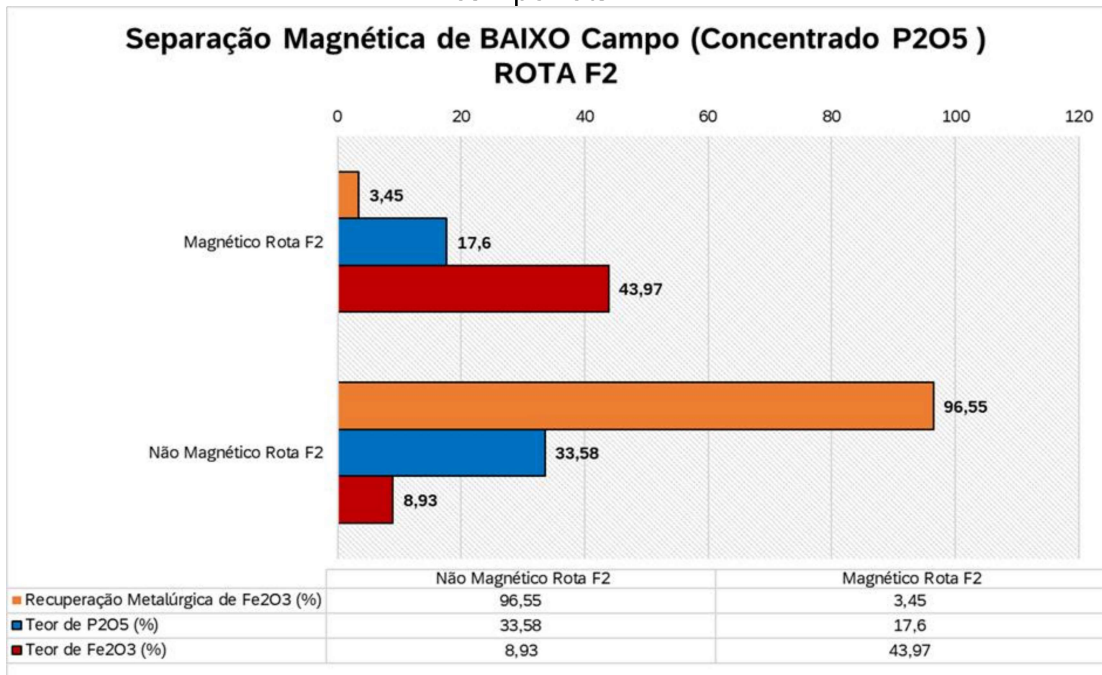
Fonte: Elaborado pelo autor

Nos resultados apresentados no baixo campo, o concentrado não magnético (produto final apatítico) apresentou o teor de 24,68% de P₂O₅ contra 27,51% do alto campo. Em específico, a maior diferença dos teores é representada pelo Fe₂O₃ com teores de 18,15% e 12,71% no concentrado para o baixo e alto campo respectivamente. No mais, é justificável este resultado quando notamos que a separação de baixa foi capaz de promover uma baixa remoção metalúrgica de Fe₂O₃ (4,53%) quando comparada ao alto campo (43,92%). Portanto, os resultados apresentados demonstram que a separação magnética de alta foi mais eficiente na obtenção de um concentrado apatítico de menor contaminação de Fe₂O₃.

Entretanto, podemos notar que o teor de concentrado se apresentou ainda abaixo de 30% de P₂O₅ valor este aconselhável para o processo químico industrial da empresa em foco nesta dissertação.

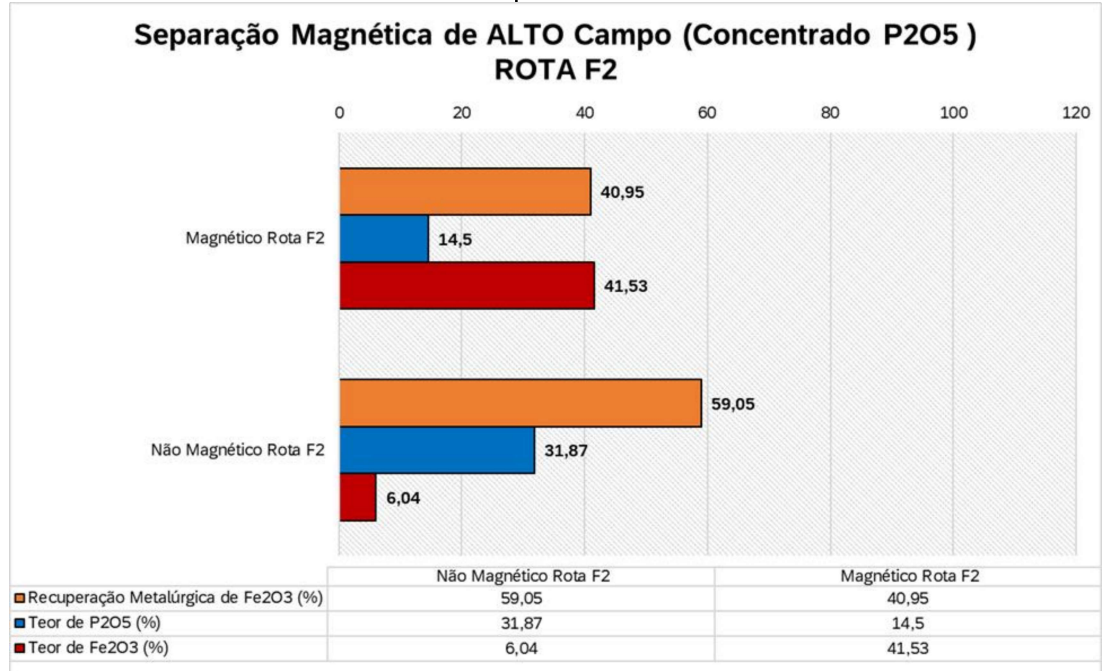
Agora analisando os resultados de concentrado apatítico do ensaio na rota F2, obteve-se os resultados demonstrados na Figura 57 e 58.

Figura 57 - Resultados de remoção de Fe_2O_3 e concentração de P_2O_5 em baixo campo rota F2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 58 - Resultados de remoção de Fe_2O_3 e concentração de P_2O_5 em alto campo rota F2



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados apresentados pela rota F2, podemos notar que a separação magnética de baixa continua a apresentar um resultado de inferior performance. Especificamente, a separação magnética de baixo campo provê um concentrado apatítico de 8,93% de teor de Fe_2O_3 contra 6,04% apresentado pelo

alto campo, mais uma vez demonstrando a superioridade deste neste processo. Ademais, avaliando a remoção metalúrgica de Fe_2O_3 no processo temos que o baixo campo apresentou uma remoção de 3,45% contra 40,95% do alto campo.

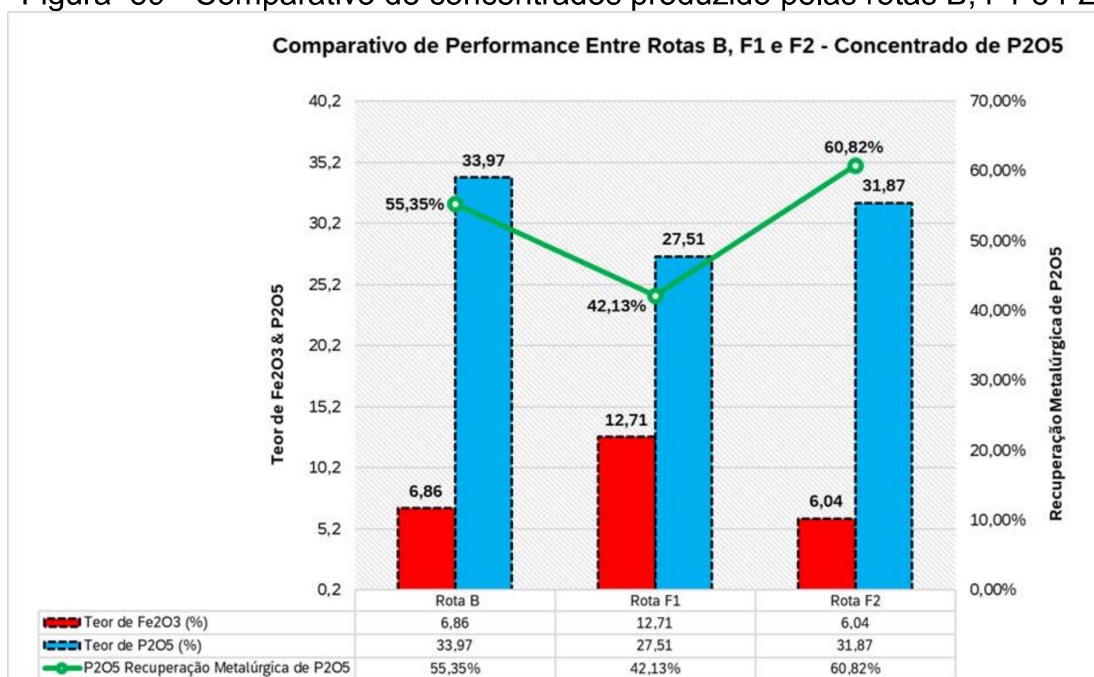
Possivelmente os melhores resultados apresentados pelo alto campo nas rotas F1 & F2 apresentam-se correlacionadas com a mineralogia do Fe_2O_3 contaminante. Neste caso, os teores contaminantes de Fe_2O_3 são provavelmente compostos por hematitas e goetitas como demonstrado anteriormente na assembleia mineralógica do material. Sendo estas, atraídas magneticamente somente em altas intensidades de campo magnético.

Em suma, podemos notar que na rota F2 com a separação de alto campo é possível produzir um concentrado de teor de P_2O_5 superior a 30% no caso 31,87%.

7.2.1 Comparativo de Rotas – Concentração de P_2O_5

Agora realizando o comparativo entre os produtos de concentrados finais de P_2O_5 (rejeitos da flotação de TiO_2) das rotas B, F1 e F2 (sendo F1 & F2 com separação magnética de alto campo), obteve-se os seguintes resultados:

Figura 59 - Comparativo de concentrados produzido pelas rotas B, F1 e F2



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos resultados apresentados, a Rota F2 apresentou a maior recuperação metalúrgica global de P_2O_5 com 60,82% contra 55,35% da rota B e 42,13% da rota F1. No mais, a rota F2 também apresentou os menores do contaminante Fe_2O_3 em seu concentrado com 6,04%, seguida da rota B com 6,86% e rota F1 com 12,71%.

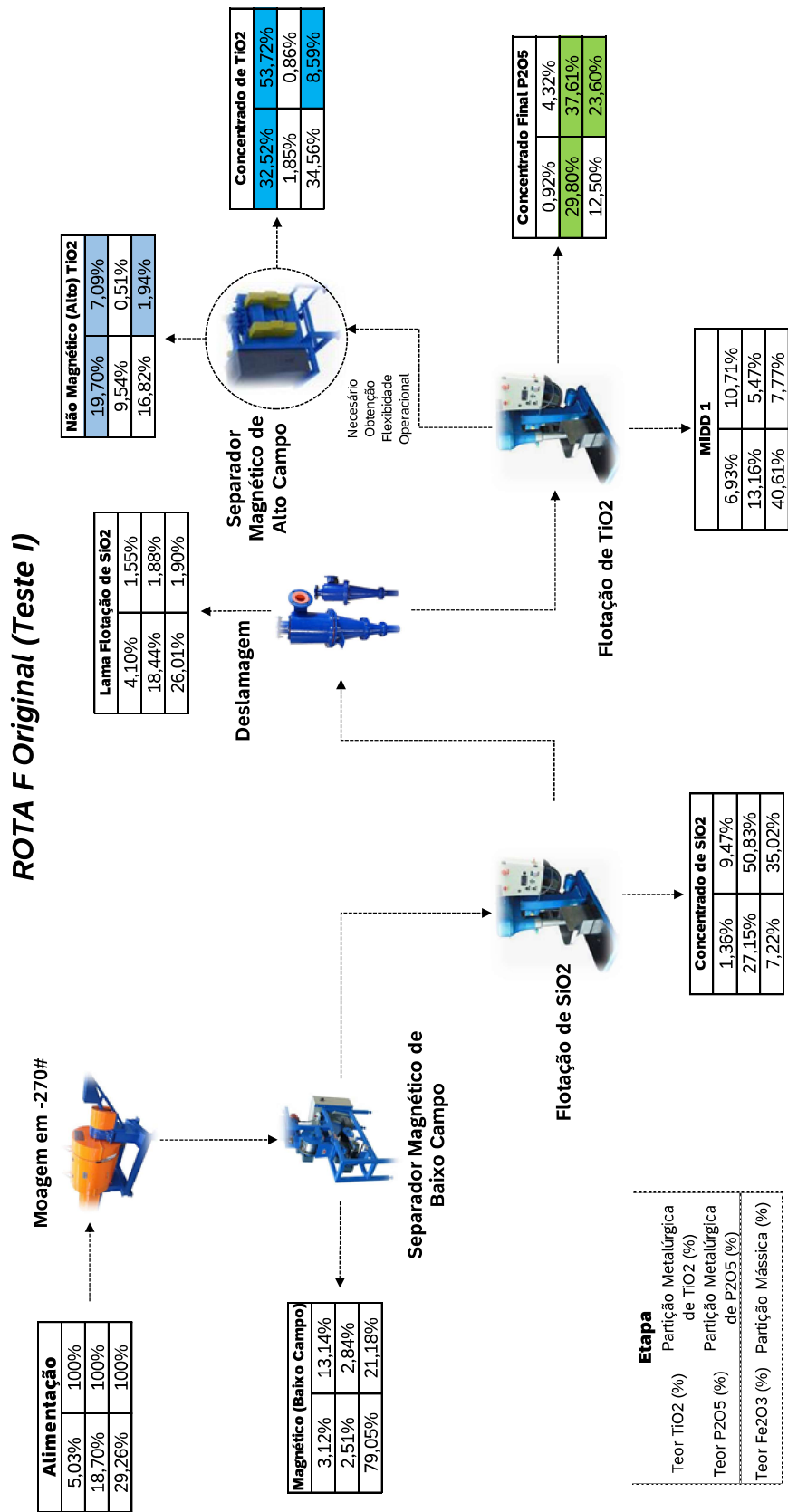
Entretanto, a rota F2 não foi capaz de obter o maior teor de P_2O_5 nos ensaios sendo a rota B com o melhor teor de concentração de 33,97%. Este elevado teor apresentado pela rota B deve-se em decorrência a reduções de demais contaminantes presentes com exceção do Fe_2O_3 . Contudo, a rota F2 apresenta-se destacada com um dos menores teores de Fe_2O_3 presentes e a maior recuperação metalúrgica entre os ensaios.

Podemos assim confirmar que a melhoria na rota F2 foi capaz de melhorar significativamente a performance na produção de concentrado apatítico e ilmenítico. Sendo assim, é possível afirmar que a alternativa de rota F2 é a mais viável para a produção de concentrados ilmeníticos e apatíticos.

8 BALANÇO DE MASSAS E ESPECIFICAÇÕES DE CONCENTRADOS (TiO₂ & P₂O₅)

Como observado entre as alternativas estudadas, a rota de beneficiamento mineral F2 foi definida como a mais capacitada para a produção de produtos finais de TiO₂ e P₂O₅. Em termos da parte química apresentada o balanço de massas da rota F (teste I – predecessor da rota F2) e da rota F2 (teste II) será apresentada, para melhor compreensão do fluxo do processo de beneficiamento (Figura 60 e 61).

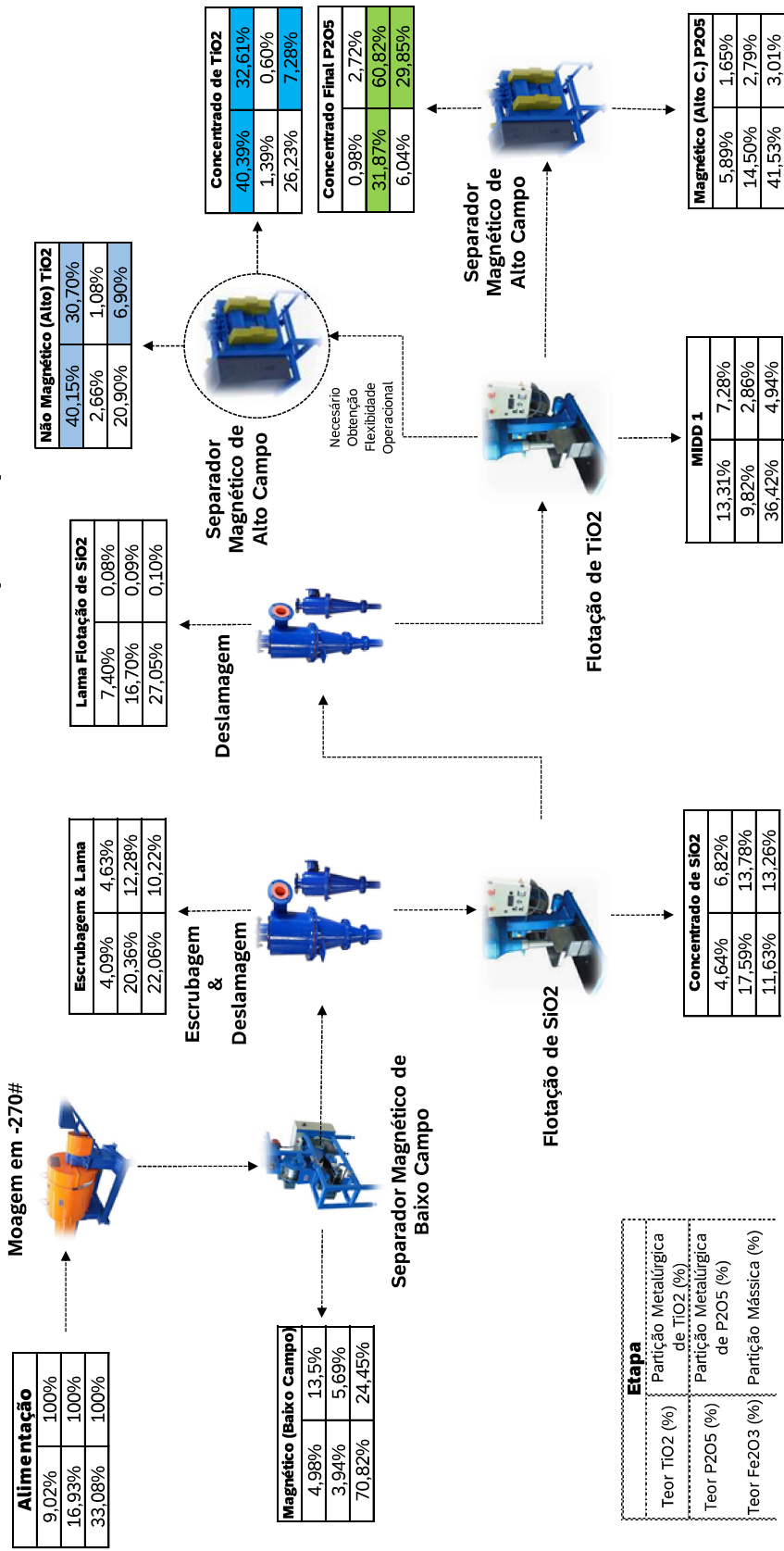
Figura 60 - Balanço de massa global dos principais compostos de interesse (TiO₂, P₂O₅ e Fe₂O₃) da rota F original (Teste I)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 61 - Balanço de massa global dos principais compostos de interesse (TiO₂, P₂O₅ e Fe₂O₃) da rota F2 (Teste II)

ROTA F2 - Rota F Melhorada (Teste II)



Fonte: Elaborado pelo autor

Devido ao Teste II sofrer uma alimentação mais elevada nos teores de TiO_2 , contudo, dentro dos limites operacionais normais da usina. Realizando uma análise conservadora podemos considerar a especificação e performance de produção do concentrado de TiO_2 entre os resultados da Rota F (original) e a Rota F2. Mesmo com o entendimento que a rota F2 apresenta-se com performance superior que a rota F em produção de concentrado apatítico e concentrado ilmenítico. Sendo assim, com os resultados apresentados podemos definir a especificação e performance de produção de concentrado de ilmenita na Tabela 28 e 29.

Tabela 28 - Especificação de concentrado de ilmenita

	TiO_2	Al_2O_3	BaO	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO_2	Nb_2O_5	P	P_2O_5	PbO	S	SiO_2	SrO	Ta_2O_5	ThO_2
Mínimo	32,52	0,03	0,19	1,95	34,56	0,08	4,80	3,16	0,31	0,80	1,85	0,03	0,04	0,20	0,05	0,07	0,03
Máximo	40,27	0,14	0,15	1,90	23,64	0,02	10,26	3,05	0,44	0,74	1,73	0,03	0,03	0,11	0,06	0,12	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 29 - Performance de produção de concentrado de ilmenita

	Recuperação Mássica	Recuperação Metalúrgica Global de TiO_2
Mínimo	8,59%	53,72%
Máximo	14,18%	63,31%

Fonte: Elaborado pelo autor

De forma oposta, durante os testes I e II não houve variação significativa dos teores de P_2O_5 alimentados nos ensaios (Teste I – 18,70% & Teste II – 16,93% de P_2O_5). No mais, pela Rota F2 apresentar-se como a mais aconselhável devido aos melhores resultados anteriores apresentados para a produção de concentrados (P_2O_5 e TiO_2) iremos considerar a especificação e performance desta rota no teste II como a especificação e performance final do processo desenvolvido. Sendo assim, os valores de especificação e performance da mesma apresentam-se representados na Tabela 30 e Tabela 31 a seguir:

Tabela 30 - Especificação de concentrado apatítico

	P_2O_5	Al_2O_3	BaO	CaO	Fe_2O_3	MgO	MnO_2	Nb_2O_5	PbO	SiO_2	SrO	ThO_2	TiO_2	U_3O_8
Média	31,87	1,62	1,56	42,15	6,04	0,01	0,27	0,09	0,01	0,32	2,10	0,02	0,98	0,07

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 31 - Performance de produção de concentrado apatítico

	Recuperação Mássica	Recuperação Metalúrgica Global de P2O5
Média	29,85%	60,82%

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, em termos de granulometria a especificação do novo material gerado pode ser descrito como a seguinte. A granulometria apresentada pelo material de concentrado de titânio foi de cerca de 63% a 69% passante na faixa de e 400 Mesh sendo assim classificada como no mínimo um material ultrafino de acordo com o artigo “Classificação granulométrica de materiais particulados” de Machado et al em 2015 (Tabela 32).

Tabela 32 – Classificação granulométrica de produtos

Classificação	Tamanho de Partícula (Mesh)	Exemplos de Produtos
Grosso	4-16 Mesh	Areia, grânulos de carvão ativado
Médio	16-60 Mesh	Farinha, açúcar granulado
Fino	60-200 Mesh	Farinha de trigo, açúcar de confeitiro
Muito Fino	200-400 Mesh	Pós para bebidas, farinha de arroz
Ultrafino	400-1000 Mesh	Carbonato de cálcio, pigmentos, amido de milho

Fonte: (Machado et al, 2015)

9 ENSAIOS DE HIDROMETALÚRGICOS PARA A PRODUÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO (PIGMENTO DE TiO₂)

Adicionalmente, durante os estudos apresentados anteriormente testes hidrometalúrgicos foram realizados com amostras resultantes de rotas não otimizadas durante o desenvolvimento da rota F. Destes testes, três amostras de produtos de TiO₂ de rotas não otimizadas foram usadas. Em específico, os testes em questão contemplaram ensaios de digestão, lixiviação, hidrólise, filtragens e calcinação. As amostras possuíam teores iniciais entre 14 a 20% de TiO₂.

Os testes foram executados nas amostras em questão devido a restrições de tempo de desenvolvimento e recursos, o que exigiu a realização concomitante dos testes de hidrometalurgia e de beneficiamento. Consequentemente, não foi possível a execução dos testes hidrometalúrgicos nos produtos ótimos obtidos pelos ensaios anteriores. Entretanto, os resultados apresentados fornecem indícios dos resultados que poderiam ser obtidos com os produtos ótimos.

No mais, posteriormente foram executados quatro ensaios com a amostra de melhor resultado e com refino da forma de execução do teste. Os resultados finais de TiO₂ e Nb₂O₅ variaram pouco, sendo de 76,5 a 78,9% e de 5,2 a 6,6%, respectivamente. Contudo, apesar do teor de TiO₂ interessante enriquecido as recuperações metalúrgicas apresentaram-se baixas entorno de 20%. No mais, os resultados obtidos no ensaio encontram-se na Tabela 33.

Tabela 33 - Resultados dos testes de hidrometalúrgia de produção de pigmento de titânio (TiO₂)

Teste	Alimentação					Produto Final (Precipitado)					Rec. Metalúrgica (Precipitado)					Enriquecimento TiO ₂
	Massa (g)	Nb ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (\$)	Massa (g)	Nb ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (\$)	Massa (g)	Nb ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (\$)	
Midd 4 U47	25,32	0,79	67,23	20,86	0,82	1,19	6,12	3,06	77,48	8,87	0,22	36,52	0,21	17,46	50,88	
Midd 4 U47	24,83	0,79	67,23	20,86	0,82	1,24	5,25	3,5	78,93	7,77	0,25	33,34	0,26	18,9	47,36	
Midd 4 U47	24,86	0,79	67,23	20,86	0,82	1,4	6,64	2,73	76,81	8,88	0,32	47,49	0,23	20,74	61,03	
Midd 4 U47	24,93	0,79	67,23	20,86	0,82	1,17	6,29	3,32	77,48	8,19	0,22	37,5	0,23	17,43	46,95	
Teste	Alimentação					Rejeito (Resíduo)					Rec. Metalúrgica (Resíduo)					
	Massa (g)	Nb ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (\$)	Massa (g)	Nb ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (\$)	Massa (g)	Nb ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (\$)	
Midd 4 U47	25,32	0,79	67,23	20,86	0,82	1,19	6,12	3,06	77,48	8,87	0,22	36,52	0,21	17,46	50,88	
Midd 4 U47	24,83	0,79	67,23	20,86	0,82	1,24	5,25	3,5	78,93	7,77	0,25	33,34	0,26	18,9	47,36	
Midd 4 U47	24,86	0,79	67,23	20,86	0,82	1,4	6,64	2,73	76,81	8,88	0,32	47,49	0,23	20,74	61,03	
Midd 4 U47	24,93	0,79	67,23	20,86	0,82	1,17	6,29	3,32	77,48	8,19	0,22	37,5	0,23	17,43	46,95	

Fonte: Elaborado pelo autor

Não se pode concluir algo mais concreto da rota hidrometalúrgica em questão pois reduzidas quantidades de ensaios foram realizados e não foram executadas nos produtos ótimos anteriores. Entretanto, é possível perceber um enriquecimento significativo nos teores de titânio em produtos com teores de alimentação relativamente baixos (20% de TiO_2) oriundos do rejeito MAC. Contudo, o teor alcançado não foi o suficiente para comercialização associado com uma baixa recuperação metalúrgica.

Ademais algumas melhorias podem ser executadas na rota como a mudança do papel filtro na etapa de filtração pois as partículas devido a sua fina granulometria necessitam de um papel adequado para a realização de uma filtração mais lenta, como sugestão o papel filtro azul (foi utilizado o papel filtro preto).

Em suma, mais estudos devem ser realizados afim da obtenção de uma rota de produto de concentrado de dióxido de titânio (pigmento) de altíssimo teor e alta recuperação. Não obstante, os testes preliminares indicam a possibilidade de produção de um dióxido de titânio (pigmento) de alto teor de TiO_2 com os produtos da rota F2 do rejeito de alto campo (MAC). Sendo assim, estudos futuros objetivando a criação de uma rota e a avaliação financeira na produção de um concentrado de altíssimo teor de titânio >80% podem ser viáveis e de excelente retorno financeiro.

Entretanto, apesar do pigmento prover um maior valor agregado, não é estritamente necessário a transformação do produto de concentrado ilmenítico de titânio em pigmentos de dióxido de titânio para a comercialização. Pois os resultados apresentados nos ensaios anteriores já são capazes de prover produtos de concentrados de titânio interessantes ao mercado. Sendo assim, a seguir será realizado uma análise da viabilidade financeira focado em uma possível produção de concentrado ilmenítico no rejeito presente.

10 AVALIAÇÃO FINANCEIRA DO ESTUDO

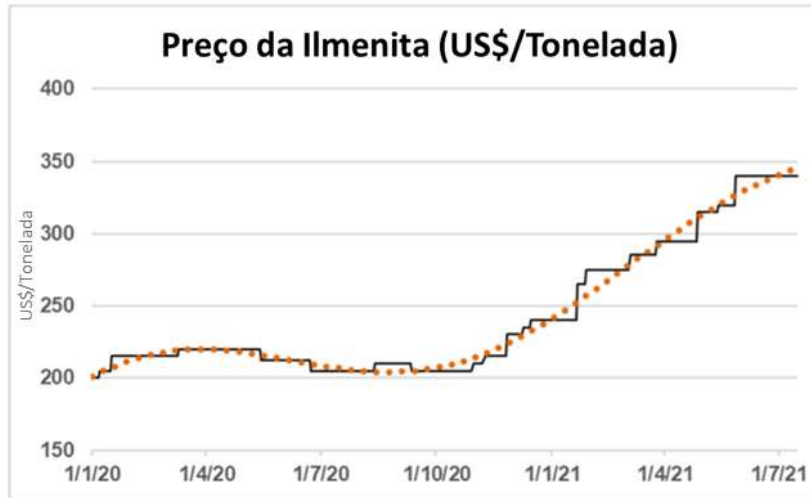
Com base nas performances e especificações obtidas nos ensaios anteriores, uma análise financeira foi conduzida afim de realizar uma avaliação preliminar dos retornos do estudo em questão para a empresa estudada nesta dissertação, resultados estes de uma possível produção. Em suma, esta análise terá o objetivo de se obter uma mensuração inicial dos retornos de uma rota implantada. Portanto, a mesma focará nos itens principais receita e lucro líquido obtido com a produção de concentrado titanífero e apatítico e pôr fim a redução de massa associada a deposição de rejeito MAC na Barragem do Burraco.

10.1 RECEITA DE CONCENTRADO ILMENÍTICO

Primeiramente, devemos ter em mente que os valores mais usuais encontrados de venda de concentrado ilmenítico no mercado internacional tange o teor de 47% a 54% de TiO_2 presente. De acordo com o site Consensus Economics de 2011 até 2020, temos os seguintes valores de cotação de concentrado ilmenítico no teor de 54% TiO_2 , FOB Austrália (Figura 62).

É possível observar uma variação significativa desde de 2013 até 2020. Especificamente, os valores do concentrado ilmenítico obtiveram uma variabilidade de 120 US\$/t até 300 US\$/t no longo prazo (FOB Austrália). Atualmente, os valores comerciais mais atualizados encontrados acerca do concentrado ilmenítico são oriundos da empresa Image Resources a 80 km da cidade de Perth/ WA (Austrália). A mesma em seu relatório provê os seguintes valores de concentrado ilmenítico:

Figura 62 - Preço de concentrado ilmenítico FOB Austrália pela Image Resources 2020-2021



Fonte: (IMAGE RESOURCES, 2021)

As informações apresentadas por ambas as fontes indicam valores similares do preço de concentrado no começo do ano de 2020. Ademais, podemos perceber que no relatório da Image Resources ao qual é mais recente, ocorre um aumento considerável dos preços de concentrado no ano de 2021 atingindo o valor próximo de 350 US\$/t.

Contudo, nos testes realizados e conduzindo o estudo de forma conservadora como mencionado devemos entender que o teor de concentrado de ilmenita gerado pelo estudo não será entorno de 47% a 54% de TiO_2 mas aproximadamente 32,52% ou seja os valores de concentrado serão menores aos apresentados. No mercado internacional, foi possível identificar empresas as quais realizam a comercialização de concentrados ilmeníticos em especificações próximas. Uma destas empresas é a URAL SPECS SPLAV a qual realiza a comercialização do produto FERROTITANIUM 30 ao qual possui de 20% a 35% de Ti. Realizando a conversão de elemento titânio (Ti) para seu óxido pelo peso da molécula (multiplicação do fator de 1,668). Os teores comercializados são de 33,36% a 58,38% de TiO_2 , valores estes próximos as especificações de TiO_2 do estudo. Segue abaixo as especificações dos produtos comercializados pela mesma (Tabela 34).

Tabela 34 - Especificação de produtos de concentrados de ilmenita vendidos pela URAL SPETS SPLAV em 2022

Produto	Fração Mássica (%)							
	Ti	Al	Si	Mn	C	P	S	V
	Não mais que:							
FeTi30Al6	20,0-35,0	6,0	4,0	--	0,15	0,10	0,06	--
FeTi30Al10	20,0-35,0	10,0	8,0	--	0,20	0,10	0,07	--
FeTi40Al6	35,0-50,0	6,0	4,5	1,50	0,10	0,10	0,05	--
FeTi40Al8	35,0-50,0	8,0	5,0	1,50	0,10	0,05	0,05	--
FeTi40Al10	35,0-50,0	10,0	8,0	1,50	0,20	0,10	0,07	--

Fonte: (RUSSIAN METALLURGICAL COMPANY URALSPETSSPLAV LTDA. , 2022)

Outra empresa a qual realiza a comercialização de concentrado ilmenítico de menor teor é a Mineral Commodities LTD, mercantilizando o produto concentrado de ilmenítico com teores de 18% a 25% com as especificações abaixo (Tabela 35).

Tabela 35 - Especificação de concentrado de ilmenita vendido pela Mineral Commodities LTD

Análise Química Típica	
TiO ₂	18 – 25%
Fe(t) como Fe ₂ O ₃	48,3%
Al ₂ O ₃	2 – 4%
Cr ₂ O ₃	0,15%
P ₂ O ₅	0,2%
V ₂ O ₅	0,2%
MnO	1 – 2%
MgO	1 – 2%
SiO ₂	7 – 11%
Nb ₂ O ₅	0,05%
S	<0,01%
CaO	<1%
U + Th	340 ppm
CeO ₂	<0,1%

Fonte: (MINERAL COMMODITIES LTD.)

Portanto, podemos ver que a comercialização do teor de concentrado ilmenítico nos valores apresentados de 32,52% é possível. Entretanto, estas empresas apresentadas possuem suas operações fora do Brasil. Sendo assim, seus

valores de comercialização diferentes de um produto vendido no território brasileiro portanto de difícil realização de um bechmarking de valores.

Todavia, neste estudo recorreremos as informações da empresa no território nacional a qual realiza a comercialização de concentrado ilmenítico a Titânio Goiás. Como mencionado anteriormente a Titânio Goiás a qual possui operações em Goiás, Minas Gerais, Bahia e Pernambuco, realiza a venda de produtos de concentrado de ilmenita variando de teores de 18,05% a até 24,16% de TiO₂ na carteira de produtos, a especificações destes produtos apresenta-se mais detalhada na Tabela 36 a seguir.

Tabela 36 - Especificação de produtos de titânio comercializados pela Titânio Goiás

Dados Químicos	Sta. Bárbara (GO) T.M.	Israelândia (GO) T.M.	Tancredo Neves (BA) T.M.	Floresta (PE) T.M	Itabira (MG) T.M
TiO ₂	20,00	18,05	22,75	24,16	20,10
Fe	42,54	52,62	44,63	37,63	51,70
MgO	0,71	0,37	0,27	2,46	0,30
CaO	0,03	0,35	0,10	0,43	<0,01
SiO ₂	1,76	1,71	10,74	10,43	1,79
Al ₂ O ₃	6,69	2,56	2,69	1,76	2,89
Na ₂ O	0,74	0,58	0,61	0,25	<0,1
K ₂ O	0,03	0,09	0,09	0,13	<0,01
Mn	1,74	0,44	0,20	0,21	0,24
Cr	0,13	0,003	0,002	0,107	<0,01
Zn	0,072	0,001	0,001	0,023	0,036
P ₂ O ₅	0,018	0,290	0,180	0,051	0,010
S	0,029	0,203	0,094	0,116	0,032
Sn	0,001	0,006	0,001	0,001	0,370

Fonte: (TITÂNIO GOIÁS, 2021)

Realizando uma cotação dos valores comercializados pelos produtos da Titânio Goiás a relação dos valores de seus produtos encontram-se abaixo (Tabela 37).

Tabela 37 - Valores de comercialização de produtos da Titânio Goiás em Out/2021

Mina de Santa Bárbara Bitolado >5<50

Quantidade Comprada (Mensal)	Mínima de Seis Meses	Preço Para Pedido "Spot"
500 – 2000 Toneladas	\$8,95	\$10,74
2000 – 4000 Toneladas	\$8,14	\$9,77
Mais de 4000 Toneladas	\$7,40	\$8,88

Mina Itabira (Pedido Mínimo de 15.000 Toneladas Entrega em 3 Meses)

Quantidade Comprada (Mensal)	Mínima de Seis Meses	Preço Para Pedido “Spot”
500 – 2000 Toneladas	\$12,54	\$15,04
2000 – 4000 Toneladas	\$11,40	\$13,68
Mais de 4000 Toneladas	\$10,36	\$12,43

Todos os preços são em dólar por ponto percentual de TiO₂ (Sem Impostos)

Fonte: (TITÂNIO GOIÁS, 2021)

Nas cotações providas, o preço do produto é relacionado por dólares americanos por ponto percentual de TiO₂ (Freight on Board - FOB). Sendo assim, seguindo a premissa conservadora trabalhada ao longo da estimativa de retornos e ganhos do estudo, a análise será conduzida com o menor valor presente na tabela ou seja US\$ 7,40 por ponto percentual de TiO₂. Portanto, no teor de 32,52% estimado teremos a cotação de US\$ 240,62 por tonelada. Valores estes não muito distantes aos mencionados pelo relatório da Image Resources no ano de 2021 em US\$ 340,00 por tonelada, considerando uma proporcionalidade a teores mais baixos do estudo (32,52% em comparação a 54%).

Em suma, de acordo com os cálculos realizados e com o valor do dólar americano em R\$ 5,34, estima-se que a receita total da iniciativa de produção e comercialização de concentrado titanífero a partir do rejeito do alto campo das usinas 47 & 76 seria algo entorno de R\$ 18.993.799,04.

10.2 RECEITA DE CONCENTRADO APATÍTICO

Para o cálculo de receita estimado com a produção de concentrado apatítico no ano de 2021 foi considerado a performance e especificações da rota F2 para tais estimativas. A definição da performance da rota F2 como referência, foi estabelecida nesta análise financeira devido aos teores de alimentação de P_2O_5 do teste II apresentarem-se coerentes o teor médio de alimentação do estudo. Outro fator principal é de a rota F2 ser a rota otimizada para a produção de concentrado apatítico e ilmenítico.

No mais, devido a mineradora deste estudo realizar o uso de concentrado apatítico como matéria prima para os demais itens de sua cadeia produtiva (superfosfato simples, superfosfato triplo, ácido fosfórico, fosfato bicálcio entre outros), a provável utilização do produto gerado seria como sugestão um insumo para a própria cadeia produtiva da empresa. Em outras palavras, nesse o produto desta iniciativa seria utilizado como matéria prima para a produção da planta química da empresa presente em Catalão - GO. Adicionalmente, a qualidade do produto gerado já apresenta uma especificação interessante para o uso como insumo pela própria cadeia produtiva da mineradora (P_2O_5 31,87%).

Sendo assim, para o cálculo de receita com o concentrado apatítico o valor atual por tonelada foi considerado, este com base no valor de mercado por tonelada atribuído pela empresa.

Sendo assim, considerando este valor por tonelada de concentrado apatítico a iniciativa de produção deste produto pelo estudo seria capaz de entregar uma receita de R\$ 33.661.052,19 no ano de 2021.

10.3 CUSTOS OPERACIONAIS ASSOCIADOS NA PRODUÇÃO DOS CONCENTRADOS

De forma exploratória, foi realizado uma estimativa de custos operacionais para a produção dos concentrados para avaliação do lucro líquido do estudo. Para a realização desta estimativa foi considerado o mesmo custo de produção da mineradora por tonelada de concentrado apatítico produzido. Em específico, este valor inclui toda a cadeia produtiva de processamento até o estágio final, ou seja, atividades de geologia, lavra, britagem e beneficiamento. No mais, ressaltando que este valor de custo é apenas uma estimativa podendo sofrer modificações em uma análise mais profunda de recursos necessários para a operacionalidade da rota.

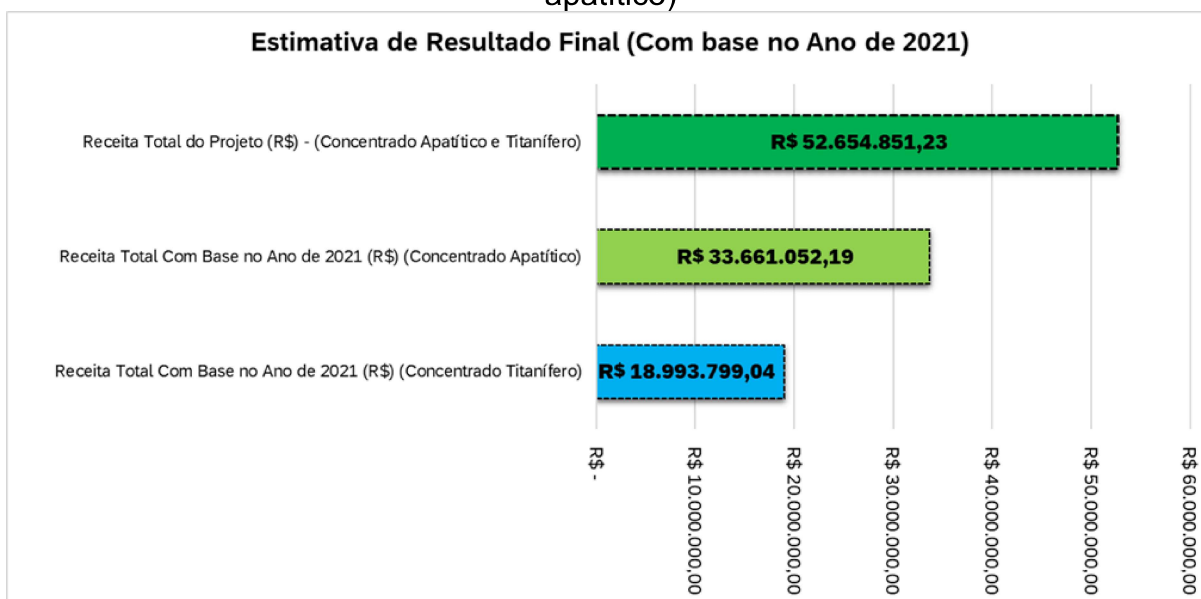
Ademais, devido a separação de concentrado apatítico e titanífero ser realizado somente em uma das últimas etapas do processo o custo de produção é compartilhado por ambos os concentrados. Em outras palavras, o custo associado na produção de concentrado apatítico resultará no custo como um todo do processo (produção de concentrado apatítico & titanífero).

Portanto, segundo os valores estimados o custo total de operação da rota em questão para a produção de concentrado apatítico & titanífero seria de R\$ 12.369.280,38.

10.4 RECEITA TOTAL

Com base nos valores demonstrados anteriormente, a somatória dos resultados obtidos por ambas as iniciativas apresentadas seria capaz de obter uma receita total da utilização da rota seria no valor de R\$ 52.654.851,23 com base nos dados do ano de 2021. Abaixo é apresentado um gráfico contendo os valores considerados (Figura 63):

Figura 63 - Receita total do estudo (iniciativa de concentrado ilmenítico mais apatítico)



Fonte: Elaborado pelo autor

É importante mencionar que os valores de receita apresentados apresentam-se com um grau maior de acertividade em relação aos resultados de lucro líquido apresentados posteriormente neste estudo. Tal fato decorre do envolvimento de mais valores de premissas como o custo operacional (OPEX).

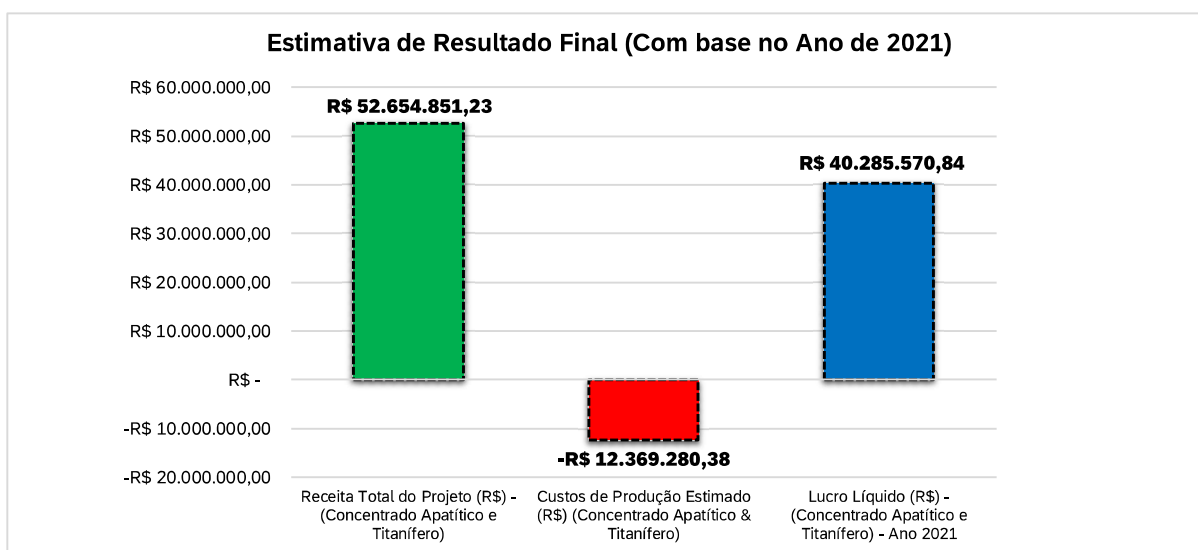
10.5 RESULTADO FINANCEIRO FINAL

No mais, considerado a receita da implantação da rota no valor de R\$ 52.654.851,23 e o custo operacional estimado de R\$ 12.369.280,38 seria possível a obtenção de um lucro líquido de R\$ 40.285.570,84 estimado no ano de 2021 (Figura 64). Ademais, é importante mencionar que este valor de lucro líquido apresentado é com base em estimativas de custo operacionais de produção da empresa. Custos estes bastante agressivos, incluindo não só a atividade de beneficiamento das usinas 47 & 76 mas custos de lavra e britagem atividades já realizadas para o beneficiamento de fosfato nas usinas de fosfato.

Figura 64 - Estimativa de resultado final da utilização da rota considerando a operação durante o ano de 2021

Estimativa de Resultado Final (Com base no Ano de 2021)

Receita Total do Projeto (R\$) - (Concentrado Apatítico e Titanífero)	R\$ 52.654.851,23
Custos de Produção Estimado (R\$) (Concentrado Apatítico & Titanífero)	-R\$ 12.369.280,38
Lucro Líquido (R\$) - (Concentrado Apatítico e Titanífero) - Ano 2021	R\$ 40.285.570,84



Fonte: Elaborado pelo autor

10.6 REDUÇÃO DE GASTOS COM DEPOSIÇÃO DE REJEITO

Outro item ao qual deve ser considerado é a redução de custos associados com deposição de rejeitos do MAC (Magnético de Alto Campo). Caso o estudo venha a ser implantado parte da massa de rejeito será considerada como concentrado apatítico e ilmenítico sendo assim, essa massa não será mais descartada e sim reaproveitada.

Segundo os cálculos apresentados esse reaproveitamento ocasionaria com base no ano de 2021 uma redução de aproximadamente 70 mil toneladas de rejeito MAC anuais. Adicionalmente, devemos mencionar que tal redução por anual provê o aumento de vida útil da barragem e redução de gastos de deposição de rejeito na barragem da empresa. Infelizmente até o momento do estudo não foi possível realizar uma avaliação financeira dos ganhos associados na redução de geração de resíduos para a mineradora.

Além do ganho financeiro, tal ação de reaproveitamento de rejeitos age positivamente com a redução de impactos ambientais para a sociedade goiana.

11 ESTUDOS FUTUROS

A seguir será abordado algumas sugestões de trabalhos futuros em função de complementar o atual trabalho realizado.

11.1 APRIMORAMENTO DOS ENSAIOS HIDROMETALÚRGICOS

De forma a surgir o desenvolvimento de trabalhos futuros um dos principais abordados seria a execução dos ensaios hidrometalúrgicos com concentrados de titânio da rota F2. Tal fato decorre afim de se explorar a possibilidade de produção de um concentrado de dióxido de titânio (pigmento) com $\text{TiO}_2 > 80\%$ e com alta recuperação metalúrgica no processo. Mesmo sabendo que não é estritamente necessário a produção deste pigmento para comercialização devido a atual característica do concentrado de titânio produzido já ser interessante ao mercado. A produção do pimento de dióxido de titânio poderia trazer um maior valor agregado ao produto produzido e a sociedade.

11.2 TEORES DE FÓSFORO (P) NO CONCENTRADO ILMENÍTICO

Muitos dos usos metalúrgicos de concetrado titanífero apresentam-se a característica de alta restritividade em termos de contaminantes. Usualmente para concentrados titaníferos os contaminantes mais comuns de maior impacto avaliados são: alumínio (Al), sílica (si), carbono (C), fósforo (P) e enxofre (S).

Em específico, o concentrado de titânio gerado apresenta teores na faixa de 0,7% a 0,8% de fósforo (P) no produto final os quais são relativamente altos dependendo do uso do mesmo podendo restringir o produto para alguns mercados específicos. Entretanto, como mencionado há indústrias e utilizações que o teor de

fósforo provê baixo impacto e adicionalmente processos químicos de lixiviação podem remover satisfatoriamente o fósforo presente no produto. O estudo do impacto do fósforo presente neste produto em atividades comerciais seria um fato interessante a ser explorado.

11.3 AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE ELEMENTOS RADIOATIVOS (TÓRIO E URÂNIO)

Os minerais presentes na mina da empresa foco desta dissertação, apresentam um reduzido teor em partículas por milhão (ppms) dos elementos radioativos tório e urânio. Contudo, um processo de beneficiamento como apresentado pode acabar ocasionando um enriquecimento indesejado destes elementos radioativos durante a busca de um concentrado enriquecido de ilmenita. No atual estudo devido a imprecisão de equipamentos de medição e ausência de recursos não foi possível realizar uma quantificação precisa dos teores de elementos radiativos presentes no concentrado de titânio. Em específico, na realização de EDS e RFX não foi contemplado e nem seria preciso a medição de elementos ou óxidos radioativos.

Contudo, como visto anteriormente na análise mineralógica a presença inferida de monazita como outros fosfatos pode carrear elementos radiativos no material. Em específico, o mesmo mineralogicamente possui uma presença significativa do elemento tório em sua composição. Fato em questão pode sim elevar os níveis de radioatividade, também sugerido por Cordeiro em 2008 (RIBEIRO, 2008).

Adicionalmente, a ilmenita presente possui uma grande quantidade de exsoluções o que possivelmente também pode incorporar elementos radioativos em menor proporção. Sendo assim, é sugerido como estudo futuro avaliações de teores de elementos radioativos aos quais possam comprometer o processo de venda e transporte do concentrado ilmenítico produzido.

12 CONCLUSÃO

O presente estudo foi realizado com o foco na obtenção de concentrados de titânio e possivelmente de fosfato. Sendo assim, o objetivo proposto do estudo foi atingido realizando a produção de concentrados ilmeníticos e fosfáticos oriundos do rejeito magnético de alto campo das usinas de fosfato (MAC). Em específico, diversas análises químicas, granulométricas, mineralógicas e financeiras foram executadas durante todo este trabalho. Sendo assim, de forma breve e sucinta podemos elencar as seguintes conclusões das informações principais do mesmo:

- I. Entre os fluxos de rejeitos presentes nas plantas de fosfato o rejeito magnético de alto campo (MAC) apresenta-se como um dos melhores candidatos a um rejeito passível de recuperação de titânio.
- II. No rejeito magnético de alto campo (MAC), o óxido titânio tende-se a alocar na fração mais fina enquanto o óxido de fósforo aloca-se na fração grosseira do material.
- III. A perda de P_2O_5 presente no rejeito MAC possui uma origem relacionada a liberação mineral e eficiência de processo (equipamento) de separação.
- IV. O titânio presente no alto campo (MAC) possui sua origem ilmenítica com um grande número de exossoluções.
- V. O fósforo presente no alto campo (MAC) tem sua origem principal do mineral apatita e não de fosfatos secundários. Possibilitando assim sua recuperação e aproveitamento na cadeia produtiva da empresa estudada.
- VI. A rota F2 desenvolvida apresenta-se como a melhor rota para a produção de concentrados ilmeníticos e apatíticos.
- VII. Com a aplicação da rota F2 podemos objetivar a produção de teores de concentrado de ilmenita entorno de 32,52% de TiO_2 e concentrados apatíticos 31,87% de P_2O_5 .
- VIII. A análise financeira realizada aponta que a execução da rota proposta no ano de 2021 poderia gerar R\$ 52.654.851,23 de receita e R\$ 40.285.570,84 de lucro líquido na produção de ambos os concentrados (ilmenita e apatita).

IX. Estudos exploratórios de produção de concentrado de dióxido de titânio (pigmento), demonstram resultados positivos mas que necessitam de maior estudo para se concluir sobre algum potencial de produção de pigmento.

Sendo assim, de acordo com as informações levantadas e atingindo o objetivo proposto esse estudo pode trazer grandes benefícios financeiros a empresa foco de estudo desta dissertação e a sociedade goiana com a recuperação de rejeitos e produção de riquezas minerais.

13 BIBLIOGRAFIA

1. ALVES, W. **Fatores Determinantes Das Estratégias De Gestão Ambiental Da Indústria Millennium Inorganic Chemicals: Cristal Global**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PEP) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Abril 2013. 117-118.
2. BERGERON, T. M.; PREST, S. F. **Magnetic Separation of Ilmenite**. 3,935,094, 27 Janeiro 1976.
3. BRAGA, A.; FERREIRA, N. G.; ALVES CAIRO, C. A. **Obtenção de Titânio Metálico com Porosidade Controlada por Metalurgia do Pó**. Química Nova, São José dos Campos – SP, 28 Novembro 2006. 450.
4. BULATOVIC, S.; WYSLOUZIL, D. M. **Process development for treatment of complex perovskite, ilmenite and rutile ores**. Minerals Engineering - Elsevier Science Ltd., Ontario, 27 Agosto 1999. 1407-1417.
5. CETEM. **Desenvolvimento de Processos de Concentração de Minérios de Ferro por Flotação**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011.
6. CETEM. **Glossário de Termos Usados em Atividades Minerárias**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.
7. CETEM. **Manual de Britagem**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.
8. CETEM. **Recuperação de Recursos Minerais: Conceitos, Princípios e Fundamentos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
9. CETEM. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

10. CHEN, J., & LIU, L. (2011). **A novel process for titanium sand by magnetic separation and gravity concentration.** Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 32(2), 118-124.
11. CHINA TITANIUM PIPE FITTING MANUFACTURER. Titaniuminfogroup. **Site da Titanium Info Group**, 2020. Disponível em: <<https://www.titaniuminfogroup.com/what-is-titanium-dioxide.html>>. Acesso em: 26 Janeiro 2022.
12. CLARKE, W. **Global economic recovery spurs TiO₂ market growth.** Industrial Minerals, 2021. Disponível em: <[https://www.indmin.com/Article/4002862/TiO₂Zircon/Global-economic-recovery-spurs-TiO₂-market-growth.html?Print=true#:~:text=For%20titanium%20dioxide%20pigment%2C%20sulfite,tonne%20during%20the%20intervening%20period.>](https://www.indmin.com/Article/4002862/TiO2Zircon/Global-economic-recovery-spurs-TiO2-market-growth.html?Print=true#:~:text=For%20titanium%20dioxide%20pigment%2C%20sulfite,tonne%20during%20the%20intervening%20period.>)>. Acesso em: 25 Janeiro 2022.
13. CONSENSUS ECONOMICS. **Consensus Economics - Ilmenite.** Consensus Economics, 2022. Disponível em: <<https://www.consensuseconomics.com/>>. Acesso em: 25 Janeiro 2022.
14. DURSUN, S. M. et al. **The Effect of Phosphorus on the Quality of Titanium Dioxide Pigments Produced from Ilmenite Concentrate.** Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, v. 36, n. 3, p. 201-210, 2015. DOI: 10.1080/08827508.2014.934299.
15. GARNAR, T.; STANAWAY, K. J. **Titanium minerals. In: Industrial Minerals and Rocks.** 6ª Edição. ed. Colorado: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, 1987.
16. GOOGLE MAPS; **Mapa Relevo, Brasil, Goiás, 2023.** Disponível em: <<https://www.google.com/maps/search/sinonimo+inerente/@-18.1712495,-47.9045072,24249m/data=!3m1!1e3>> Acesso em: 11 abril 2023.

17. IMAGE RESOURCES. **Preliminary June 2021 Quarter Update Record HMC Production, Rising Commodity Prices.** Image Resources NL. Perth-WA, p. 2. 2021.
18. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** In: IBRAM, I. B. D. M.- **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** 1ª. ed. Brasília: IBRAM, 2016. Cap. 1, p. 11-14.
19. J MENDO CONSULTORIA. **Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.** Ministério de Minas e Energia - MME. [S.l.], p. 3-27. 2010.
20. KANG, J.; OKABE, T. H. **Removal of Iron from Titanium Ore through Selective Chlorination Using Magnesium Chloride.** The Mining and Materials Processing Institute of Japan, Tokyo, 25 Julho 2013. 1444-1445.
21. LACERDA, L. A. **Indústria mineral brasileira: produção, mercado e perspectivas.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2009.
22. LI, H., LIU, Y., SUN, W., & CAO, Y. (2017). **Flotation of titanium minerals from the Roseland anorthosite gabbro suite rock, Nelson County, Virginia.** Minerals, 7(2), 25.
23. LIGUORI IMBERNON, R. A.; BARROS DE OLIVEIRA, S. M.; G. FIGUEIREDO, A. M. **Concentração dos ETR nos Produtos de Alteração Intempérica do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I, GO.** Boletim de Geociências do Centro-Oeste, São Paulo, 1994. 25.
24. LUZ, A. B.; LINS, F. A. **Rochas & Minerais Industriais Usos e Especificações.** 2ª. ed. Rio de Janeiro - RJ: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), v. I, 2008.

25. LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. **Tratamento de Minérios**. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. **Tratamento de Minérios**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), v. I, 2010. Cap. 11, p. 465.
26. MACHADO, G. A. S.; VIEIRA, R. S.; SILVA, L. F. O.; CORRÊA, J. P. **Classificação granulométrica de materiais particulados**. Revista Engevista, v. 17, n. 3, p. 283-291, 2015.
27. MINERAL COMMODITIES LTD. **Mineral Commodities - Ilmenite Concentrate**. Site da Mineral Commodities Ltd. Disponível em: <<https://www.mineralcommodities.com/products-sales/mineral-sands/ilmenite-concentrate/>>. Acesso em: 31 Janeiro 2022.
28. MMSAITO CONSULTORIA E GEOLOGIA. **Relatório técnico de análise de informações de geologia, caracterização tecnológica e geometalúrgia - Pilha 9A**. MMSaito Consultoria e Geologia. [S.l.], p. 180. 2021.
29. MORAES, L. C.; SEER, H. J. **Recursos Minerais de Minas Gerais - Titânio**. Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais (CEFET-MG). Araxá - MG, p. 1-16. 2018.
30. MOTA, M. P. S.; SANTOS, A. C. **Embutimento de Amostras – Preparação de Seções Polidas - PNB.05.501.009- Instrução de Trabalho**. Ouvidor, Goiás, 2023.
31. MOTA, M. P. S.; SOUZA, P. A.; SANTOS, A. C. **Difração de Raios X – DRX - PNB.501.017 - Instrução de Trabalho**. Ouvidor, Goiás, 2023.
32. NASCIMENTO, A. F. D.; LÓPEZ, V. R. T. **Determinação de Elementos Químicos por Fluorescência de Raios – X - PCT.08.501.022- Instrução de Trabalho**. Ouvidor, Goiás, 2022.

33. POSTLE, M. et al. **Risk Management Options Analysis for Titanium Dioxide (TiO₂)**. Risk & Policy Analysts (RPA). Lodon, p. 3. 2018.
34. QIU, Y., ZHANG, L., GAO, S., & ZHANG, X. (2013). **Recovery of ilmenite and other heavy minerals from teri sands (red sands) of Tamil Nadu, India**. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 1(4), 208-216.
35. RIBEIRO, C. C. **Geologia, Geometalúrgia, Controles e Gênese dos Depósitos de Fósforo, Terras Raras e Titânio do Complexo Carbonatítico Catalão, Go**. Universidade de Brasília - Instituto de Geociências. Brasília - DF, p. 14, 263:264. 2008.
36. RIBEIRO, C. C.; CARVALHO, E. A.; NETO, Y. F. **Tratamento Matemático na Caracterização Tipológica de Minérios de Fosfatos**. Anais do Simpósio de Caracterização Tipológica de Minérios de Fosfatos, São Paulo, 1990. 59-82.
37. RUSSIAN METALLURGICAL COMPANY URALSPETSSPLAV LTDA.. Ural Spets Splav. **Site da Ural Spets Splav**, 2022. Disponível em: <<https://uralspecsplav.com/ferrotitanium-30/>>. Acesso em: 31 Janeiro 2022.
38. SILVA, C. B. et al. **Caracterização de solos desenvolvidos de arenito na região de Santana do Cariri-CE por difração de raios X**. Revista Brasileira de Geociências, v. 44, n. 3, p. 497-508, 2014.
39. SILVA, E. F.; BARBOSA, D. M.; FONSECA, R. F.; TAKAHASHI, F. N.; FERREIRA, J. C. **Análise mineralógica de materiais com aplicação da microscopia eletrônica de varredura**. REM - Revista Escola de Minas, v. 71, n. 3, p. 221-225, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0370-44672017710109>.

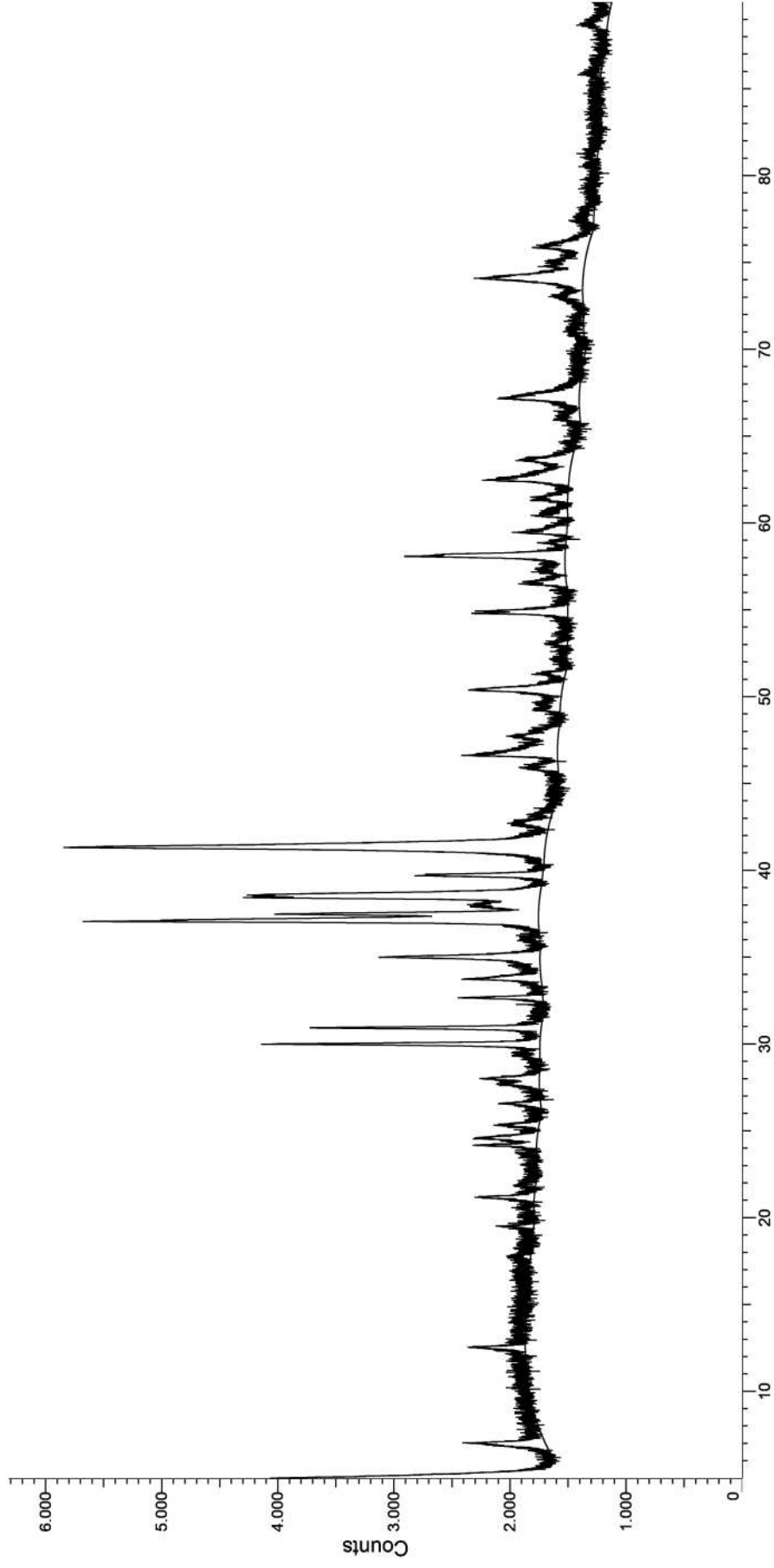
40. SOHN, H. Y.; FRAY, D. J. **Kinetics and Mechanism of Phosphorus Transfer from Iron-Phosphorus Alloy to Molten Copper**. Metallurgical and Materials Transactions B, v. 42, n. 3, p. 552-559, 2011. DOI: 10.1007/s11663-011-9473-3.
41. TESCAN. **Vega 3 - Microscópio Eletrônico de Varredura**. Disponível em: <https://dev.tescan.com/br/technology/sem/vega3>. Acesso em: 24 fev. 2023.
42. TITÂNIO GOIÁS. **Titânio Goiás - Minério de Ferro com Titânio**. Titânio Goiás, 2021. Disponível em: <http://www.titaniomineracao.com.br/produto1.aspx?p=20>. Acesso em: 2021 Outubro 17.
43. TITÂNIO GOIÁS. **Titânio Goiás - Titânio. Titânio Mineração**, Titânio Goiás, 2022. Disponível em: <http://www.titaniomineracao.com.br/>. Acesso em: 25 Janeiro 2022.
44. TODA MATÉRIA. **Titânio**. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/titanio/>. Acesso em: 26 fev. 2023.
45. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries 2023**. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2023.
46. ZHAI, J. et al. **A review of mineral processing of ilmenite by flotation**. Minerals Engineering, 17 Julho 2020. 3-6.

14 ANEXOS

14.1 ANEXO A – DIFRATOGRAMAS (DADOS PRIMÁRIOS E INTERPRETADOS)

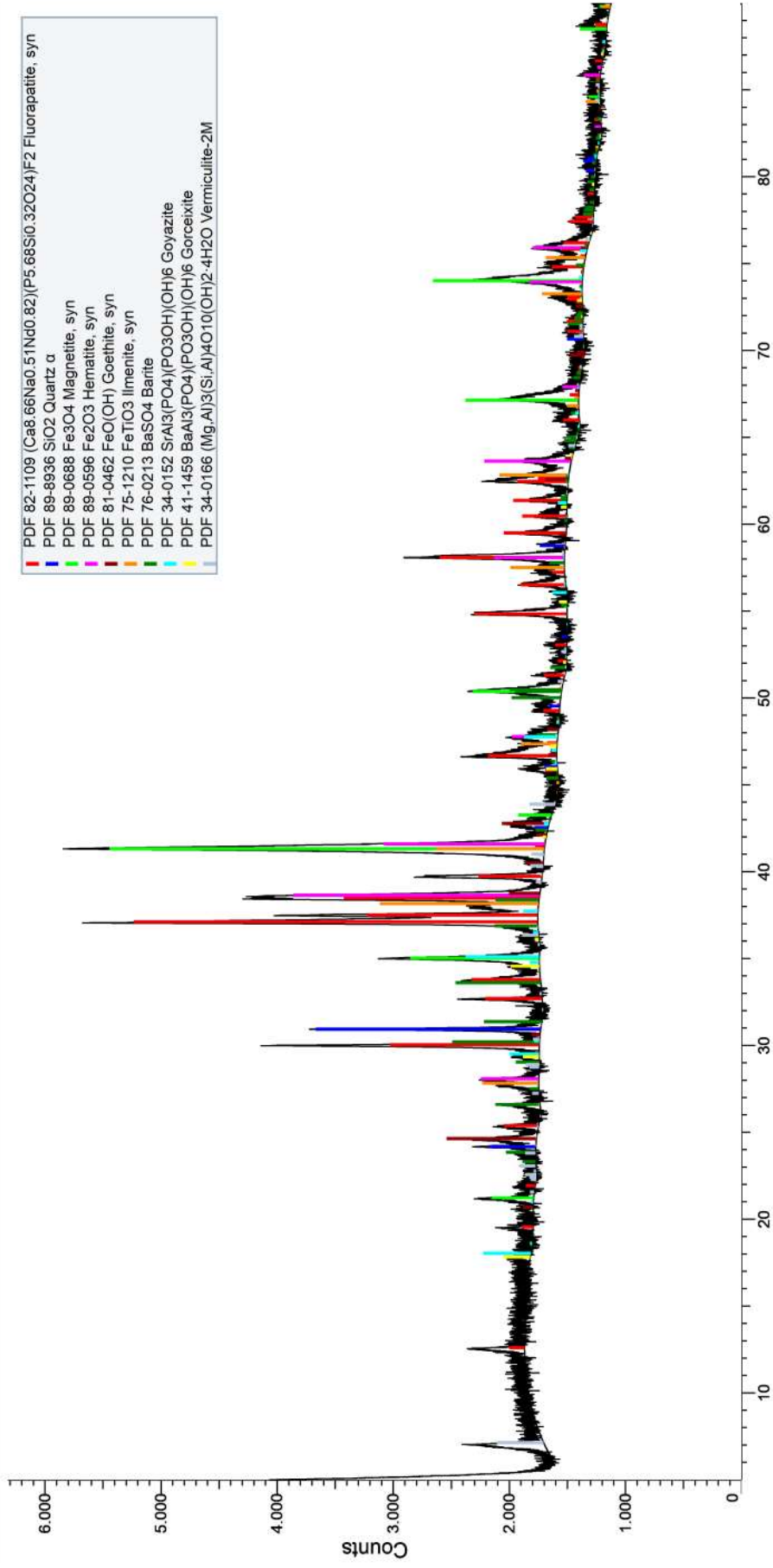
HD Pilha 59 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



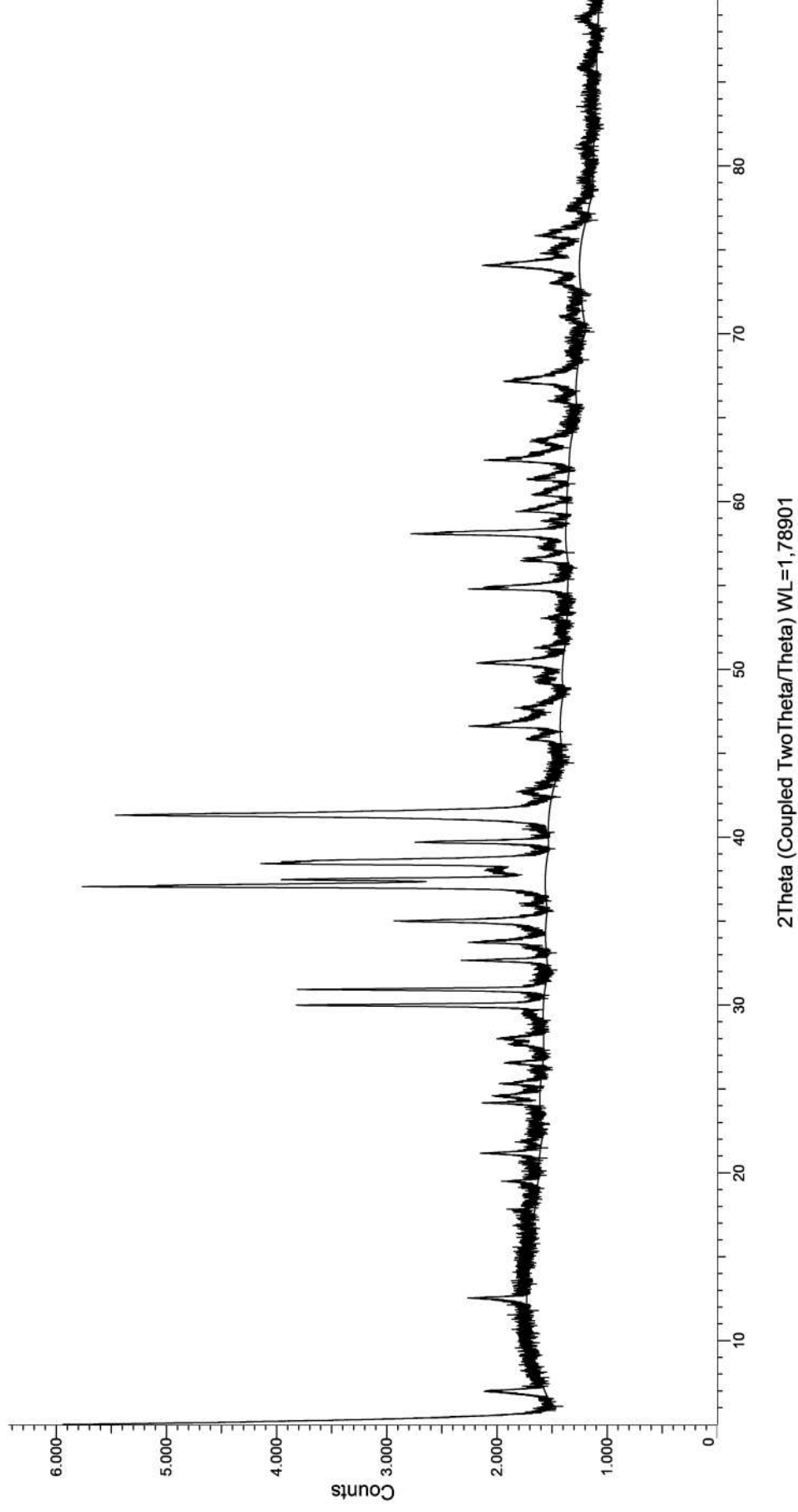
HD Pilha 59 MAC (Dados Interpretados)

(Coupled TwoTheta/Theta)



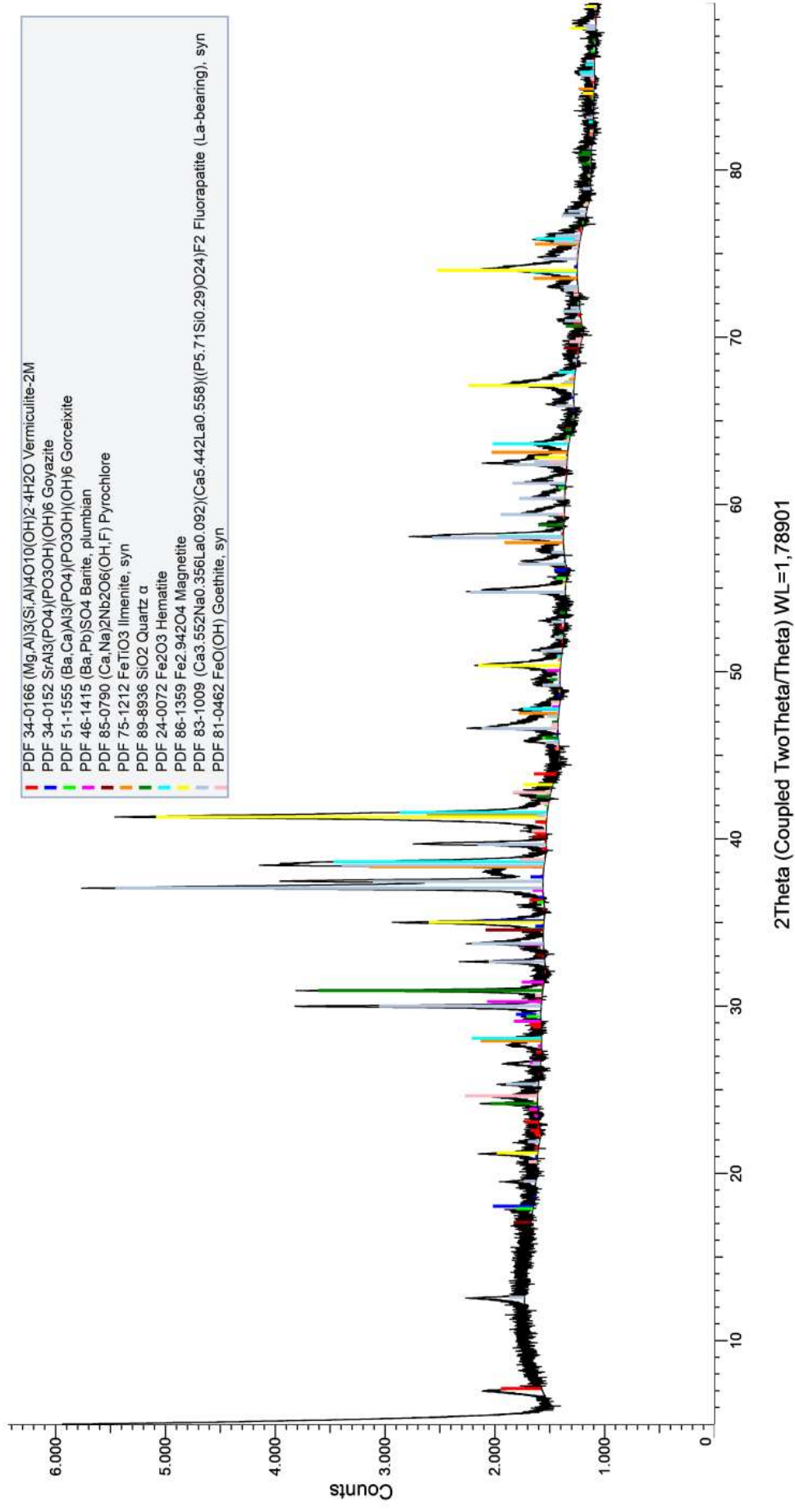
+400# Pilha 59 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



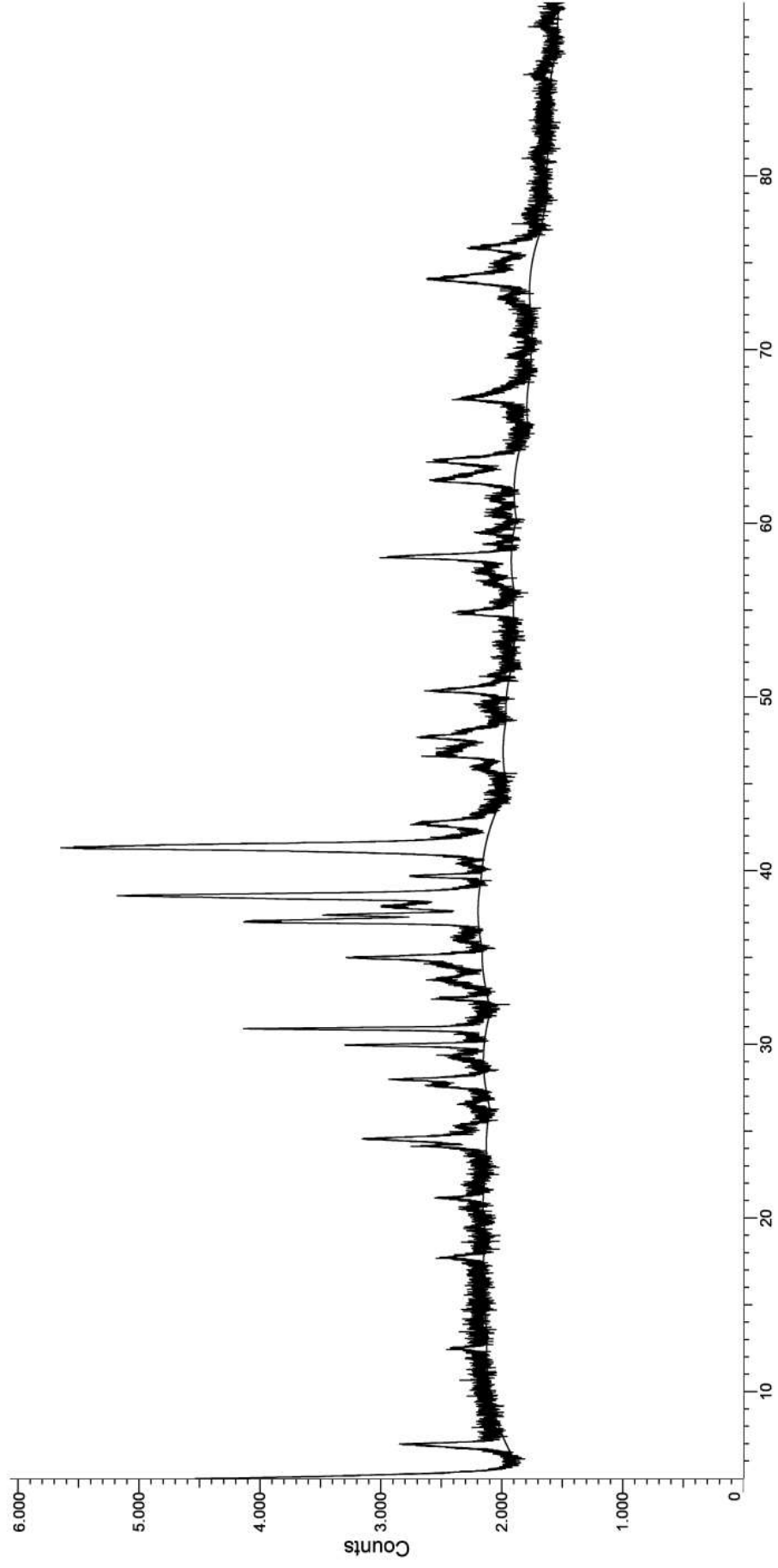
+400# Pilha 59 MAC (Dados Interpretados)

(Coupled TwoTheta/Theta)



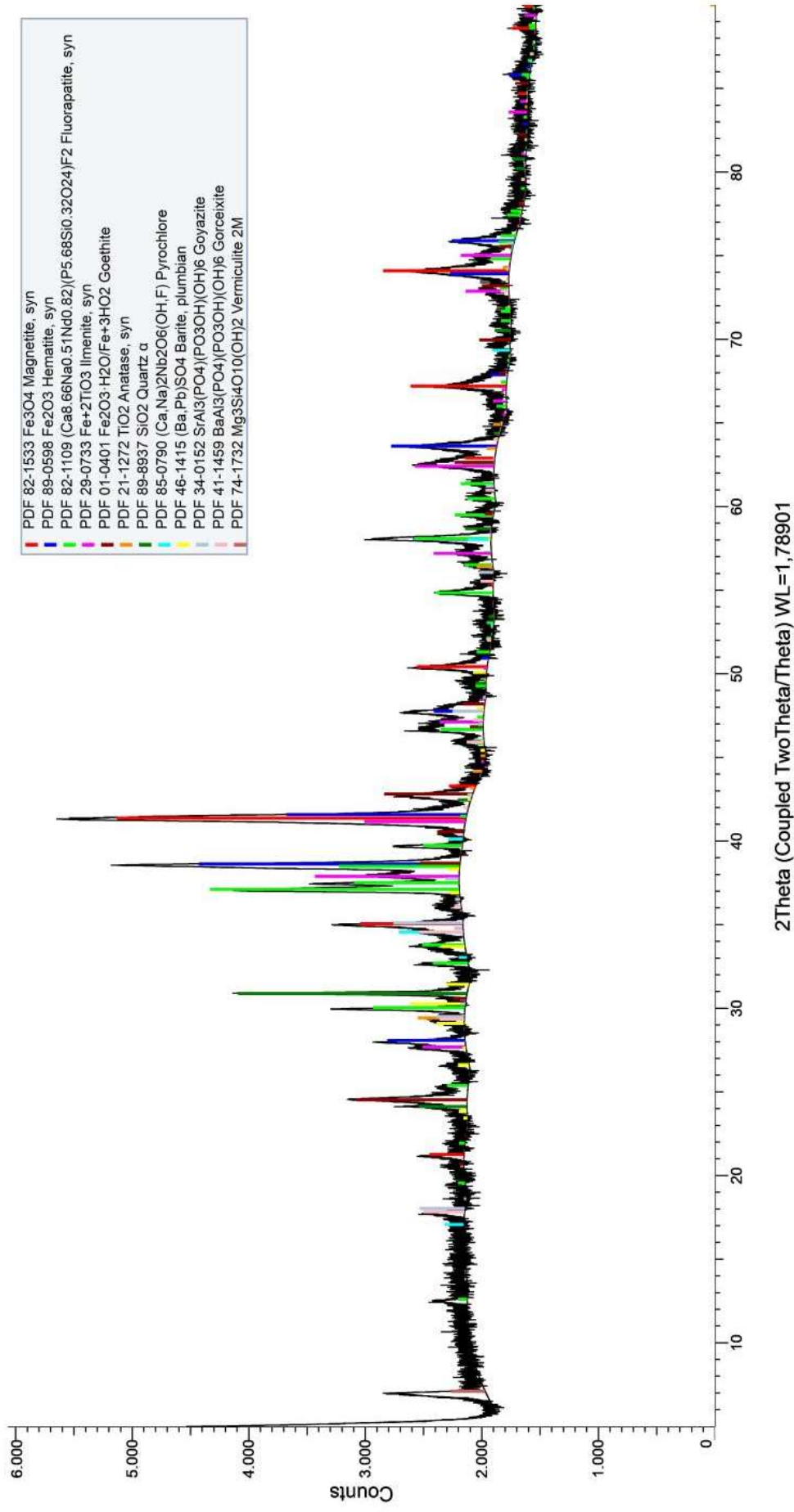
-400# Pilha 59 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



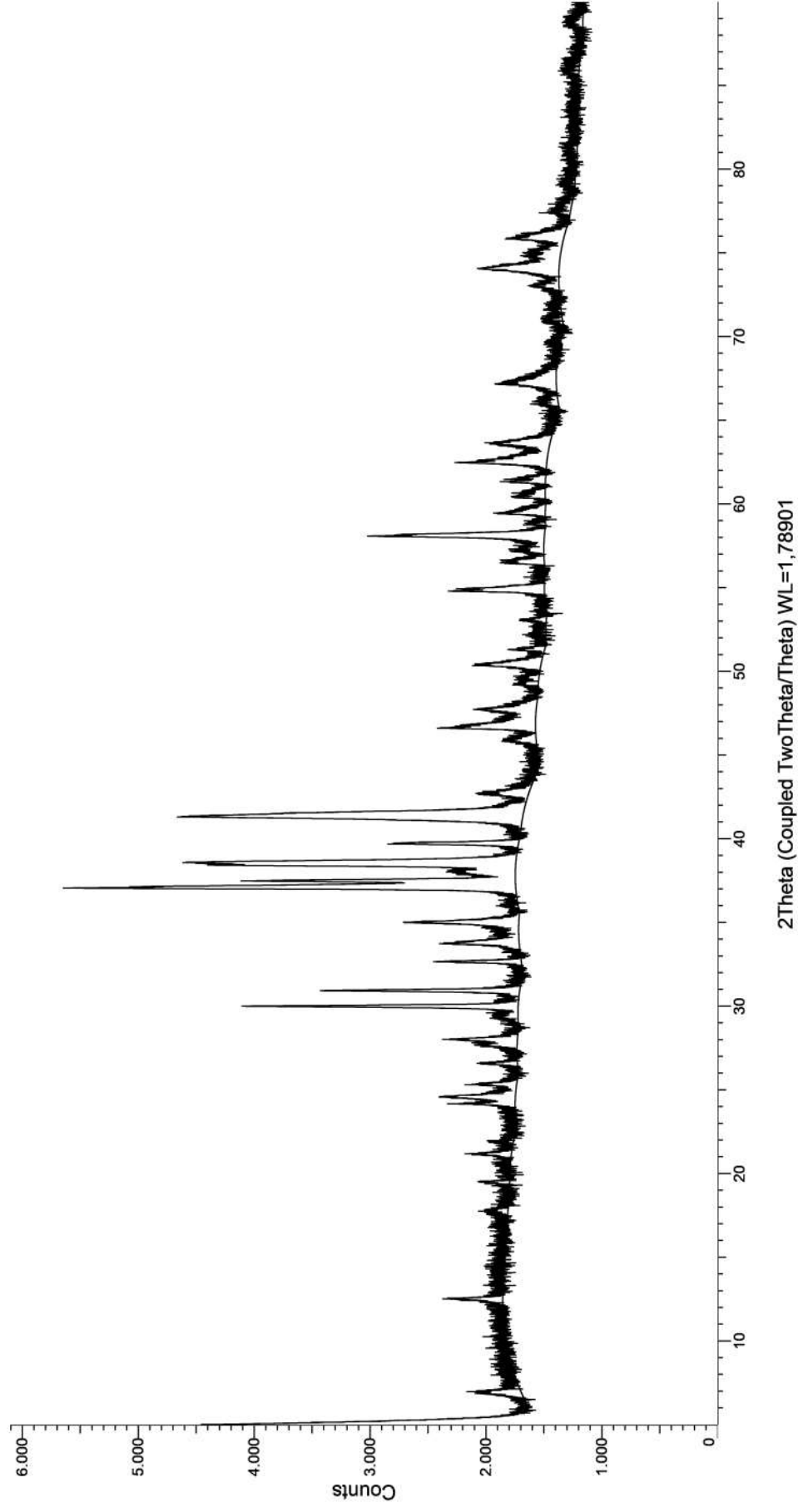
-400# Pilha 59 MAC (Dados Interpretados)

(Coupled TwoTheta/Theta)



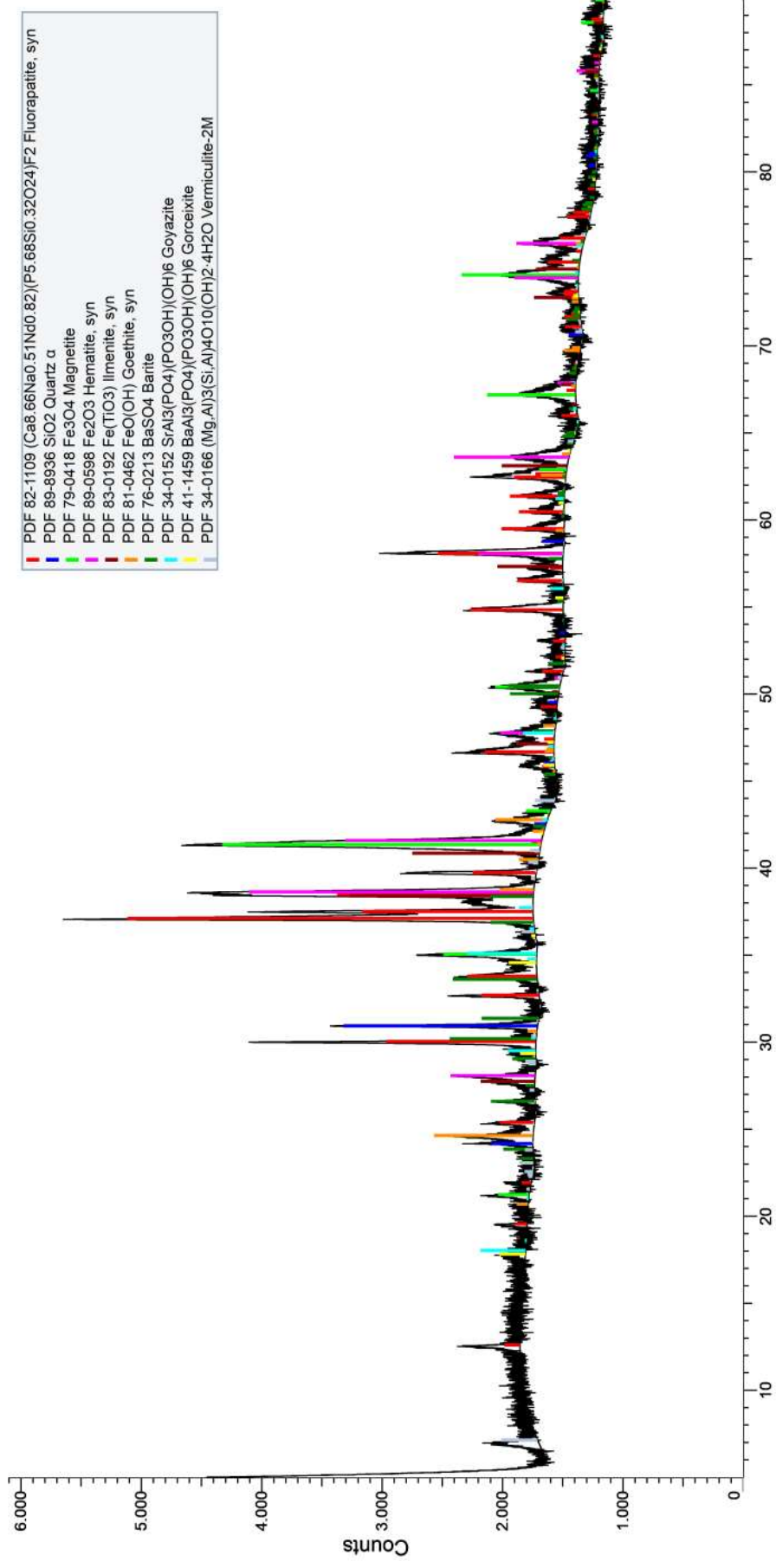
HD Pilha 62 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



HD Pilha 62 MAC (Dados Interpretados)

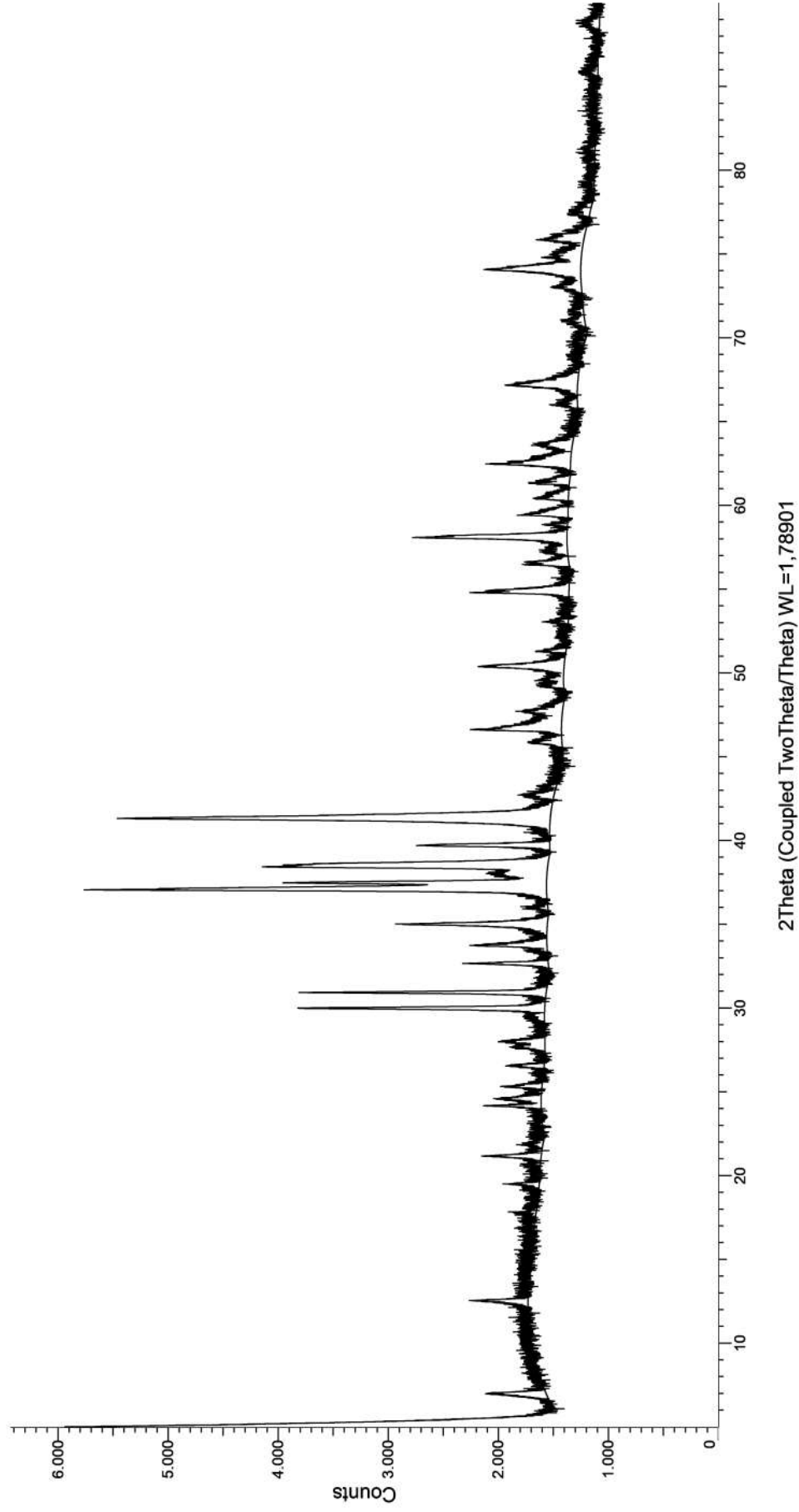
(Coupled TwoTheta/Theta)



2Theta (Coupled TwoTheta/Theta) WL=1,78901

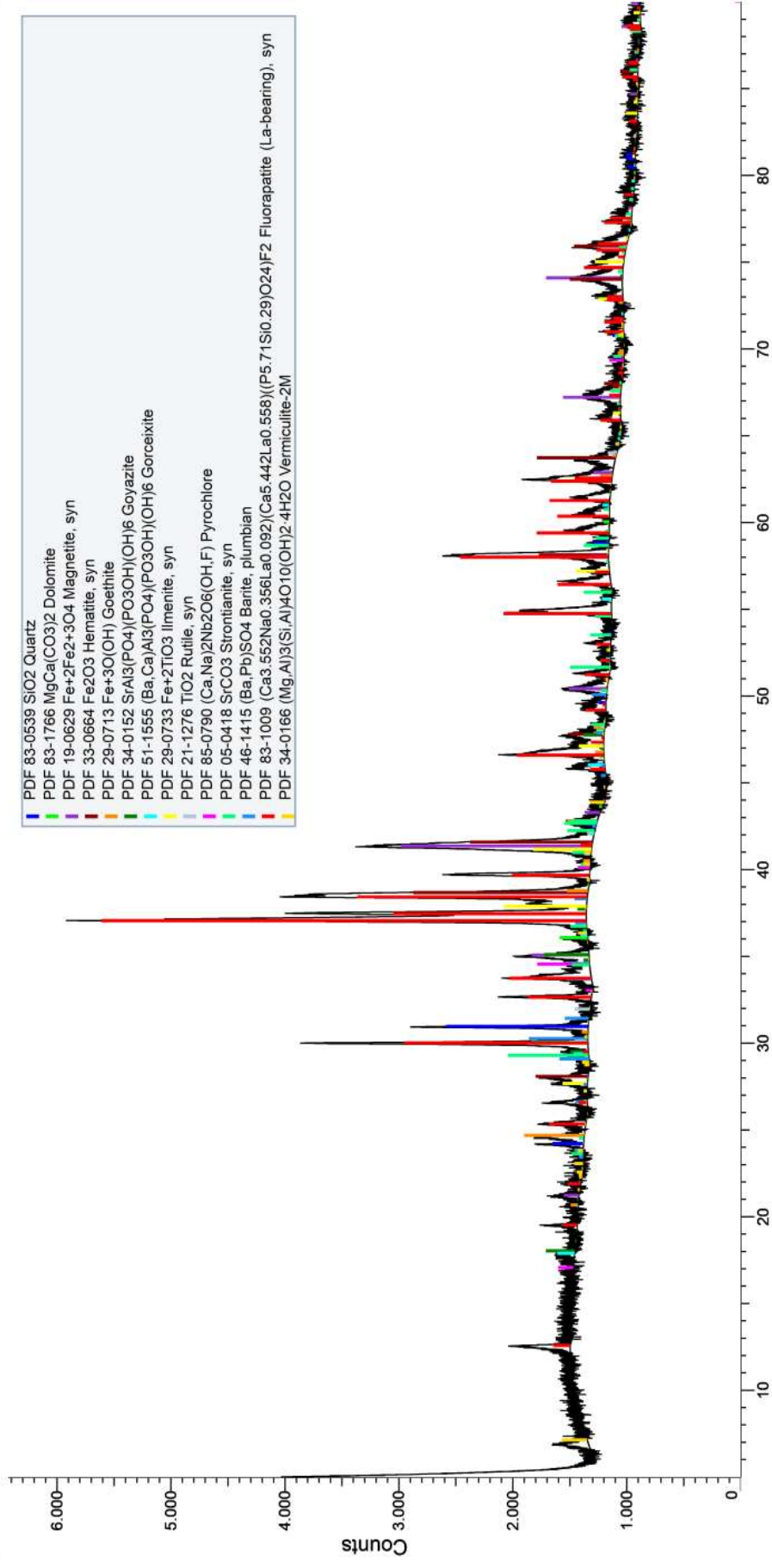
+400# Pilha 62 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



+400# Pilha 62 MAC (Dados Interpretados)

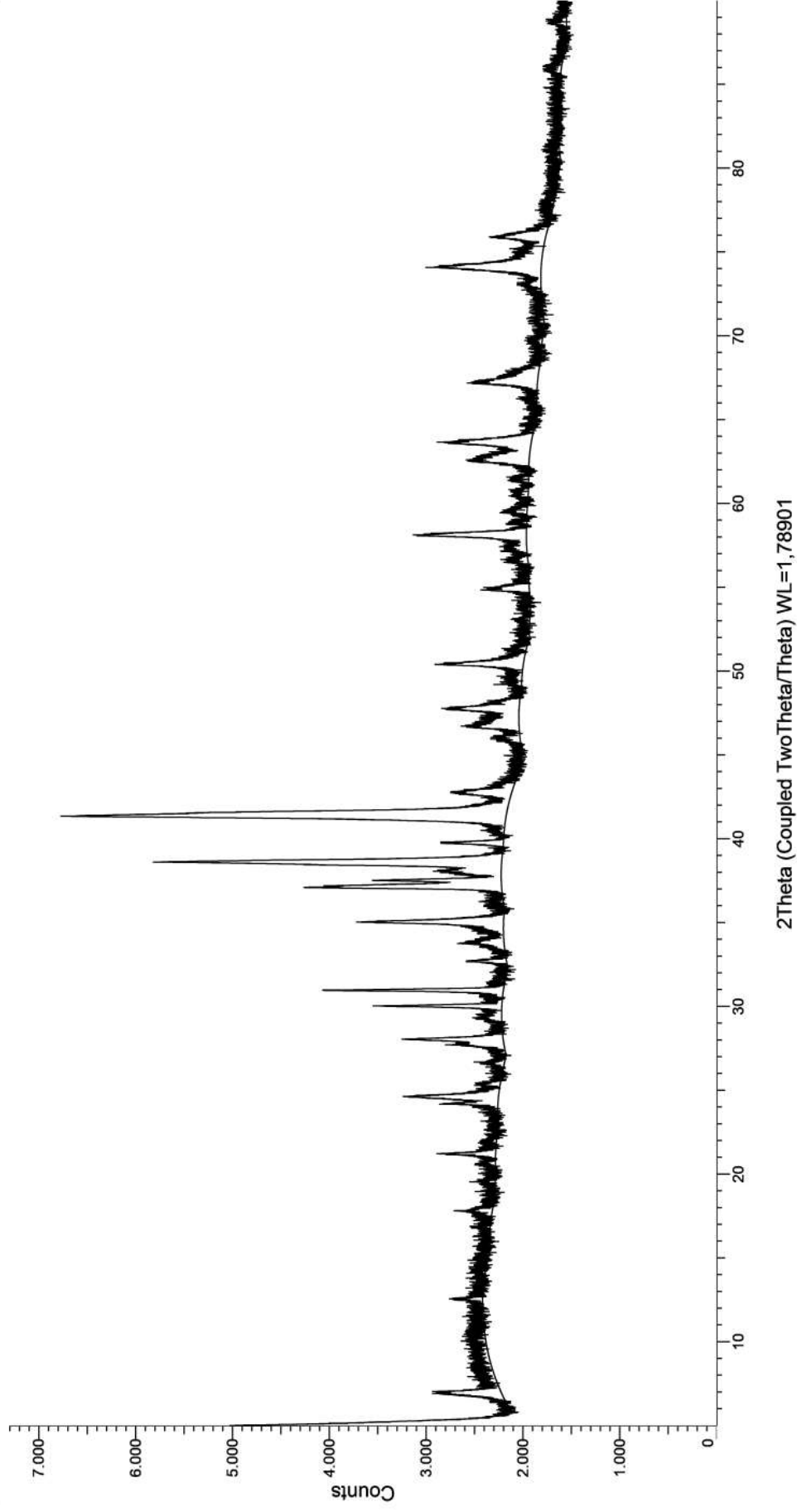
(Coupled TwoTheta/Theta)



2Theta (Coupled TwoTheta/Theta) WL=1,78901

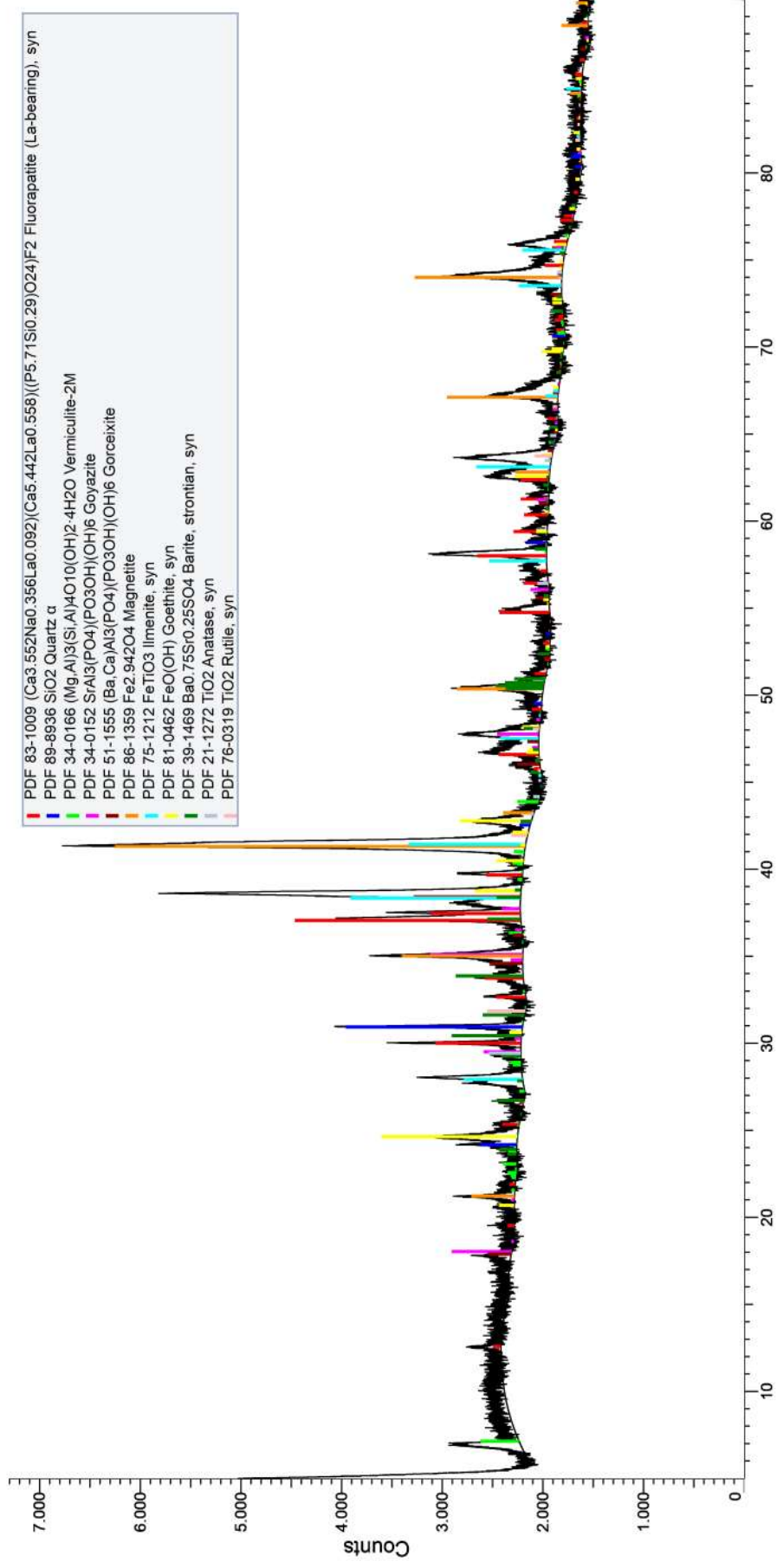
-400# Pilha 62 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



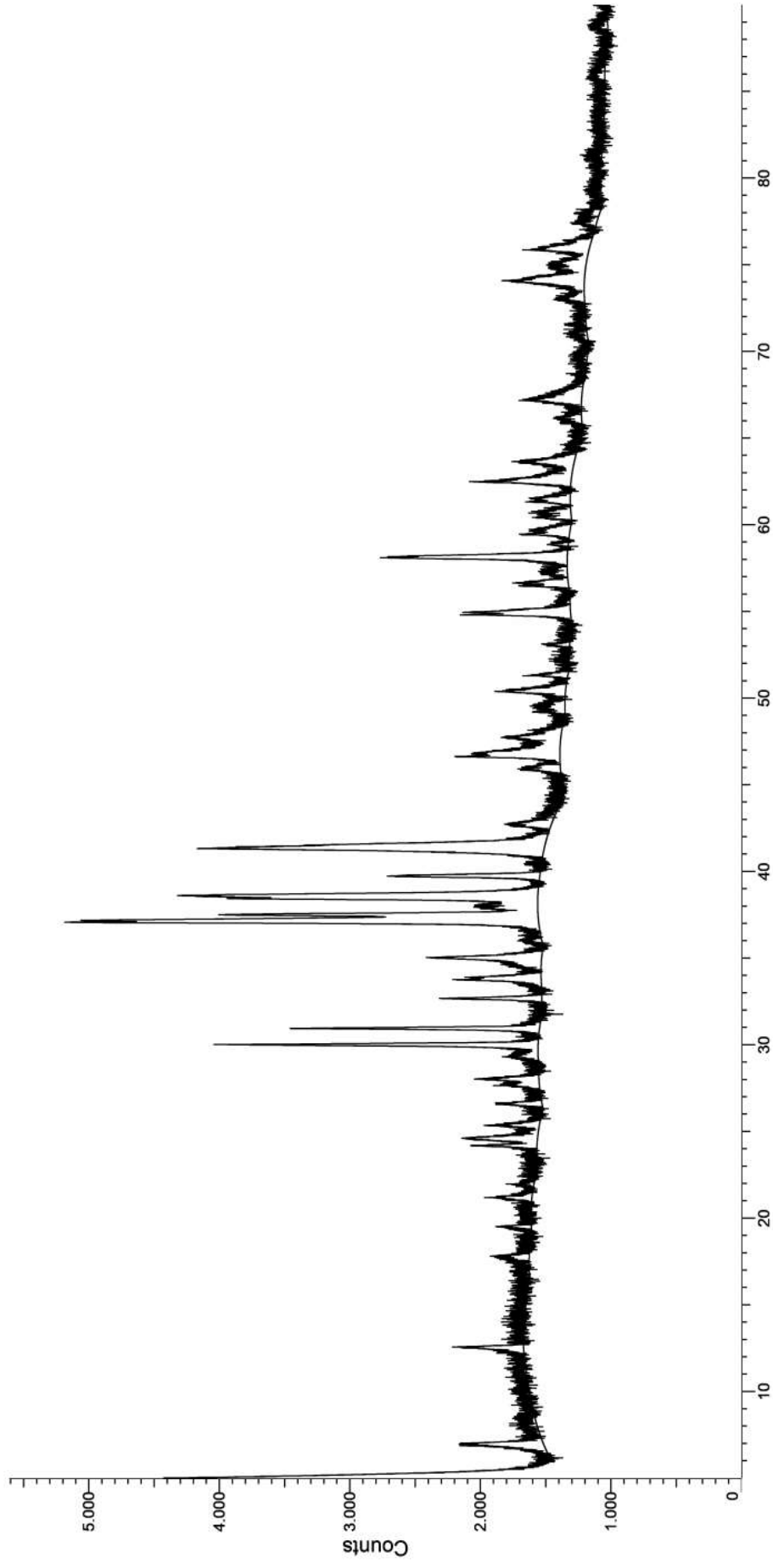
-400# Pilha 62 MAC (Dados Interpretados)

(Coupled TwoTheta/Theta)



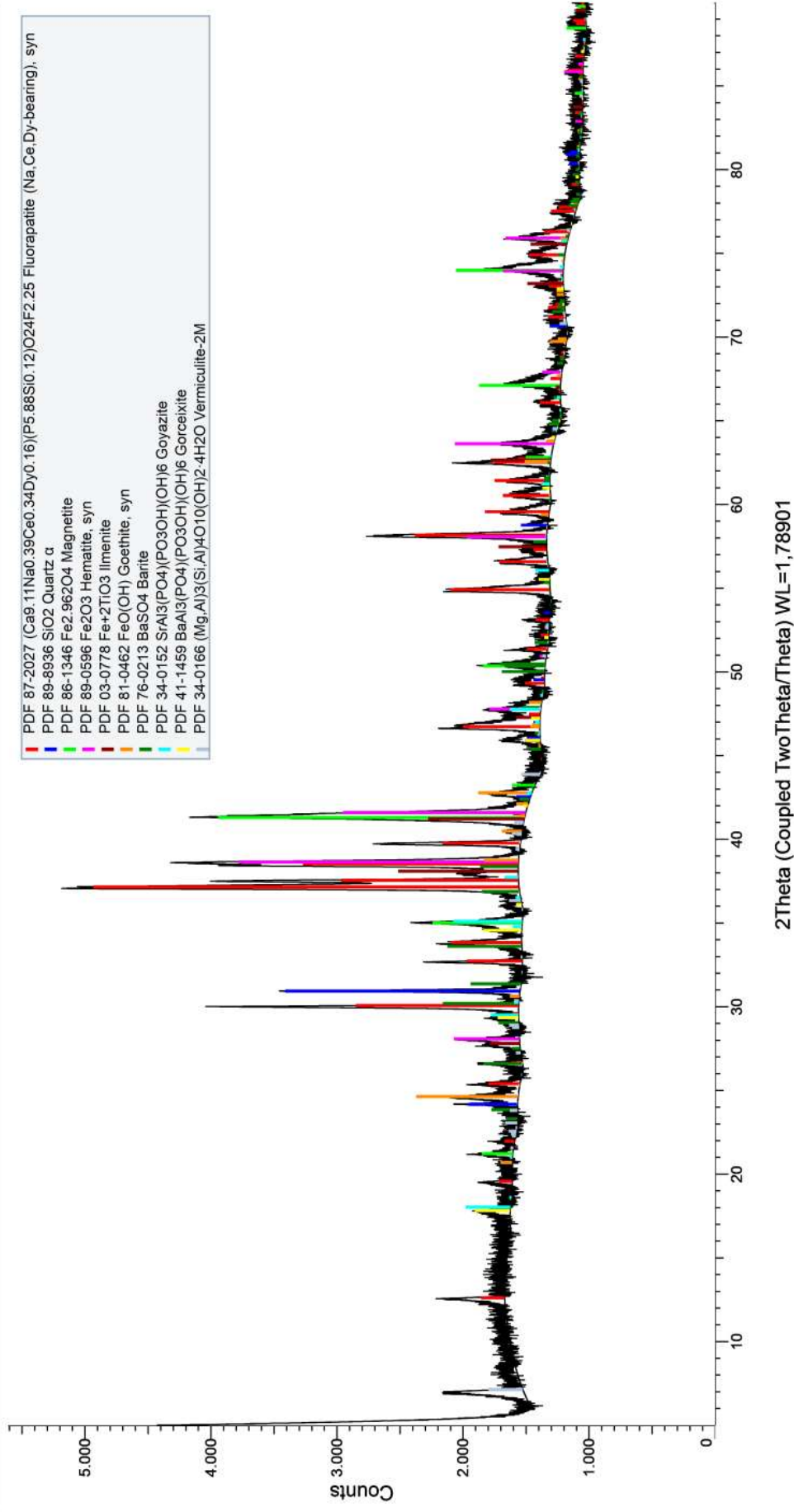
HD Pilha 71 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



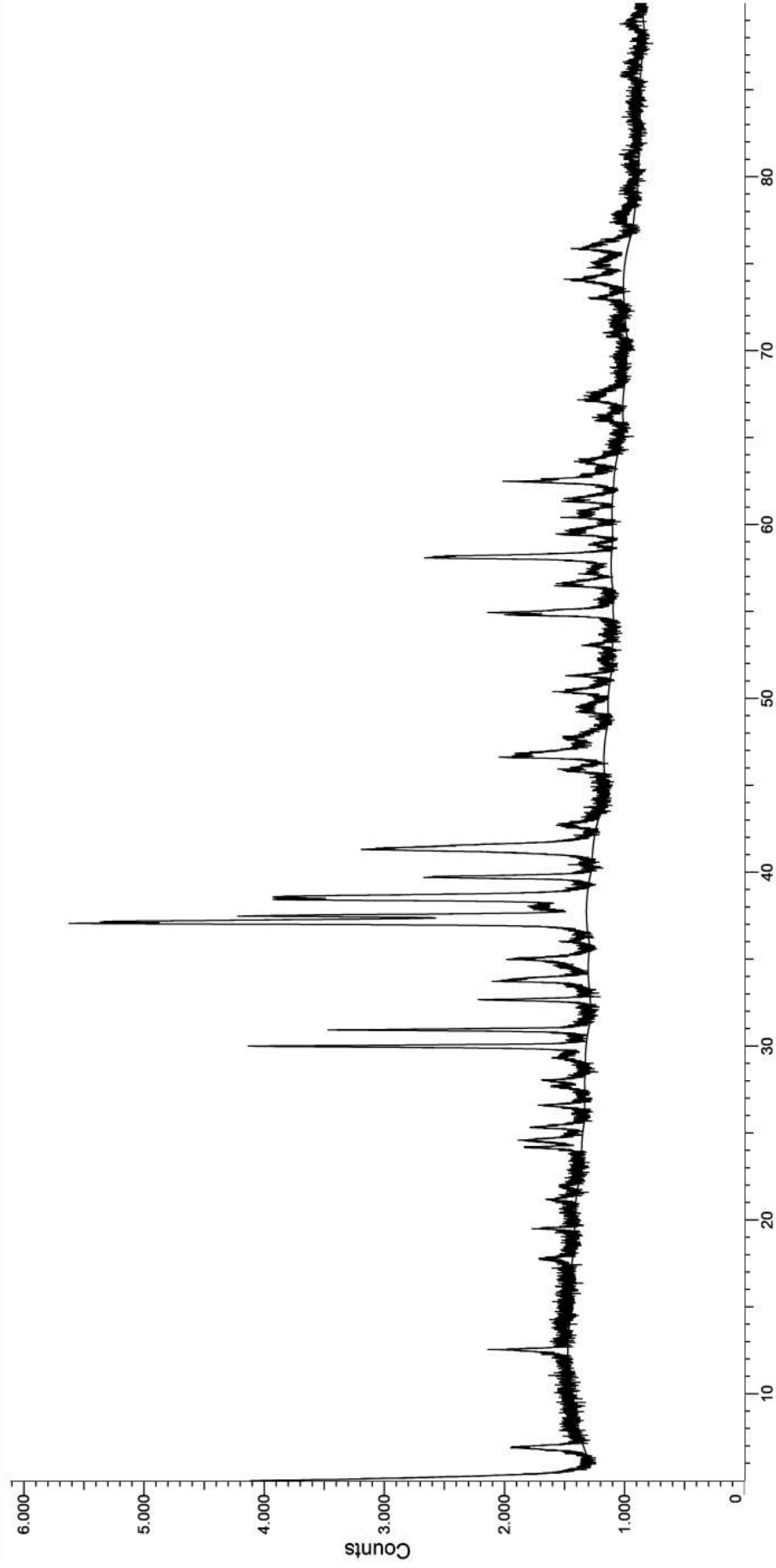
HD Pilha 71 MAC (Dados Interpretados)

(Coupled TwoTheta/Theta)



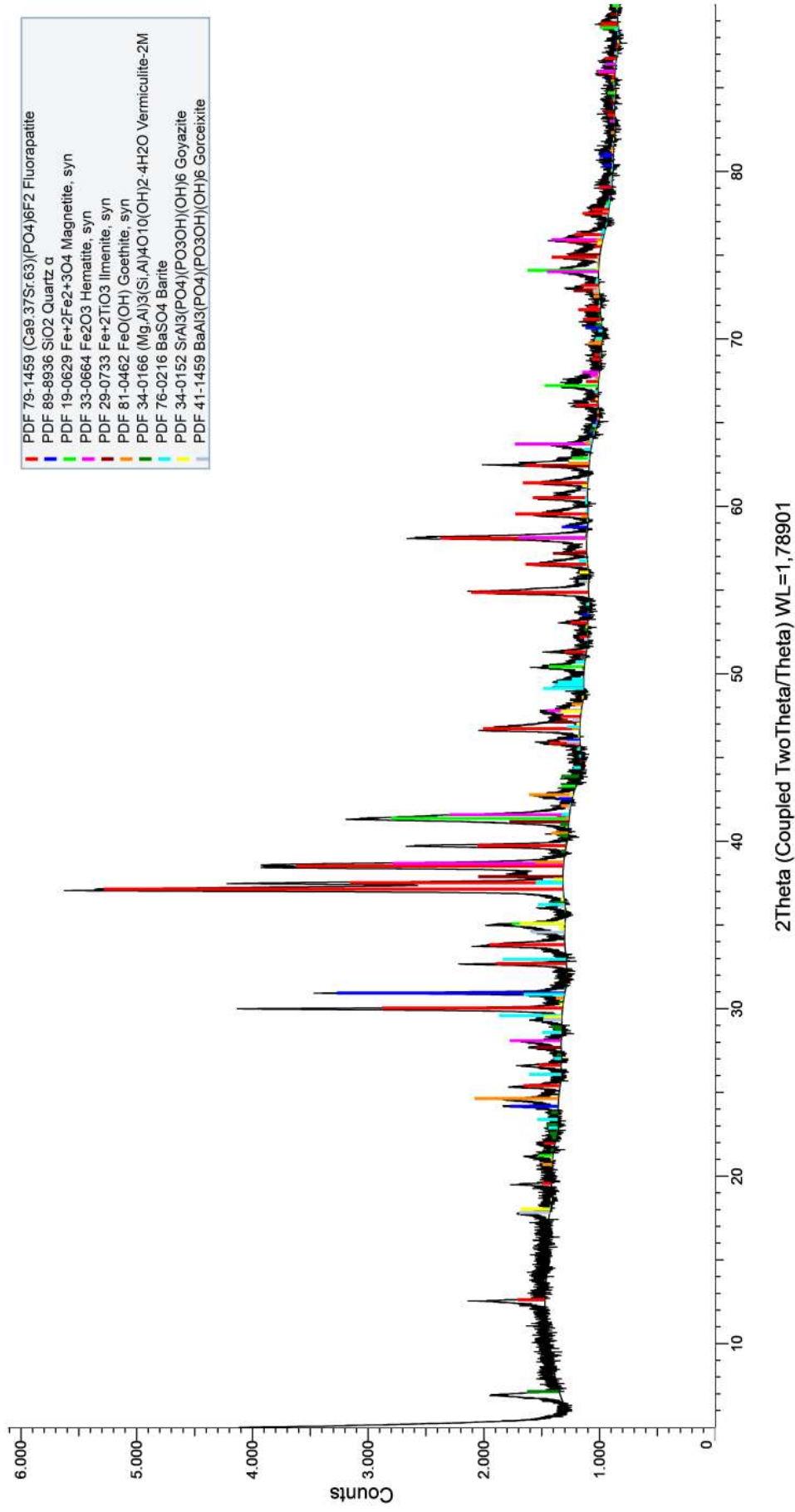
+400# Pilha 71 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



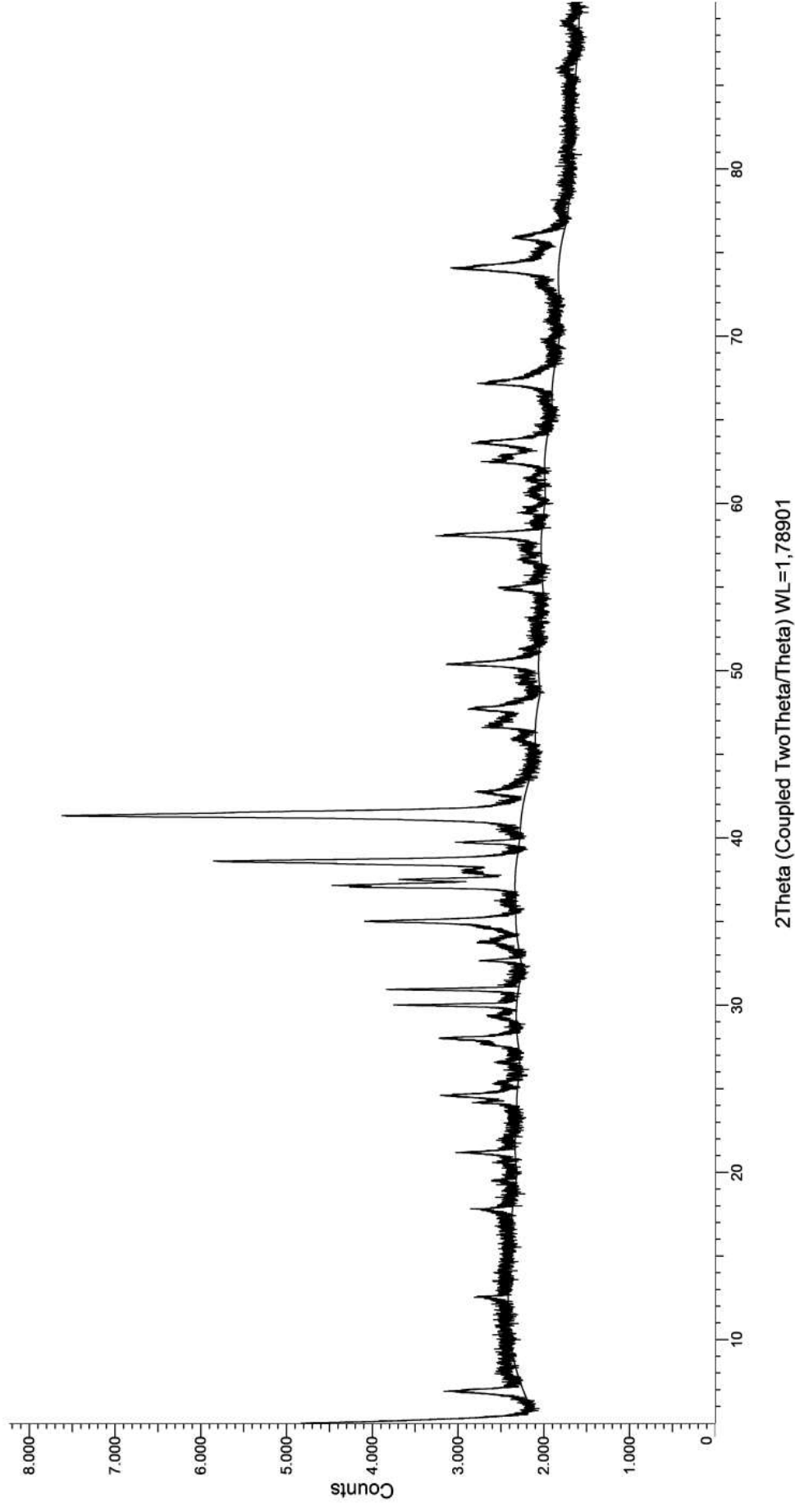
+400# Pilha 71 MAC (Dados Interpretados)

(Coupled TwoTheta/Theta)



-400# Pilha 71 MAC (Dados Primitivos)

(Coupled TwoTheta/Theta)



-400# Pilha 71 MAC (Dados Interpretados)

(Coupled TwoTheta/Theta)

