



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
ENGENHARIA DE MINAS

LORENA MARIELLI SILVA FERREIRA

ESTUDO DE RASTREABILIDADE DO MINÉRIO FOSFÁTICO DO
COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE PATROCÍNIO-MG

ARAXÁ-MG

2022

LORENA MARIELLI SILVA FERREIRA

**ESTUDO DE RASTREABILIDADE DO MINÉRIO FOSFÁTICO DO
COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE PATROCÍNIO-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador(a): Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva
Coorientador(a): Dra. Carla Bertucelli Grasso de Medeiros

ARAXÁ-MG

2022

LORENA MARIELLI SILVA FERREIRA

ATA DE APROVAÇÃO

**ESTUDO DE RASTREABILIDADE DO MINÉRIO FOSFÁTICO DO
COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE PATROCÍNIO-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Data de Defesa: Araxá, 08 de fevereiro de 2022.



Presidente e Orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular e Coorientadora: Dra. Carla Bertucelli Grasso de Medeiros
Mosaic Fertilizantes do Brasil LTDA



Membro Titular: Prof. Dr. Fábio de São José
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG – Unidade Araxá

RESUMO

A rastreabilidade do minério é uma ferramenta de suma importância para a melhoria do controle de toda a cadeia produtiva mineral. Este controle permite conhecer as características e propriedades do minério, e dessa forma possibilita o ajuste e otimização das operações, proporcionando a correlação das características e qualidades do minério com parâmetros operacionais. Este trabalho apresenta o estudo da rastreabilidade do minério fosfático, desde a mina de Patrocínio-MG até a Usina 311 em Araxá-MG. Dessa forma, realizou-se o mapeamento das etapas do fluxo do minério da mina à usina e, posteriormente, coletou e consolidou as informações de cada etapa, gerando um *dashboard* no *Power BI Desktop*. Com a definição da estratégia de operar pilhas rastreadas, as quais, quando descarregadas em Araxá, são transportadas para estoques, para posterior retomada e alimentação completa destas na usina, estas foram avaliadas considerando-se a recuperação metalúrgica de P_2O_5 da flotação de grossos por meio do *dashboard* gerado. Na sequência, as pilhas 7640:476 e 7641:475 foram amostradas e submetidas à caracterização mineralógica expedita e de detalhe. Por fim, realizou-se uma avaliação da aderência entre o modelo de blocos de curto prazo (planejado) e as amostras caracterizadas que foram coletadas por pó de perfuratriz, quando estas foram depositadas no estoque em Araxá (executado). As pilhas rastreadas apresentaram excelentes resultados de recuperação da flotação de grossos, com exceção da pilha 7640:476 que apresentou baixo desempenho. Os resultados das análises mineralógicas expedita e de detalhe, mostraram a grande similaridade entre as pilhas 7640:476 e 7641:475, indicando que a Usina 311 não obteve bom desempenho com a pilha 7640:476 por motivos operacionais, não sendo relacionado com a mineralogia do material. A rastreabilidade do minério permitiu realizar a análise de aderência entre o planejado e o executado, que confirmou a confiabilidade do modelo de blocos de curto prazo de Patrocínio. As conclusões deste trabalho indicam que o emprego da rastreabilidade do minério viabilizou a melhoria do controle das operações de mineração e do beneficiamento do minério, bem como as análises de aderência entre o planejado e o realizado.

Palavras-chave: Minério Fosfático. Rastreabilidade. Controle de Processo.

ABSTRACT

Ore traceability is an extremely important tool for improving the control of the entire mineral production chain. This control allows the characteristics and properties of the ore to be known, and thus enables the adjustment and optimization of operations, providing the correlation of the characteristics and qualities of the ore with operational parameters. This work shows the study of the traceability of phosphate ore, from the Patrocínio-MG mine to the 311 Plant in Araxá-MG. Thus, the mapping of the stages of the ore flow from the mine to the plant was performed and, subsequently, the information of each stage was collected and consolidated, generating a dashboard in Power BI Desktop. With the definition of the strategy to operate tracked stockpiles, which, when unloaded in Araxá, are transported to stockpiles, for later resumption and complete feeding of the stockpiles to the mill, they were evaluated considering the metallurgical recovery of P_2O_5 from coarse flotation through the dashboard generated. Next, the 7640:476 and 7641:475 piles were sampled and subjected to expeditious and detailed mineralogical characterization. Finally, an evaluation of the adherence between the short-term block model (planned) and the characterized samples that were collected by drill dust when they were deposited at the stockpile in Araxá (run) was performed. The screened piles showed excellent recovery results from coarse flotation, except for pile 7640:476 which showed poor performance. The results of the expedite and detail mineralogical analyses showed the great similarity between the 7640:476 and 7641:475 piles, indicating that Plant 311 did not obtain good performance with the 7640:476 pile for operational reasons, not being related to the mineralogy of the material. Ore traceability allowed the adherence analysis between planned and executed to be performed, which confirmed the reliability of Patrocínio's short-term block model. The conclusions of this work indicate that the use of ore traceability made it possible to improve the control of mining operations and ore processing, as well as the analysis of adherence between planned and executed.

Keywords: Phosphatic Ore. Traceability. Process Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fluxograma de produção dos principais fertilizantes fosfatados produzidos no Brasil. | 14 |
| Figura 2 - Localização dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba com mina de fosfato ativa. | 16 |
| Figura 3 - Mapa geológico de Salitre I. | 19 |
| Figura 4 - Esquema das zonas intempéricas do depósito de Salitre I. | 20 |
| Figura 5 - Fluxograma do beneficiamento da Usina 311. | 25 |
| Figura 6 - Modelo de difratograma. | 29 |
| Figura 7 - Metodologia do ciclo PDCA aplicada. | 31 |
| Figura 8 - Mapa da mina de Patrocínio dividida em cava norte, sul e leste. | 39 |
| Figura 9 - Resultados da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos – julho. | 41 |
| Figura 10 - Resultados da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos – agosto. | 42 |
| Figura 11 - Resultados da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos – setembro. | 43 |
| Figura 12 - Resultados da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos – outubro. | 44 |
| Figura 13 - Visão geral das amostras da alimentação da flotação de grossos na caracterização mineralógica das pilhas 7640:476 (A) e 7641:475 (B). | 45 |
| Figura 14 - Amostra da alimentação da flotação de grossos na caracterização mineralógica, com foco na apatita, das pilhas 7640:476 (A) e 7641:475 (B). | 45 |
| Figura 15 - Composição mineralógica das pilhas rastreadas 7640:476 (A) e 7641:475 (B). | 46 |
| Figura 16 - Gráfico das associações minerais da apatita - Amostra da pilha 7640:476. | 49 |
| Figura 17 - Gráfico das associações minerais da apatita - Amostra da pilha 7641:475. | 49 |
| Figura 18 - Gráfico do grau de liberação – Amostra da pilha 7640:476. | 51 |
| Figura 19 - Gráfico do grau de liberação – Amostra da pilha 7641:475. | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 - Recuperação de P_2O_5 da apatita - Amostras das pilhas 7640:476 (A) e 7641:475 (B)..... | 53 |
| Figura 21 - Difratoograma de raios X - Pilha 7640:476. | 55 |
| Figura 22 - Difratoograma de raios X - Pilha 7641:475. | 55 |
| Figura 23 - Características texturais e associações minerais das amostras das pilhas 7640:476 e 7641:475. | 56 |
| Figura 24 - Gráfico da análise de aderência da Pilha 7640:476..... | 57 |
| Figura 25 - Gráfico da análise de aderência da Pilha 7641:475..... | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Resultados químicos das amostras das pilhas rastreadas 7640:476 e 7641:475. | 47 |
| Tabela 2 - Distribuição dos teores por mineral - Amostra da pilha 7640:476. | 47 |
| Tabela 3 - Distribuição dos teores por mineral - Amostra da pilha 7641:475. | 48 |
| Tabela 4 - Principais minerais associados à apatita..... | 50 |
| Tabela 5 - Teores químicos do produto magnético. | 54 |
| Tabela 6 - Análise mineralógica das amostras do produto magnético das pilhas 7640:476 e 7641:475. | 54 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| 5W2H | What, When, Who, Where, Why, How e How Much |
| CMA | Complexo Mineraloquímico de Araxá |
| CMC | Complexo Mineraloquímico de Catalão |
| CMP | Complexo de Mineração de Patrocínio |
| CPG | Complexo Industrial de Piaçaguera |
| DAP | Fosfato de Diamônio |
| DNPM | Departamento Nacional de Produção Mineral |
| DRX | Difração de Raios X (DRX) |
| EDS | Espectrômetro de Dispersão de Energia |
| EPUSP | Escola Politécnica da Universidade de São Paulo |
| FCA | Fine Concentrated Apatite |
| GCA | Gross Concentrated Apatite |
| ICDD | <i>International Centre for Diffraction Data</i> |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| ITT | Instrução Técnica de Trabalho |
| K | Potássio |
| LCT | Laboratório de Caracterização Tecnológica |
| Ma | Milhões de anos |
| MAP | Fosfato de Monoamônio |
| MEV | Microscópio Eletrônico de Varredura |
| Mt | Milhões de tonelada |
| N | Nitrogênio |
| P | Fósforo |
| PDCA | <i>Plan, Do, Check e Act</i> |
| PIAP | Província Ígnea do Alto Paranaíba |
| PP | Pó de Perfuratriz |
| RDO | Diário de Ocorrências Ferroviárias |
| SMBI | Separação Magnética de Baixa Intensidade |
| SSP | Superfosfato Simples |
| TSP | Superfosfato Triplo |
| USGS | <i>United States Geological Survey</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 13 |
| 2.1 | Fertilizantes NPK | 13 |
| 2.1.1 | Elemento Fósforo..... | 13 |
| 2.2 | Depósitos de Fosfato na Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) | 15 |
| 2.3 | O Complexo Alcalino Carbonatítico de Salitre | 18 |
| 2.4 | Estoques de minério | 22 |
| 2.5 | Operação e Beneficiamento do Minério Fosfático | 23 |
| 2.6 | Caracterização mineralógica de minérios | 27 |
| 2.7 | A Rastreabilidade do Minério | 29 |
| 3 | METODOLOGIA | 34 |
| 3.1 | Mapeamento das etapas no fluxo do minério | 34 |
| 3.2 | Levantamento de dados | 34 |
| 3.3 | Consolidação e análises dos dados..... | 35 |
| 3.4 | Pilhas rastreadas | 36 |
| 3.4.1 | Desempenho das pilhas rastreadas na Usina 311..... | 36 |
| 3.4.2 | Análise Mineralógica das Pilhas Selecionadas | 37 |
| 3.5 | Análise de aderência | 38 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| 4.1 | Mapeamento das etapas relevantes no fluxo do minério | 39 |
| 4.2 | Desempenho das pilhas rastreadas na Usina 311..... | 40 |
| 4.3 | Análise mineralógica das pilhas selecionadas | 45 |
| 4.3.1 | Análise Expedita | 45 |
| 4.3.2 | Análise Detalhada..... | 46 |
| 4.3.3 | Análise Mineralógica Do Produto Magnético | 53 |
| 4.4 | Análise de aderência | 56 |
| 5 | CONCLUSÕES | 59 |
| | REFERÊNCIAS..... | 60 |

1 INTRODUÇÃO

Os principais depósitos de fosfato no Brasil estão associados a complexos alcalino-carbonatíticos e há no país dezenas destes. Dentre estes, os complexos alcalino-carbonatíticos de Catalão I e II, Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira, pertencente a Província Ígnea do Alto Paranaíba, alojam grande número de rochas alcalinas ultramáficas como picritos, dunitos, bebedouritos, sienitos, carbonatitos e foscoritos (GIBSON *et al.*, 1995).

O complexo alcalino carbonatítico de Salitre situa-se a 24 km do município de Patrocínio, no Estado de Minas Gerais, e consiste em três intrusões principais: Salitre I, Salitre II e Salitre III (BARBOSA, 2009). A atual detentora das operações de exploração do minério fosfático desse complexo, denominado Complexo de Mineração de Patrocínio (CMP), é a empresa Mosaic Fertilizantes do Brasil Ltda.

O Complexo de Mineração de Patrocínio iniciou as operações de mineração no ano de 2017, em que produziu mais de 10 milhões de toneladas em base úmida de minério fosfático (Mosaic Fertilizantes, 2020). Todo o minério oriundo da mina do CMP é transportado via ferroviária, por aproximadamente 200 km, para o Complexo Minerquímico de Araxá (CMA), onde é processado para produzir um concentrado fosfático com teor médio de 35% de P_2O_5 .

Todo o fluxo de transporte do minério de Patrocínio até a usina, em Araxá, é complexo e acarreta perda de controle da rastreabilidade, uma vez que o mesmo passa por diversas etapas de transferência: no pátio onde o material é expedido, no descarregamento dos vagões, na deposição de material em estoque e, por fim, na formação das pilhas homogeneizadas que alimentam as usinas de Araxá.

A complexidade no fluxo do minério de Patrocínio compreende outras questões, tais quais a sobreposição das diferentes pilhas de minério procedentes de Patrocínio nos pátios de descarga em Araxá e a blendagem do minério de Patrocínio com o minério de Araxá.

Dessa forma, não há um controle efetivo da qualidade do minério que alimenta a usina, como teores químicos e variáveis geometalúrgicas, e, conseqüentemente, os profissionais responsáveis pela operação da usina de beneficiamento não conseguem tomar ações preventivas para as recuperações

mássicas e metalúrgicas de P_2O_5 corresponderem ao planejado para a pilha de minério.

A questão chave para a melhoria do controle de toda a cadeia produtiva é a rastreabilidade do minério. De acordo com a ISO 9000 (2000), a rastreabilidade é a capacidade de recuperar o histórico, a aplicação ou a localização daquilo que está sendo considerado. Sendo assim, avaliando o minério, a rastreabilidade está relacionada à origem do material e seu histórico de processamento.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo acerca da rastreabilidade do minério fosfático, desde a mina do Complexo de Mineração de Patrocínio até a usina do Complexo Minerquímico de Araxá, para melhoria do controle das operações de mineração e beneficiamento do minério, bem como avaliar a aderência dos teores dos óxidos e dos dados de geometurgia entre planejado e realizado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fertilizantes NPK

O fertilizante é definido como uma substância orgânica ou mineral, de origem natural ou sintética, que incorporado ao solo fornece um ou mais nutrientes que são fundamentais para o crescimento vegetal (MORAES NETO, 2010). Os elementos químicos presentes nos fertilizantes são divididos, de acordo com sua quantidade ou proporção, em duas classes: macronutrientes e micronutrientes. São classificados como macronutrientes elementos como carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Já o boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, zinco, sódio, silício e cobalto, são elementos classificados como micronutrientes (DIAS; FERNANDES, 2006).

Os nutrientes que são comumente observados em deficiência nos solos são o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K), que geraram a fórmula básica dos fertilizantes, NPK. Através dessa fórmula é possível identificar o percentual de nitrogênio em sua forma elementar, N, de fósforo na forma de pentóxido de fósforo, P_2O_5 , e de potássio na forma de óxido de potássio, K_2O . O nitrogênio é o elemento primordial no aumento da produtividade agrícola por ser um importante componente das proteínas e da clorofila. O fósforo atua nas funções vitais dos vegetais, sendo responsável pelo armazenamento e utilização de energia, por proporcionar o crescimento das raízes e a melhora da qualidade dos grãos, como também por promover o rápido amadurecimento dos frutos. O potássio é responsável por controlar a hidratação e as doenças das plantas, bem como pelo equilíbrio de cargas no interior das células vegetais (DIAS; FERNANDES, 2006).

2.1.1 Elemento Fósforo

O fósforo é um elemento químico de número atômico 15 da Tabela Periódica dos Elementos, encontrado na forma de sais denominados fosfatos, muito reativo e não metálico. Este elemento é de suma importância na saúde dos animais e plantas. Nos animais, o fósforo compõe o tecido nervoso, o protoplasma celular, os dentes e os ossos. Nas plantas, por sua vez, atua estimulando o crescimento das

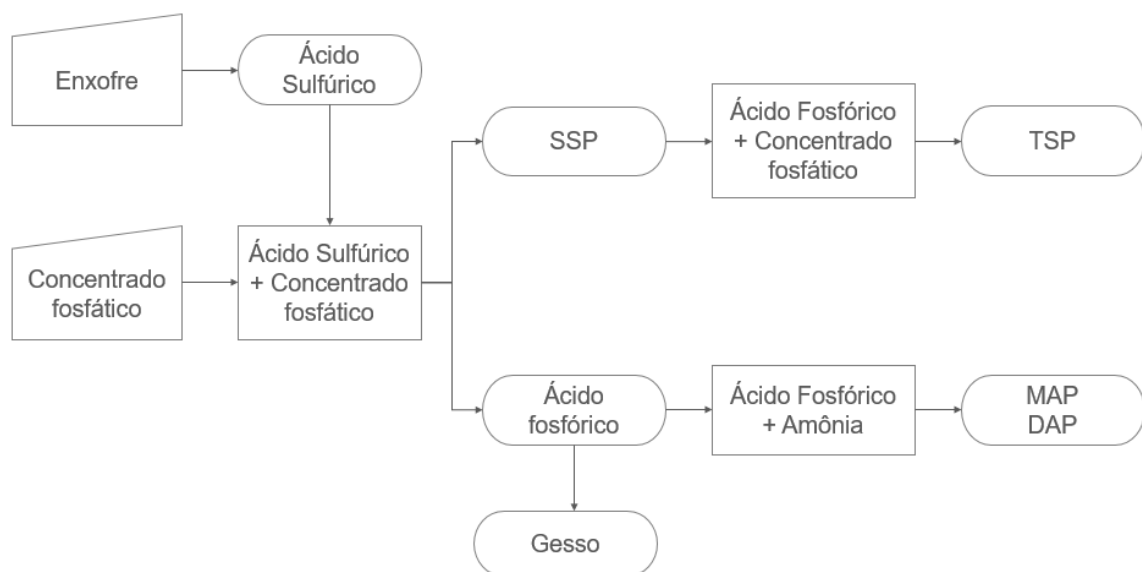
raízes durante a floração, a formação de sementes, a aceleração da maturação, dentre outras funções (SOUZA, 2001).

Grande parte dos minérios fosfáticos contém o mineral apatita representado pela fórmula: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, tratando-se de um fosfato de cálcio. Apresenta brilho vítreo e densidade entre 3.1 a 3.2 g/cm³ (SOUZA, 2001).

O concentrado de rocha fosfática é uma matéria-prima base para a produção dos fertilizantes químicos NPK. No Brasil, a produção de rocha fosfática se concentra próximo aos principais mercados consumidores, nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. A rocha fosfática é principalmente utilizada na indústria de fertilizantes (68%), mas é também aplicada nas indústrias químicas e na alimentação animal (OGASAWARA; KULAIF; FERNANDES, 2010).

O concentrado fosfático e o enxofre são as matérias-primas fundamentais para a produção da grande maioria dos fertilizantes fosfatados solúveis. Os principais fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil são o superfosfato simples (SSP), o superfosfato triplo (TSP), o fosfato de monoamônio (MAP) e o fosfato de diamônio (DAP) (DIAS; FERNANDES, 2006). Na Figura 1 está representado o fluxograma de produção desses fertilizantes.

Figura 1 - Fluxograma de produção dos principais fertilizantes fosfatados produzidos no Brasil.



Fonte: Adaptado de DIAS e FERNANDES (2006).

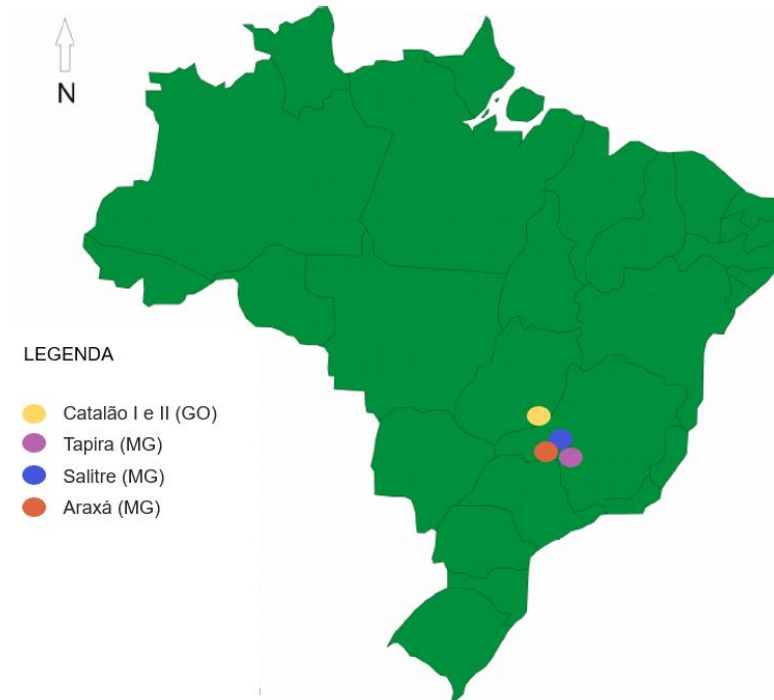
As reservas mundiais de fosfato são estimadas em 71 bilhões de toneladas. O ranking das maiores reservas mundiais de fosfatos segue a ordem: Marrocos (70.42%), China (4.51%), Egito (3.94%), Argélia (3.10%) e Síria (2.54%). O Brasil ocupa a sexta posição com 2,25% das reservas globais de fosfato (USGS, 2021). De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, ano base 2008), as principais reservas brasileiras estão localizadas em Minas Gerais (67,9%), Goiás (13,8%) e São Paulo (6,1 %), que somam 87,8% das reservas de fosfato no país.

Em 2020 a produção mundial de rochas fosfáticas foi de 223 milhões de toneladas (Mt), segundo dados do United States Geological Survey (USGS, ano base 2020). Neste ano, a China foi líder da produção de fosfato (40.36%), seguida por Marrocos (16.59%), Estados Unidos (10.76%), Rússia (5.83%) e Jordânia (4.13%). O Brasil ocupa a sétima posição no ranking, responsável por 2.47% da produção mundial (USGS, 2021).

2.2 Depósitos de Fosfato na Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP)

No Brasil, os principais depósitos de fosfato estão associados a complexos alcalino-carbonatíticos, sendo dezenas de complexos alcalino-carbonatíticos (TOLEDO *et al.*, 1999). Dentre estes, destaca-se a Província Ígnea do Alto Paranaíba, a qual é considerada uma das províncias máficas potássicas que compreende o maior volume do mundo, com cerca de 15.000 km³ (GIBSON *et al.*, 1995). Esta Província localiza-se na região sudeste do Brasil e é formada por diversas rochas do tipo ultrapotássicas sob a forma de diques, pipes e diatremas: kimberlitos, kamafugitos, lamproítos, além de complexos alcalinos formados por carbonatitos e rochas silicáticas associadas. Essas ocorrências compreendem os complexos Catalão I e II, Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira (GIBSON *et al.*, 1995; BROD *et al.*, 2000). Neste item serão abordados os complexos da Província Ígnea do Alto Paranaíba com mina de fosfato ativa (Figura 2).

Figura 2 - Localização dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba com mina de fosfato ativa.



Fonte: Adaptado de GRASSO (2015).

O complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I está localizado na região sudeste do Estado de Goiás, mais especificamente na divisa entre os municípios de Catalão e Ovidor. Esse complexo, possui forma aproximadamente elíptica, medindo 6,0 km na direção NS (eixo maior) e 5,5 km na direção EW (eixo menor) e cobre uma área de aproximadamente 30 km². É composto por um núcleo de rochas ígneas que apresenta uma estrutura dômica circundada por um anel de rochas encaixantes resultantes da fenetização dos quartzitos (CARVALHO, 1974). A porção central do complexo é composta por carbonatito, foscorito e nelsonito, enquanto as regiões mais externas são constituídas por rochas ultramáficas flogopitizadas (CORDEIRO *et al.*, 2010).

O complexo Catalão II encontra-se a 15 km a nordeste do município de Catalão. Apresenta forma elíptica cujos eixos medem aproximadamente 5,0 km e 2,7 km, nas direções NE e SW, respectivamente. Essa intrusão encontra-se alojada em xistos, quartzitos e anfibolitos do Grupo Araxá (MACHADO JÚNIOR, 1991). Machado Júnior (1991) verificou a presença de quatro séries magmáticas no complexo Catalão II: dos sienitos, piroxenitos, carbonatítica e dos lamprófiros, além

de foscoritos que ocorrem entre as séries dos sienitos e carbonatítica. As reservas estão estimadas em 71,4 milhões de tonelada com teor médio de 11,1% de P_2O_5 (REPORT THE MOSAIC COMPANY, 2019). Atualmente, as operações estão sob responsabilidade da empresa Mosaic Fertilizantes do Brasil Ltda.

O complexo alcalino-carbonatítico de Serra Negra situa-se a leste do município de Patrocínio. Esse complexo apresenta estrutura dômica circular, com aproximadamente 10 km de diâmetro e encontra-se alojado em quartzitos do Grupo Canastra. Cerca de 70% do complexo é formado por dunitos, constituído predominantemente por olivina, mas também contém magnetita e flogopita, além de carbonato intercumulus, serpentina, clinohumita em pequenas quantidades. Os dunitos ocorrem desde o contato externo com quartzito encaixante, até próximo a porção central do domo. Há duas intrusões magnesiocarbonatito nas partes norte e central do complexo. No interior do magnesiocarbonatito ocorrem duas zonas com predomínio de veios e diques de calciocarbonatitos, no qual há porções muito ricas em apatita, classificadas como apatita calciocarbonatitos. Estes passam através de uma progressão gradual para cumulos foscoríticos, que são constituídos de apatita, carbonato, magnetita e tetra-ferriflogopita. Os depósitos de apatita são resultados da alteração supergênica dos carbonatitos com apatita e cumulos foscoríticos (GRASSO, 2010).

O complexo alcalino-carbonatítico de Araxá está localizado no município de Araxá, no Estado de Minas Gerais, cobrindo uma área de cerca 16 km². Esse complexo possui estrutura dômica, de forma circular com 4,5 km de diâmetro. O complexo consiste em rochas ricas em micas, lamprófiros e foscoritos, sendo a porção central constituída essencialmente por carbonatito dolomítico. Uma complexa rede de diques concêntricos e radiais, bem como pequenos veios, também ocorrem no complexo de Araxá (TRAVERSA *et al.*, 2001). Este encontra-se alojado em sequências metassedimentares Neoproterozóicas do Grupo Ibiá (SEER *et al.*, 2000). A empresa Mosaic Fertilizantes do Brasil Ltda é a atual detentora das operações de exploração do minério fosfático desse complexo. As reservas estão estimadas em 15,6 milhões de tonelada com teor médio de 11,8% de P_2O_5 (REPORT THE MOSAIC COMPANY, 2019).

O complexo alcalino-carbonatítico de Tapira encontra-se imediatamente a norte da cidade homônima e cerca de 30 km da cidade de Araxá, no Estado de

Minas Gerais. O complexo possui estrutura dômica, com forma aproximadamente elíptica, cujo eixo maior é cerca de 6,5 km na direção NS e o eixo menor é de 5,5 km na direção EW e cobre uma área de 35 km². (BEZERRA; BROD, 2011; BROD, 1999; SANTOS *et al.*, 2002). Encontra-se alojado em quartzito e filito do Grupo Canastra (MORAES; SEER, 2018). O complexo é formado principalmente por bebedouritos, carbonatito, serpentinito (dunito), glimerito, sienito, uncomangrito e diques potássicos ultramáficos (BROD, 1999). No complexo de Tapira as reservas estão estimadas em 619,5 milhões de toneladas com teor médio de 7,6% de P₂O₅ (REPORT THE MOSAIC COMPANY, 2019). A empresa Mosaic Fertilizantes do Brasil Ltda é a atual detentora das operações de exploração do minério fosfático desse complexo.

O complexo de Salitre, mais especificamente Salitre I, é objeto de estudo deste trabalho e será descrito de forma detalhada no item 2.3.

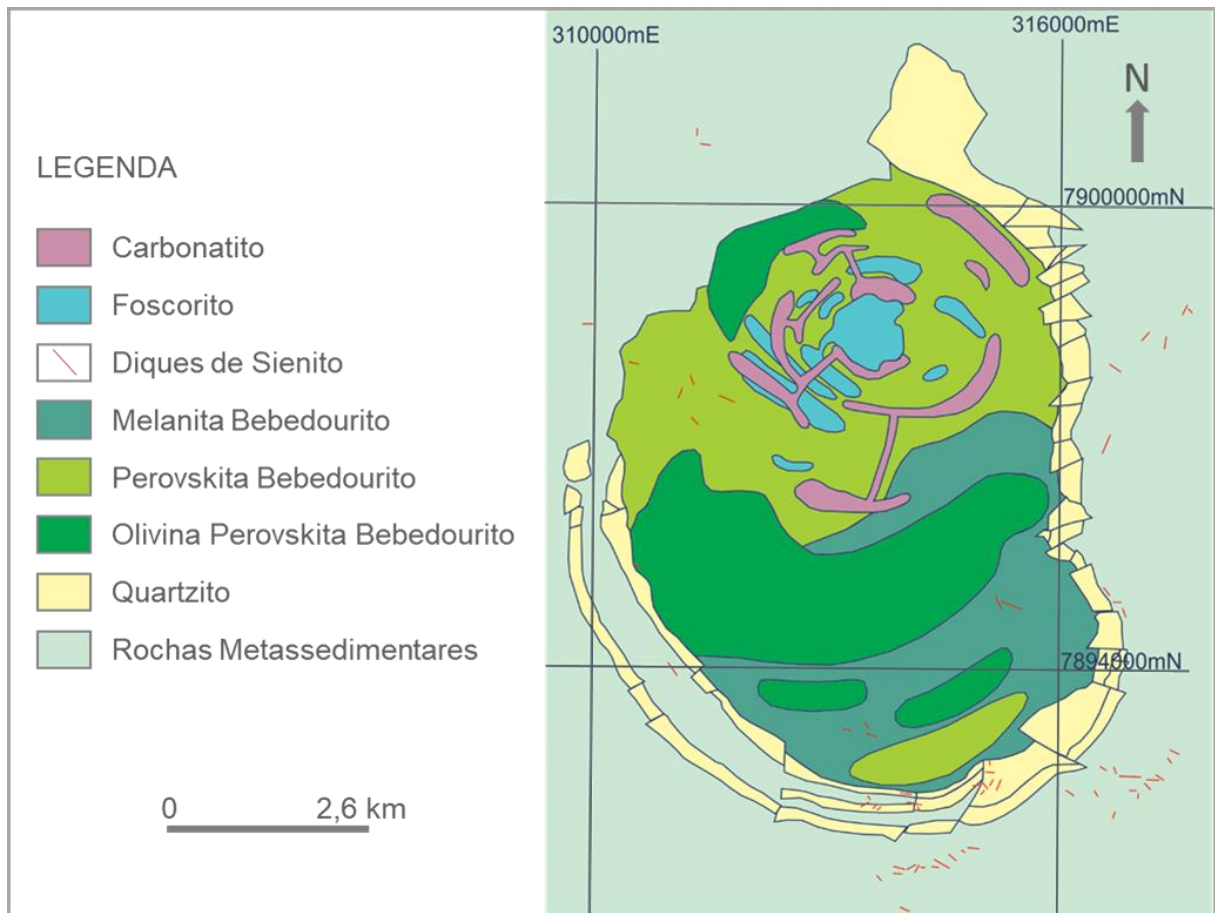
2.3 O Complexo Alcalino Carbonatítico de Salitre

O complexo de Salitre consiste em três intrusões principais: Salitre I, que apresenta forma oval distorcida, com cerca de 7 km na direção NS e de 5 km na direção EW, compreendendo uma área de 35 km²; um plug com área de 2.5 km² situado entre os complexos Salitre I e Serra Negra, denominado Salitre II; e um outro pequeno plug localizado a sul de Salitre I, denominado Salitre III, que não apresenta nenhuma estrutura de superfície (BARBOSA, 2009). A datação pelo método K/Ar em flogopita de bebedourito de Salitre I, forneceu uma idade de 86.3 ± 5.7 milhões de anos (Ma) (SONOKI; GARDA, 1988).

De acordo com Barbosa (2009) Salitre I é constituído por três sistemas intrusivos principais (Figura 3). No primeiro sistema a região centro-norte juntamente com uma menor porção ao sul são caracterizadas pela predominância de perovskita bebedouritos. Ainda nesse domínio, o extremo norte e centro-sul são dominados por uma fácies enriquecida em olivina, ao passo que na região centro-norte predominam bebedouritos ricos em perovskita, com ausência de olivina. Na porção sul do complexo predominam bebedouritos ricos em melanita, piroxênio e flogopita, que representam o segundo sistema intrusivo. O terceiro sistema é composto por diques anelares de carbonatito e foscrito, que ocorrem na porção norte do complexo. Os carbonatitos variam entre calcíticos e dolomíticos, e contém olivina, flogopita,

magnetita, ilmenita e pirocloro, além de sulfetos, como pirita, calcopirita e pirrotita. Os foscoritóides são constituídos por olivina, magnetita, apatita e flogopita. Pirocloro e sulfetos estão presentes na forma de acessórios.

Figura 3 - Mapa geológico de Salitre I.



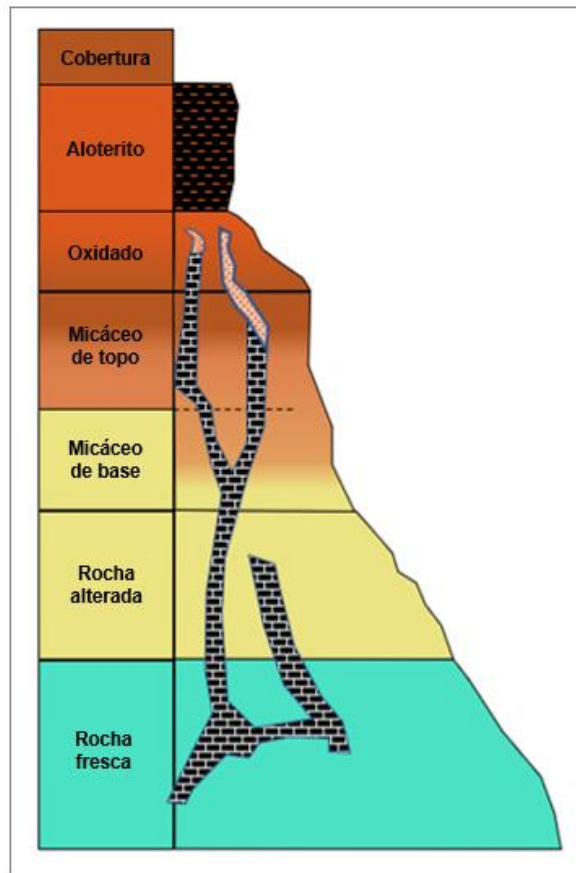
Fonte: Adaptado de BARBOSA (2009).

O depósito de apatita de Salitre I está localizado no manto de intemperismo desenvolvido sobre as rochas do complexo e é semelhante aos perfis observados em outros complexos como Araxá e Catalão. Os horizontes intempéricos são resultados da alteração supergênica de foscoritóides, bebedouritos e carbonatitos com apatita. Segundo Araújo (2015), a rocha fresca é alterada de forma gradual, da base para o topo do perfil.

Araújo (2015) propôs a divisão do perfil de intemperismo de Salitre I com base na mineralogia e na textura primária das rochas, da base para o topo: rocha fresca, rocha alterada, saprolito isalterito, saprolito aloterito, a partir de observações

macroscópicas e de campo. A Figura 4 representa as zonas intempéricas do depósito de Salitre I.

Figura 4 - Esquema das zonas intempéricas do depósito de Salitre I.



Fonte: Adaptado de GRASSO (2015).

A rocha fresca é caracterizada pela ausência de sinais visíveis de alteração intempérica e é constituída por cálcio e magnésio carbonatitos e olivina-bebedouritos e perovskita-bebedouritos com diferentes graus de metassomatismo devido a intrusões dos carbonatitos (ARAÚJO, 2015).

A rocha alterada é caracterizada pelo aparecimento de precipitações de óxidos-hidróxidos de ferro no contato entre os grãos de carbonato e pela remoção parcial do potássio em cristais de flogopita e tetraferroflogopita. Nesse horizonte é possível verificar a presença de carbonatos, os quais apresentam alteração parcial. A rocha alterada preserva parte da coesão, a cor e o conteúdo de apatita da rocha fresca, bem como mantém a textura da rocha original, devido a presença de

minerais mais resistentes ao intemperismo como flogopita, perovskita, magnetita e apatita. (ARAÚJO, 2015).

O saprolito isalterito mantém diferentes níveis de textura e estrutura da rocha fresca, embora ocorra o desenvolvimento abundante de minerais pelo intemperismo. A apatita ígnea original, ou metassomática, concentra-se de forma residual nesse perfil, bem como a apatita supergênica, recém-formada. O saprolito isalterito é subdividido em isalterito micáceo de base, isalterito micáceo de topo e isalterito oxidado, de acordo com a quantidade e tipo de filossilicatos. O isalterito micáceo de base é caracterizado pela abundância de micas semelhantes a flogopita, possui cor marrom-alaranjada, granulação média a grossa e é constituído por vermiculita, flogopita, argilas, perovskita, diopsídio, magnetita, apatita e por óxidos/hidróxidos de ferro, este em menor proporção. O isalterito micáceo de topo apresenta cor amarelo-marrom de granulação fina e é composto principalmente por argilas vermiculita, apatita, óxidos/hidróxidos de ferro, perovskita/anatásio, magnetita, óxidos de manganês e monazita. Esse horizonte é característico devido ao enriquecimento de apatita. Enquanto o isalterito oxidado é composto por uma grande quantidade de óxidos/hidróxidos de ferro, apatita, perovskita/anatásio, magnetita, óxidos de manganês, monazita e poucos ou nenhum mineral de argila (ARAÚJO, 2015).

O horizonte saprolito aloterito caracteriza-se pela quebra da estabilidade da apatita, sendo substituída por fosfatos secundários, ricos em alumínio. Este horizonte é subdividido em aloterito de base e aloterito de topo. O aloterito de base é composto por óxidos/hidróxidos de ferro, anatásio, caulinita, crandalita, magnetita, óxidos de manganês e monazita. Raramente é possível verificar a presença de pirocloro, observado apenas em microscópio eletrônico. Este horizonte possui material de granulação fina, de cor vermelho-amarelado e encontra-se bastante desagregado. O aloterito superior também apresenta granulação fina, cor laranja-amarelado e encontra-se completamente desagregado. É constituído por caulinita, óxidos/hidróxidos de ferro e gibbsita. Em menor proporção são observados anatásio, magnetita, perovskita, crandalita e quartzo. Este horizonte não apresenta acumulação residual econômica ou precipitação de fosfato, titânio ou elementos de terras raras (ARAÚJO, 2015).

No complexo de mineração de Patrocínio as reservas estão estimadas em 478,4 milhões de toneladas com teor médio de 12.1% de P_2O_5 (REPORT THE MOSAIC COMPANY, 2019).

2.4 Estoques de minério

Entende-se por estoques todo e qualquer depósito de mercadoria ou matéria prima para produção ou venda em data futura (GUARANYS *et al.*, 2013). Eles atuam como reguladores do fluxo de negócios. Geralmente, a velocidade em que determinado material é recebido é diferente da velocidade com que são consumidos, devido a uma série de incertezas e questões operacionais. Se existisse uma sincronia perfeita entre oferta e demanda, os estoques não seriam necessários (GRAZIANI, 2012).

Na mineração, assim como em outros segmentos de indústrias, realiza-se o armazenamento de material, cujos objetivos são: formação de reservas para continuidade das operações em épocas de chuvas, paradas previstas ou de emergência da mina; formação da pilha pulmão entre operações de períodos ou vazões diferentes; aguardar a chegada do meio de transporte do minério; necessidade de homogeneizar o material que alimenta as usinas de beneficiamento (CHAVES, 2012). Há diferentes formas de armazenar material oriundo da mina, sendo elas a estocagem em vagões ferroviários, a estocagem em silos e a estocagem em pilhas. A estocagem em vagões ferroviários, raramente praticada no Brasil, é aplicada para evitar duas etapas de transferência do material. A estocagem em silos é o caso característico de estoques intermediários ou de estoques de material em processamento durante o beneficiamento e, portanto, em quantidade reduzida (CHAVES; FERREIRA, 2012). A estocagem em pilhas por sua vez, é um método muito utilizado na mineração. Segundo Chaves e Ferreira (2012), a vantagem deste método em relação aos demais é permitir a estocagem de grandes quantidades, por longos períodos de tempo, e a custos relativamente baixos. No entanto, Carli (2018) ressalta que pilhas de minério estocadas por longos períodos podem apresentar avarias, tais como, perda do controle sobre a distribuição dos teores nas pilhas, segregação do minério, aumento dos custos de manutenção e reutilização das pilhas.

2.5 Operação e Beneficiamento do Minério Fosfático

A operação da mina de fosfato de Patrocínio ocorre em lavra a céu aberto. Após esta etapa, cerca de 77% do material é enviado ao sistema de britagem, e na sequência é empilhado na pera de estocagem; os outros 23%, após a lavra, já são empilhados, sem passar pela etapa de britagem. Estas porcentagens consideram a capacidade de operação do equipamento de britagem de forma a cumprir o plano de expedição.

De acordo com o relatório interno denominado '*Technical Report on the Mineral Resources Estimates for the Patrocínio Phosphate Deposit, Minas Gerais State, Brazil*' (2020), após o empilhamento, todo o material é carregado nos vagões do trem e transportado via ferroviária por 200 km ao Complexo Minerquímico de Araxá.

Em Araxá, o minério segue para dois destinos: as usinas de beneficiamento, onde será tratado para a produção de concentrado fosfático e/ou é encaminhado para os estoques, de onde posteriormente serão retomados para alimentação das usinas.

O beneficiamento do minério fosfático é constituído por diferentes operações unitárias: britagem, formação das pilhas de homogeneização, retomada, moagem, classificação, separação magnética de baixa intensidade (SMBI), deslamagem, condicionamento, flotação de barita e flotação de apatita. Em geral, o beneficiamento das diversas usinas de fosfato ígneo apresenta grande semelhança. As diferenças ocorrem, principalmente, devido a variações na escala de produção e nas especificações dos produtos finais.

Neste item será apresentado o circuito de beneficiamento da Usina 311 do Complexo Minerquímico de Araxá (Figura 5), cujas informações foram extraídas do relatório interno denominado '*Descritivos de Processos - Complexo Minerquímico de Araxá*' (2011) e do trabalho de Rocha (2013).

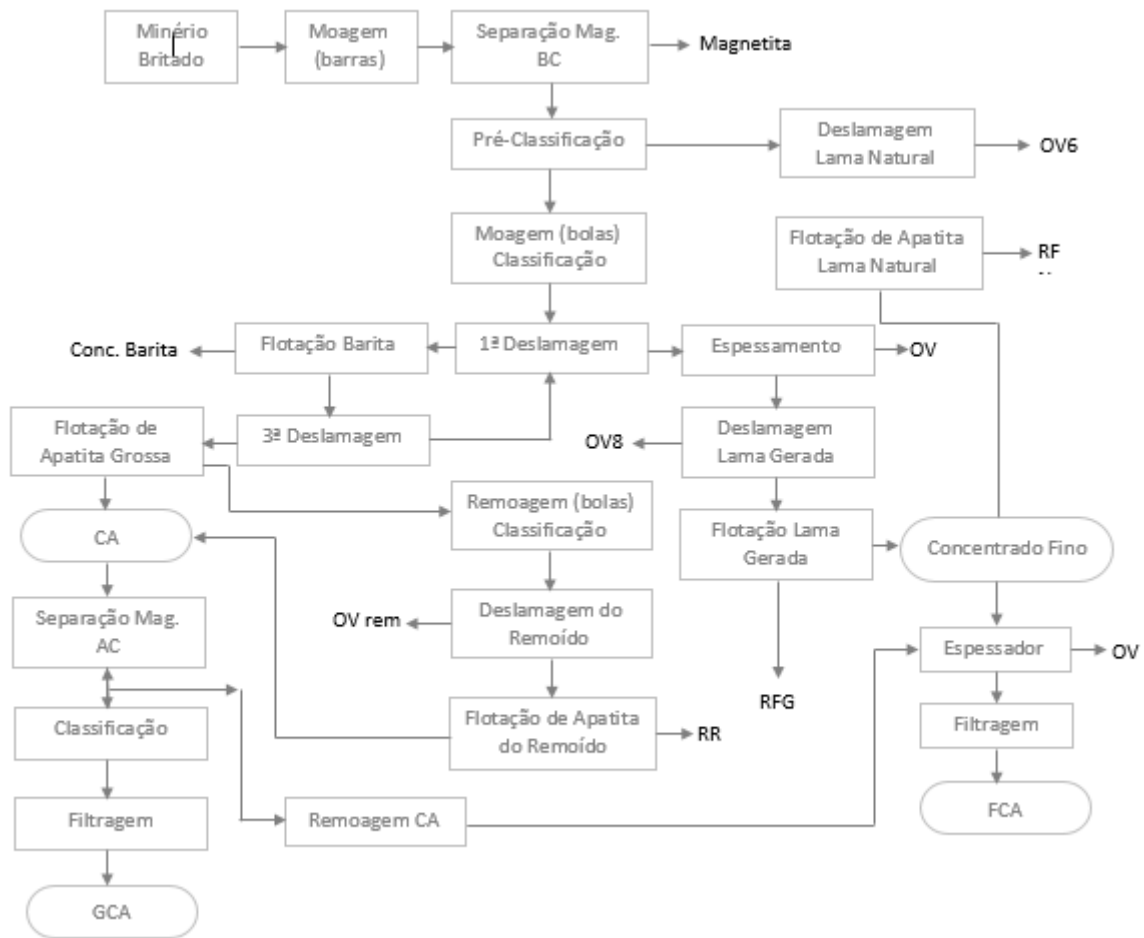
Após a lavra, o minério é enviado à etapa de britagem. A Britagem I é equipada com um britador de mandíbulas, com capacidade nominal de 1200 t/h. A Britagem I abastece a Usina 311 com minério blendado da mina de Araxá com o minério proveniente da mina de Patrocínio em alguns períodos do ano e em outros a usina é alimentada apenas com o minério da mina de Patrocínio.

Todo o minério é direcionado por meio de caminhões que são basculados em um silo com capacidade de 73 m³ e, deste, segue através de um transportador de correia para uma grelha vibratória com três *decks*. O *oversize* (material retido na grelha) do primeiro e do segundo *decks* é encaminhado para o britador de mandíbulas com *top size* de 950 mm (britagem primária). O material passante (*undersize*) no terceiro *deck* da grelha vibratória juntamente com o produto da britagem primária são direcionados para a britagem secundária, por meio de transportadores de correia.

Este material passa por uma classificação na qual o minério acima de 50.8 mm é transferido para uma pilha intermediária que posteriormente é retomada para alimentar o britador de barras de impacto (britador secundário). Já o material classificado abaixo de 50.8 mm segue junto com o produto da britagem secundária, por meio de transportadores, para a formação da pilha de homogeneização.

As pilhas de homogeneização apresentam capacidades em torno de 35.200 toneladas. Sua formação tem como objetivo distribuir todo o material de forma uniforme no que tange a granulometria, teores de P₂O₅ e contaminantes. Estas são formadas por meio do stacker (empilhadeira), que distribui o material ao longo do pátio de forma contínua para se formar uma pilha homogeneizada longitudinal do tipo chevron.

Figura 5 - Fluxograma do beneficiamento da Usina 311.



Fonte: Adaptado de DESCRITIVO DE PROCESSOS (2011).

A pilhas homogêneas alimentam o circuito de moagem primária, realizada em moinho de barras, que reduz o tamanho das partículas para 10% retido na malha de 10# (1,70 mm). Doravante, todo o processo é realizado a úmido.

O produto da moagem primária alimenta um circuito de separação magnética em que a magnetita é separada do minério por meio de deztoito separadores de baixo campo (900 Gauss) e bombeada para barragem de rejeitos exclusiva. O produto não magnético alimenta a pré-classificação. Este circuito de separação magnética opera com recuperação média em apatita de 98% e de magnetita de 85%.

O *underflow* da pré-classificação é direcionado à classificação da moagem de bolas, e o *underflow* da classificação alimenta o moinho de bolas. O *overflow* da pré-classificação são as lamas naturais, que alimentam a os circuitos de deslamagem de ultrafinos. O *overflow*, produto da classificação da moagem de

bolas, alimenta a deslamagem da etapa de grossos, composta por duas etapas de cicloneamento. A segunda etapa é alimentada com o *underflow* da primeira, e o *overflow* da segunda etapa alimenta a primeira etapa. O *overflow* da primeira etapa alimenta a deslamagem de finos gerados. O *underflow* da segunda etapa alimenta o condicionamento do circuito de grossos.

A etapa de condicionamento é realizada em duas partes: na primeira condiciona-se o depressor (fubá gelatinizado com soda cáustica) e, na segunda parte, o coletor (óleo de arroz saponificado). Reagentes como a soda controlam o pH do sistema, gelatinizam o amido e auxiliam na preparação das partículas atuando na superfície específica. Os coletores tornam hidrofóbicas as superfícies das partículas, enquanto o depressor modifica seletivamente a superfície de determinados minerais impedindo a sua coleta.

Após o condicionamento iniciam-se as etapas de flotação por colunas, processo de concentração mineral atuante nas distintas características de superfície entre minerais com variados graus de hidrofobicidade. O minério condicionado em forma de polpa alimenta a etapa rougher da flotação, com sistemas de recirculação e a aeração através de borbulhadores. O concentrado rougher alimenta uma caixa de polpa que direciona o fluxo para a etapa cleaner.

O rejeito rougher alimenta a etapa de cicloneamento. O *overflow* desta etapa é encaminhado para o espessador de água recirculada. O condicionamento da etapa de flotação scavenger é alimentado com o *underflow* do ciclone. O concentrado scavenger retorna para etapa rougher e o rejeito, após adensado, é direcionado à barragem. O concentrado cleaner é o produto final da flotação. O concentrado cleaner passa por duas etapas de classificação para extração de finos e adequação da porcentagem de sólidos, para na sequência alimentar a filtração.

A deslamagem é composta por duas etapas de cicloneamento. A segunda etapa é alimentada com o *underflow* da primeira, e o *overflow* da segunda etapa retorna à alimentação da primeira etapa. O *underflow* da segunda etapa de deslamagem alimenta o condicionamento do circuito de finos.

As flotações dos finos gerados e dos finos naturais são realizadas em circuitos separados. Os concentrados das duas flotações são direcionados ao espessador de concentrados finos. Os concentrados finos são denominados FCA (Fine Concentrated Apatite).

O concentrado de etapa da flotação *cleaner* de grossos alimenta a classificação da filtragem. O *underflow* é direcionado ao filtro de mesa, e o *overflow* junta-se ao filtrado para alimentação da reclassificação. O *underflow* da reclassificação é direcionado ao circuito de espessamento/filtragem do FCA.

O concentrado de grossos filtrado (GCA - *Gross Concentrated Apatite*) é pesado e transportado ao pátio de estocagem. O GCA é submetido a etapa de secagem. Na sequência, é armazenado em silos e está pronto para expedição ou consumo na unidade de Araxá.

Os concentrados finos provenientes das flotações de finos naturais e finos gerados e o *underflow* da reclassificação do circuito de grossos alimentam o espessador. O *underflow* do espessador é bombeado para a alimentação do filtro. O FCA úmido é armazenado em galpão e/ou a céu aberto, para posteriormente ser expedido ou para consumo interno.

2.6 Caracterização mineralógica de minérios

A caracterização mineralógica consiste na identificação de toda a assembleia mineralógica da amostra e as avaliações semiquantitativas ou quantitativas dos constituintes. Além disso, estuda a textura do minério de forma a definir o tamanho da partícula para a liberação do(s) mineral(is) de minério dos minerais de ganga, bem como define várias propriedades físicas e químicas dos minerais (NEUMANN *et al.*, 2010).

As informações obtidas por meio da caracterização mineralógica podem ser utilizadas para direcionar o desenvolvimento de fluxograma de beneficiamento; para compreender o comportamento dos minerais do minério em um determinado processo de beneficiamento e/ou metalúrgico; para determinar a qualidade dos produtos atingidos em diferentes tipos de ensaios e completar os estudos da jazida (PORPHÍRIO *et al.*, 2010).

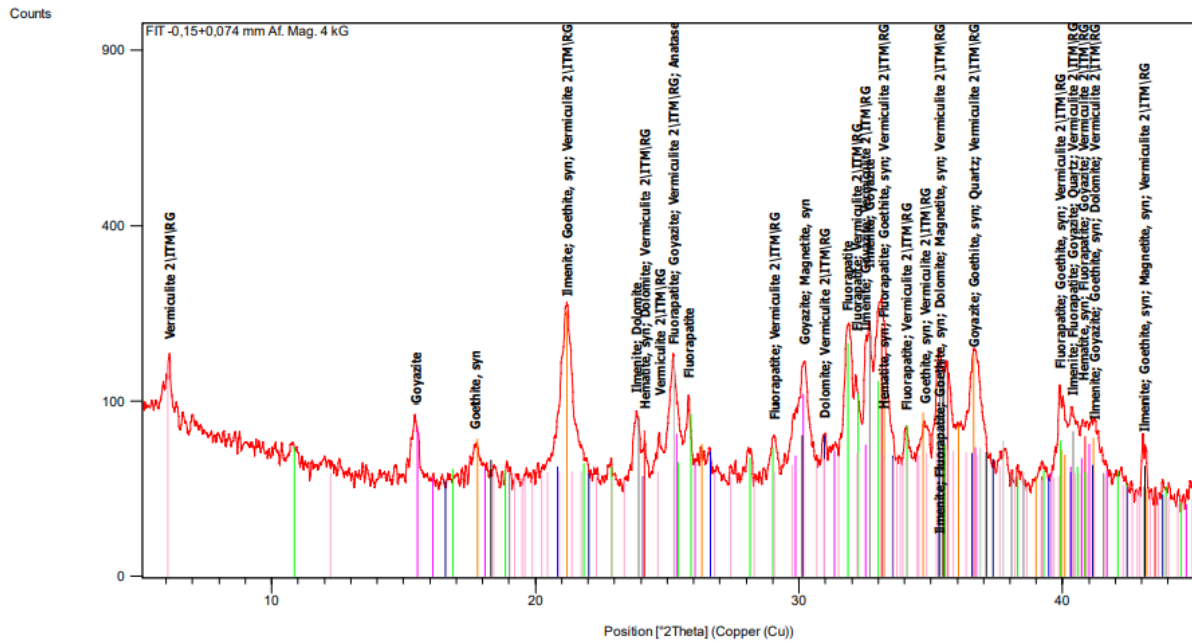
Os minerais são identificados por meio de propriedades que os definem como mineral: a composição química, a estrutura e as suas propriedades físicas. Os métodos mais empregados para identificação dos minerais em escala microscópica são as microscopias ópticas (lupa, estereomicroscópio, microscópio petrográfico de luz transmitida e de luz refletida) e eletrônica, e a difração de raios X (NEUMANN *et al.*, 2010).

Nos estudos de microscopia óptica com lupa ou estereomicroscópio os minerais são identificados por cor, brilho, clivagens, hábito, fratura e há também técnicas auxiliares diretas: punção com alfinete para confirmar pintas de ouro, delaminar micas e vermiculita, interação com imã e testes microquímicos (NEUMANN *et al.*, 2010). A lupa ou estereomicroscópio são equipamentos utilizados praticamente de forma padrão em uma análise expedita de uma amostra, com o objetivo de identificar os minerais mais comuns, avaliar os tamanhos dos cristais e estimar de forma visual o tamanho de liberação (NEUMANN *et al.*, 2010).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um outro equipamento fundamental na identificação dos minerais, principalmente quando acoplado a um espectrômetro de dispersão de energia (EDS), que permite determinar elementos químicos em pontos de até 2 μm de diâmetro. As imagens geradas que apresentam maior relevância em tecnologia mineral são as de elétrons retroespalhados, ou seja, os elétrons do feixe que se chocam com as eletrosferas dos átomos e são arremessadas de volta, e são detectados em um detector que contorna a abertura inferior da coluna de elétrons. Nas imagens geradas, o nível de cinza é proporcional ao número de elétrons, e conseqüentemente ao peso atômico médio em cada pixel da imagem, o que a torna, de maneira indireta, uma imagem composicional (NEUMANN *et al.*, 2010).

A difração de raios X (DRX) trata-se de uma ferramenta utilizada para identificação de minerais. Esse método promove a interação de ondas na frequência de raios X (no geral entre 0,70 e 2,30 Å) com os planos de repetição sistemática do retículo cristalino e como resultado obtém-se o difratograma, como exemplificado na Figura 6. A difração de raios X é também a técnica que mais se aplica à investigação dos argilominerais, devido à baixa granulometria natural ($< 2 \mu\text{m}$) destas espécies minerais. É ainda utilizada na determinação da composição de soluções sólidas ou séries isomórficas dos grupos das olivinas, piroxênios e plagioclásio (PORPHÍRIO *et al.*, 2010).

Figura 6 - Modelo de difratograma.



Fonte: ULIANA (2010).

A técnica de fluorescência de raios X é considerada atualmente a técnica universal de análise de materiais. Essa técnica consiste na irradiação de um feixe primário de raios X sobre a amostra, causando o processo de excitação dela, e resultando na produção de uma radiação secundária devido a característica dos elementos químicos presentes. Sendo assim, essa técnica permite a identificação dos elementos, bem como sua quantificação. As análises semiquantitativas são realizadas de forma comparativa das alturas dos picos com os espectros-padrão; a análise quantitativa, por sua vez, é obtida por meio da medida das linhas do espectro característico dos elementos de interesse e da interação dessas intensidades com a sua concentração na matriz onde encontram-se dispersos (PORPHÍRIO *et al.*, 2010).

2.7 A Rastreabilidade do Minério

A garantia da qualidade e das especificações de um produto de minério requer alta precisão no controle de processo, desde a matéria-prima até a entrega do produto. Este controle envolve o conhecimento das características e propriedades do minério, dos parâmetros de processo, além da logística para armazenamento e transporte do material (ISOKANGAS *et al.*, 2012).

A rastreabilidade do minério é uma ferramenta para a melhoria do controle de toda a cadeia produtiva, ou seja, é a “capacidade de recuperar o histórico, a aplicação ou a localização daquilo que está sendo considerado”. Sendo assim, avaliando o minério, a rastreabilidade está relacionada com a origem do material e seu histórico de processamento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

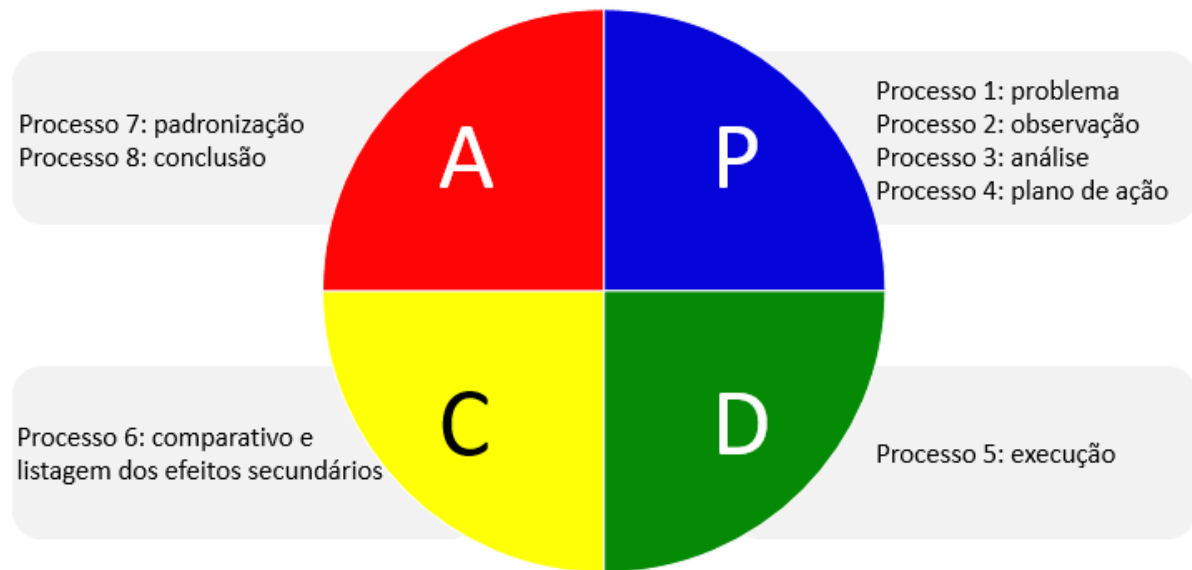
A capacidade de rastrear um minério da mina até a usina é fundamental para o controle, ajuste e otimização das operações, proporcionando a correlação das características e qualidades do minério com parâmetros operacionais e maior eficiência dos processos de reconciliação mina-usina.

Dessa forma, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de melhorar o controle nas operações de mina à usina de beneficiamento mineral/plantas químicas.

Grasso (2005) desenvolveu o trabalho de implementação da rastreabilidade do minério do Complexo Mineroquímico de Catalão (CMC) para controle da produção de ácido fosfórico no Complexo Industrial de Piaçaguera (CPG). Neste trabalho a autora teve como objetivo a implementação da rastreabilidade para auxiliar as unidades envolvidas na solução de problemas de interface química/mineral visando também promover uma maior integração entre fornecedor-cliente.

Grasso (2005) desenvolveu seu trabalho baseado na metodologia PDCA (*Plan, Do, Check e Act*), conforme a Figura 7 que significa Planejar, Executar, Verificar e Atuar, na língua portuguesa. Essa metodologia foi desenvolvida por Walter A. Shewhart na década de trinta, e, posteriormente, aprimorada por W. Edward Deming.

Figura 7 - Metodologia do ciclo PDCA aplicada.



Fonte: Adaptado de PETERS (1998).

A fase de Planejamento foi subdividida em quatro etapas, sendo estas nomeadas pela autora como Processo 1 (problema), Processo 2 (observação), Processo 3 (análise) e Processo 4 (plano de ação). Como uma oportunidade de melhoria para a empresa, o problema selecionado foi a dificuldade de implementação da rastreabilidade. No Processo 2, a autora conseguiu identificar as características desse problema através da coleta de dados (planejamento de lavra, programação de pilhas, bombeamento, confecção das semi-pilhas no terminal, confecção dos lotes de rastreabilidade, recebimento e descarregamento no Armazém Arex – CPG, e consumo de rocha pela planta de produção do ácido fosfórico (U-7500)) e da observação no local (geologia de campo, expedição de rocha dos filtros estáticos, formação e expedição dos lotes de rastreabilidade, recebimento e descarregamento CPG, e planta U-7500). Nesta etapa a autora ainda definiu o cronograma de atividades em cada fase do ciclo PDCA, bem como orçamento e meta do trabalho.

No Processo 3, foram identificadas as possíveis causas da dificuldade de implementação da rastreabilidade do minério do CMC ao CPG, sendo identificadas dezoito causas, organizadas no Diagrama de Causa e Efeito. Na sequência foram selecionadas e analisadas as causas mais prováveis, concluindo em doze, julgadas causas potenciais. Dessas doze, duas já estavam sendo trabalhadas e uma

requeriu um estudo separado. Dessa forma, seguiu-se para elaboração do plano de ação (Processo 4), que consistiu em planejar o bloqueio das nove causas potenciais aplicando o 5W2H, com o objetivo de atingir de forma direta a causa fundamental do problema. A ferramenta 5W2H funciona como um plano de ação e recebe esse nome por unir sete perguntas na língua inglesa, sendo 5 iniciadas com W e duas iniciadas com H: what (o quê), when (quando), who (quem), where (onde), why (por quê), how (como) e how much (quanto).

A fase de Execução (Processo 5) foi integrada pela confecção de planilha com todos os dados de produção compilados, adição do número do lote na nota fiscal, rastreabilidade do lote (teste), balanço dos contaminantes por lote (teste), análise da performance da planta com consumo da rocha (teste), liberação do espaço do armazém e regulação entre expedição e consumo de rocha.

Na fase de Verificação (Processo 6), realizou-se um comparativo da situação antes e depois de cada etapa executada no Processo 5. Além disso, realizou-se a listagem dos efeitos secundários, avaliando como efeitos positivos a regularização entre expedição de rocha do CMC e o consumo de rocha no CPG, a melhoria na relação fornecedor – cliente, o comprometimento entre as unidades e a adequação dos parâmetros operacionais de acordo com os teores de contaminantes da rocha consumida. Não foram identificados efeitos negativos.

A fase de Ação foi subdividida em padronização (Processo 7) e conclusão (Processo 8). O Processo 7 teve como objetivo prevenir o reaparecimento do problema da dificuldade de implementação da rastreabilidade do minério de Catalão. Dessa forma, criou-se a Instrução Técnica de Trabalho (ITT) sobre os procedimentos de rastreabilidade, realizou-se o treinamento dos colaboradores envolvidos e disponibilizou as informações no sistema SAP/R3.

Por fim, no Processo 8 a autora conclui que a metodologia desenvolvida possibilita a rastreabilidade do minério desde sua extração até seu consumo na planta de produção de ácido fosfórico, permitindo solucionar problemas de interface minero-química com maior facilidade e controlar a performance da referida planta por lotes.

Outro trabalho que descreve o processo de rastreabilidade do minério, porém este de forma mais automatizada, é o de ISOKANGAS *et al.* (2012), que por meio do sistema SmartTag™ da empresa Metso permite rastrear o minério da mina

até a usina. Os autores apresentam como está sendo utilizado esse sistema, os benefícios de sua utilização, bem como apresentam dois estudos de caso com essa aplicação.

SOUSA *et al.* (2017) também apresentam em seu trabalho a aplicação da rastreabilidade através do sistema SmartTagTM na Mina de cobre do Salobo/Vale, onde as SmartTags são inseridas nas pilhas de desmonte com espaçamento de 15 metros e georreferenciado. Esse sistema permite que sejam tomadas ações preditivas para preparação da planta de beneficiamento para recebimento do minério.

Sendo assim, a rastreabilidade se mostra como uma ferramenta importante de controle de processo.

3 METODOLOGIA

3.1 Mapeamento das etapas no fluxo do minério

Essa foi a primeira fase desenvolvida no trabalho, em que foram avaliadas as principais etapas percorridas pelo minério, desde a lavra em Patrocínio até sua alimentação na usina em Araxá.

Para mapeamento das etapas no fluxo do minério em Patrocínio, foram realizadas reuniões online com o engenheiro de planejamento de curto prazo da área, nas quais foram apresentados e alinhados todo o processo do minério nessa unidade. Nesse momento também foram repassados os locais de rede da empresa que contêm as informações referentes a cada etapa.

Na unidade de Araxá foram realizadas reuniões com o geólogo do planejamento de curto prazo, de forma semelhante à que foi realizada na unidade de Patrocínio. Foram abordadas questões referentes ao fluxo do minério em Araxá e disponibilizados os caminhos da rede para acessos aos arquivos de cada etapa.

3.2 Levantamento de dados

Para suporte e análises, neste trabalho foram levantados dados das programações e execuções de pilhas em Patrocínio e em Araxá, da expedição do minério em Patrocínio e de dados da usina de beneficiamento mineral de Araxá (Usina 311).

Os dados das programações de pilhas em Patrocínio foram obtidos através de planilhas em um formato padrão que são geradas e disponibilizadas na rede da empresa pela equipe de planejamento de curto prazo da unidade de Patrocínio. A planilha contempla o número de identificação da pilha formado por 3 dígitos, a data de programação, se o minério dessa pilha será britado ou não, informações de mina, que indicam a origem do minério (a frente lavra, a cota do banco, avanço e número de viagens), dados da alimentação da usina, referentes a qualidade do minério, como os teores dos óxidos (P_2O_5 ap, P_2O_5 , MgO , Fe_2O_3 , SiO_2 , dentre outros) e a relação CaO/P_2O_5 . Adicionalmente, há informações de tipologia, domínio, consistência, massa e volume do minério que irá compor a pilha.

Os dados de minério executado das pilhas de Patrocínio foram obtidos através da planilha denominada "CMP - OQE - 2021.xlsm". Tais dados também são gerados e disponibilizados pela equipe de planejamento de curto prazo da unidade de Patrocínio. A planilha contém a data em que a pilha foi executada, o número de identificação da pilha formado por 3 dígitos, número de viagens, dados da alimentação da usina, referentes a qualidade do minério, como os teores dos óxidos (P_2O_5 ap, MgO, $BaSO_4$, Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 , P_2O_5 , CaO, Al_2O_3 , BaO e MnO) e a relação CaO/P_2O_5 , informações de tipologia, domínio, consistência, massa e volume do minério que irá compor a pilha. Além disso, contém informações do concentrado (rendimento mássico, recuperação, recuperação na flotação, P_2O_5 , Fe_2O_3 e SiO_2) e a porcentagem de material por frente de lavra.

Os dados das programações de pilhas de Araxá foram gerados e disponibilizados na rede da empresa pela equipe de planejamento de curto prazo da unidade de Araxá. Essas planilhas são compostas por informações como o número de identificação da pilha formado por 4 dígitos, a área de origem do minério. Adicionalmente, as programações de pilhas em Araxá contêm dados sobre a participação de minério proveniente de cada área, qualidades do minério bem como sua tipologia, domínio, consistência, massa e volume.

Os dados de expedição do minério foram obtidos através do Relatório Diário de Ocorrências Ferroviárias (RDO), que contém o número da(s) pilha(s) que será(ão) expedida(s), o código da composição, o tipo de vagão, número da nota fiscal, a data e horário de expedição, a massa total expedida e a qualidade do minério da expedição.

Os dados de produção da Usina 311 foram obtidos por meio do software Usina I, desenvolvido internamente. Através deste foi possível obter informações diárias sobre as pilhas que alimentaram a usina, as horas de operação, massas e qualidades do minério na alimentação. Ainda, foi possível verificar os dados de recuperação mássica e recuperação metalúrgica dia a dia, bem como os teores e massas obtidos de GCA e FCA.

3.3 Consolidação e análises dos dados

Todos os dados levantados, citados no item 3.2, foram consolidados na forma de base de dados no Microsoft Excel. Posteriormente, a base de dados foi

importada para o software *Microsoft Power BI Desktop*, versão 2.87.684.0 64 (novembro de 2020), no qual foram realizados o acompanhamento e o controle do processo.

Dessa forma, as análises foram realizadas por meio de gráficos que possibilitaram identificar quais pilhas estão sendo programadas e executadas em Patrocínio, quais estão sendo expedidas, programadas e executadas em Araxá e qual está sendo alimentada na usina. Ainda, os gráficos permitiram uma análise das qualidades do minério, como teores e recuperações, bem como o domínio, tipologia e sua quantidade em massa e volume, em cada etapa do processo.

3.4 Pilhas rastreadas

Como forma de controlar e conhecer o minério que alimenta a usina, definiu-se a estratégia de operar pilhas rastreadas, as quais, quando descarregada em Araxá, são transportadas para estoques, onde são amostradas por pó de perfuratriz, para posterior retomada e alimentação completa destas na usina. Sendo assim, nessa metodologia aplicada não ocorre a estocagem de parte da pilha proveniente de Patrocínio em estoques em Araxá. Portanto, não houve a retomada de material de Patrocínio nos estoques de Araxá para a blendagem, bem como não houve a blendagem da pilha de Patrocínio com o minério da mina de Araxá. Logo, a Usina 311 foi alimentada com pilhas rastreadas, compostas 100% pelas pilhas executadas em Patrocínio.

As pilhas formadas em Patrocínio são denominadas com um número de 3 dígitos, enquanto as pilhas de Araxá são identificadas por 4 dígitos numéricos. As pilhas rastreadas (Araxá:Patrocínio) no presente trabalho são: 7640:476, 7641:475, 7642:460, 7643:480, 7645:483, 7646:485, 7653:488, 7654:489, 7655:494, 7658:496, 7659:499, 7662:500, 7665:497, 7666:507, 7668:504, 7669:515 e 7670:517.

3.4.1 Desempenho das pilhas rastreadas na Usina 311

Através do *dashboard* desenvolvido no *Power BI Desktop*, foram realizadas análises de desempenho da Usina 311 para todas as pilhas rastreadas,

correlacionando suas origens (região de lavra) e as variações das tipologias e dos domínios com a performance da usina.

3.4.2 Análise Mineralógica das Pilhas Seleccionadas

Após análise do desempenho das pilhas rastreadas, foram seleccionadas amostras das pilhas 7640:476 e 7641:475 para a análise mineralógica expedita, executada no laboratório da Mosaic da unidade de Tapira e a caracterização mineralógica detalhada, realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

A partir lavra utilizadas para a confecção dessas pilhada amostra obtida por pó de perfuratriz, o material das pilhas foi submetido a testes de caracterização mineralógica na planta piloto da Mosaic, na unidade de Araxá. Durante o teste coletou-se amostras da alimentação da flotação de grossos (AN) e do produto magnético para envio à unidade de Tapira.

No laboratório da unidade de Tapira foram realizadas as análises mineralógicas expeditas, em que as imagens foram capturadas por um estereomicroscópio da marca Leica, modelo M205 C com câmera DFC310 FX.

Posteriormente, as amostras de cada pilha, com massas da ordem de 1,0 kg cada, foram enviadas para o LCT-EPUSP, onde realizou-se o estudo mineralógico detalhado por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Quanta 650 FEF (FEI) com o software Mineral Liberation Analyser – MLA e o sistema de microanálise por espectrômetro por dispersão de energia - EDS Esprit (Bruker). As imagens digitais geradas foram processadas, obtendo-se a composição mineralógica, a partição dos elementos químicos de interesse dentre os minerais portadores, as associações e liberação dos minerais de interesse, e a estimativa da recuperação potencial versus teor de P.

A análise mineralógica por difração de raios X foi realizada pelo método do pó, em difratômetro de raios X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO, com detector X'Celerator sensível à posição. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação dos difratogramas obtidos com o banco de dados do ICDD – *International Centre for Diffraction Data*.

A avaliação qualitativa e semi-qualitativa dos elementos químicos presentes nos diversos minerais constituintes da amostra foi realizada no microscópio modelo Stereoscan 440, marca LEO, com espectrômetro de raios X por dispersão de energia (EDS) INCA, marca Oxford, com detector de Si; a avaliação de apatita foi efetuada quanto à resposta ao detector de catodoluminescência.

Análises químicas quantitativas foram efetuadas por fluorescência de raios X, em pastilhas fundidas, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Malvem Panalytical, modelo Zetium.

3.5 Análise de aderência

Realizou-se uma análise de aderência dos teores dos óxidos e dos dados geometalúrgicos entre o modelo planejado de Patrocínio e os resultados obtidos pelas amostras do pó de perfuratriz.

Para isso, utilizou-se os dados químicos e geometalúrgicos das pilhas de minério planejadas de Patrocínio 476 e 475, obtidos a partir do modelo de blocos de curto prazo de Patrocínio (Planejado (Modelo CMP)); os dados referentes ao minério executado, por sua vez, foram obtidos a partir das caracterizações tecnológicas das amostras coletadas por pó de perfuratriz nas pilhas 476 e 475 em Araxá (Executado (Amostra PP-CMA)) (APÊNDICE E). As informações foram consolidadas no Microsoft Excel na forma de tabelas e gráficos, aplicando um desvio padrão de $\pm 10\%$ para analisar a aderência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Mapeamento das etapas relevantes no fluxo do minério

Inicialmente, de acordo com os planos de lavra mensais, são selecionados avanços de lavra para a formação de pilhas que alimentarão a usina. Estas pilhas são compostas pela blendagem de 4 a 8 avanços, sendo que estes podem ser provenientes da cava norte, cava sul e cava leste da mina de Patrocínio (Figura 8). A lavra ocorre em bancadas por meio do desmonte mecânico, e, nas regiões de minério compacto, aplica-se o método de desmonte por explosivos.

Figura 8 - Mapa da mina de Patrocínio dividida em cava norte, sul e leste.



Após a lavra o material é transportado e pode seguir dois caminhos: ser empilhado para posterior expedição ou enviado ao sistema de britagem e na sequência empilhado para expedição. Cerca de 77% do material lavrado anualmente é enviado para britagem em Patrocínio, que irão compor pilhas de 30.000 tonelada em base úmida (tbu) e, os outros 23%, que não passam pela britagem, compõem

pilhas com cerca de 20.000 tbu. Todo o material é expedido via ferroviária para a unidade de Araxá, sendo aqueles não britados enviados na composição do tipo GFE (gôndola do tipo fechada) e o material britado enviado tanto pela composição do tipo HAE (hopper do tipo aberta) quanto pela composição GFE.

O material transportado pela composição GFE é descarregado na parte superior do vagão através de cham shell, no Pátio de Contingência em Araxá. A descarga do material que chega pela composição HAE é realizada no Pontilhão em Araxá. As comportas dos vagões são abertas e o material cai por gravidade. Na sequência, tanto o material da composição GFE quanto a composição HAE são transportados e alimentam de forma direta a etapa de britagem, sendo que cerca de 10% do material de cada pilha é encaminhado para os estoques em Araxá, como estratégia da empresa pois, em casos de falta de material, este é retomado.

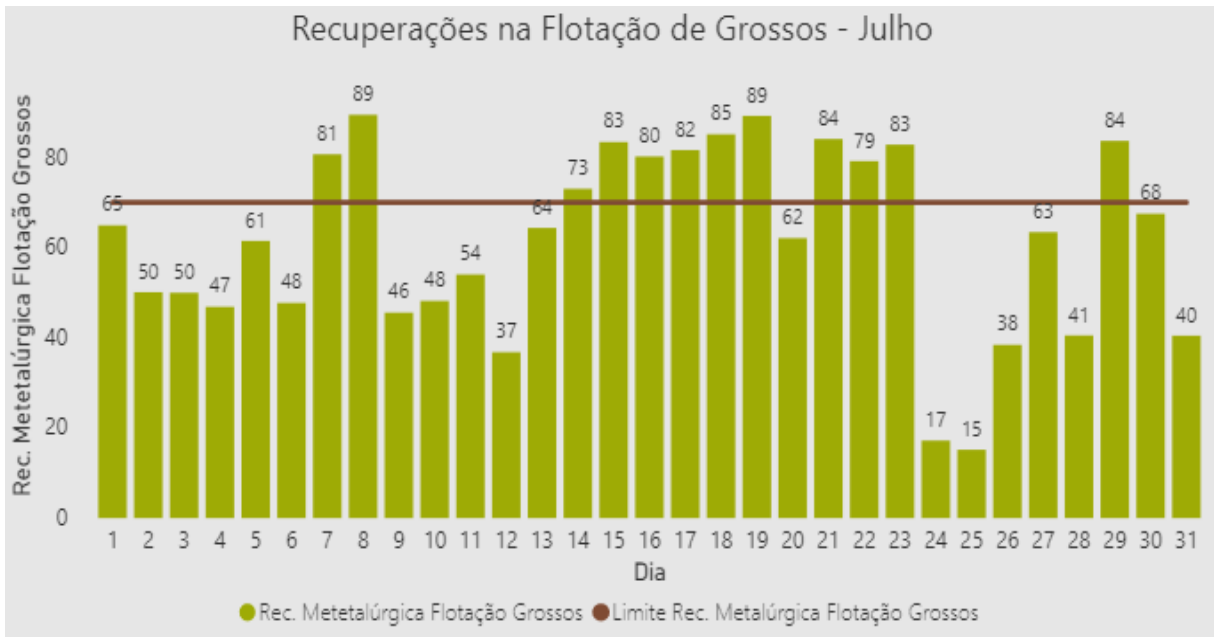
Em Araxá ocorre uma reprogramação de pilhas, sendo que estas podem ser constituídas por material de pilhas de Patrocínio, material de Patrocínio estocado em Araxá, minério lavrado diretamente da mina de Araxá e minério de estoque da mina de Araxá.

4.2 Desempenho das pilhas rastreadas na Usina 311

Este item apresenta os resultados de desempenho da Usina 311 referentes aos meses de julho a outubro de 2021, que foram avaliados por meio da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos, tomando como referência o limite mínimo aceitável de 70%.

O gráfico da Figura 9 contém os resultados de desempenho da Usina 311 no mês de julho.

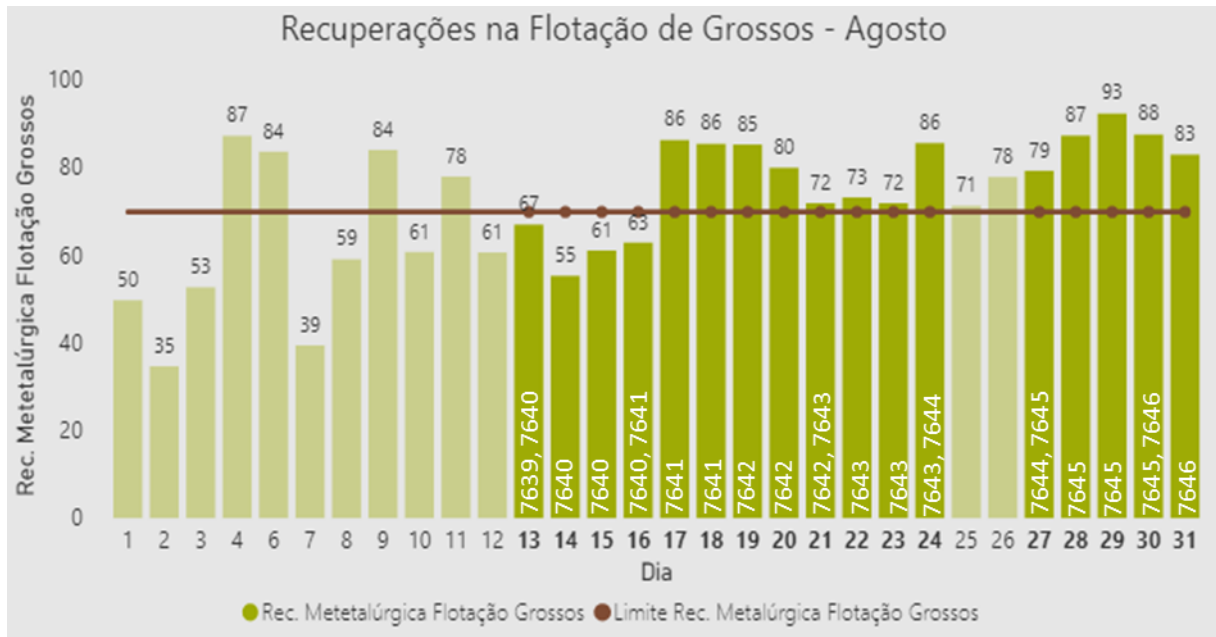
Figura 9 - Resultados da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos – julho.



Conforme apresentado na Figura 9, observa-se uma grande oscilação de desempenho da Usina 311. Verifica-se que no mês de julho, em mais de 60% dos dias de operação, a Usina 311 não atingiu o desempenho satisfatório de no mínimo 70% de recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos. Essa variação pode ser decorrente de descontinuidades operacionais da Usina 311 devido a fatores de manutenção e de operação e, adicionalmente, devido à falta de rastreabilidade do minério de Patrocínio que alimenta a usina de Araxá.

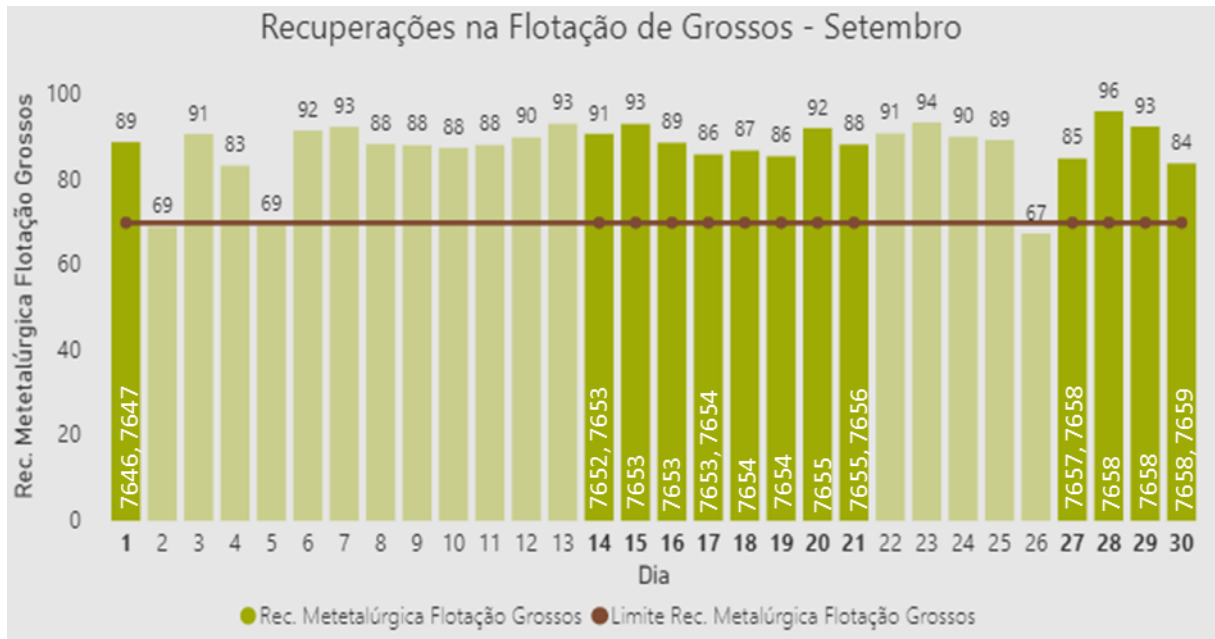
As Figura 10, Figura 11 e Figura 12 apresentam os resultados de desempenho da Usina 311 avaliados pela recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos nos meses de agosto a outubro, respectivamente. Nesses meses, foram realizadas pilhas rastreadas conforme descrito no item 3.4. As pilhas rastreadas estão realçadas na cor verde escuro e nomeadas nos gráficos da Figura 10 a Figura 12.

Figura 10 - Resultados da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos – agosto.



De acordo com o gráfico da Figura 10, verifica-se que do dia 13 ao dia 15 de agosto a usina operou com a primeira pilha rastreada: 7640. Verifica-se que esta não apresentou bom desempenho, com melhor resultado de recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos de 67%. Já na segunda pilha rastreada (7641) é possível verificar elevados valores de recuperação na flotação de grossos. As pilhas rastreadas 7642, 7643, 7645 e 7646 também apresentaram desempenho satisfatório na Usina 311 no mês de agosto.

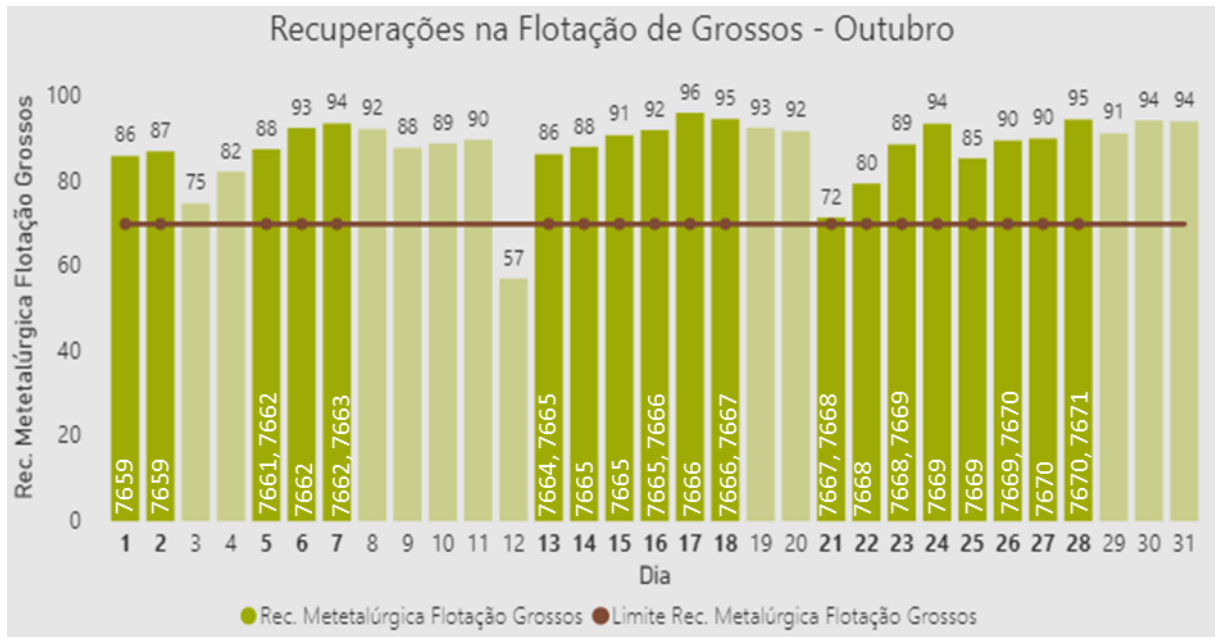
Figura 11 - Resultados da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos – setembro.



Através da metodologia de pilhas rastreadas atrelada à maior continuidade de operação da Usina 311, que se deve a melhorias operacionais, observa-se no mês de setembro (Figura 11) uma menor oscilação de desempenho do minério na usina, comparativamente ao mês anterior. É possível observar que, dos dias de operação no mês de setembro, em 90% destes a Usina 311 apresentou resultado satisfatório. Ressalta-se que, nos dias em que a usina foi alimentada apenas com pilhas rastreadas, não houve recuperações metalúrgica de P_2O_5 da flotação de grossos inferior a 70%, atingindo um valor mínimo de 84%. Esse resultado mostra a importância da rastreabilidade para que a usina performe de forma satisfatória, uma vez que, tendo o controle do material alimentado na usina, as providências como dosagem de reagentes e ajuste de parâmetros da flotação são tomadas para otimização dos resultados.

No mês de outubro (Figura 12) é possível analisar que a performance da Usina 311 se mantém satisfatória.

Figura 12 - Resultados da recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos – outubro.



Os resultados do mês de outubro mostraram que a usina atingiu valores de recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos superior a 70%, exceto no dia 12 de outubro devido a uma parada das operações da Usina 311. Dessa forma, é possível identificar que neste mês o desempenho da usina foi de aproximadamente 100% nos dias operados, destacando também que nesse mês foi realizado o maior número de pilhas rastreadas em relação aos meses anteriores.

Os resultados de recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos dos meses de agosto a outubro mostraram uma maior continuidade com a alimentação de pilhas rastreadas. Observou-se com os resultados que, das pilhas rastreadas que alimentaram a Usina 311, apenas a pilha 7640:476 não apresentou recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos satisfatória, sendo esta inferior a 70%. Esta pilha apresentava tamanha semelhança com a pilha rastreada 7641:475, a qual obteve excelente desempenho na recuperação da flotação de grossos. Dessa forma, realizou-se uma análise mineralógica a fim de investigar possíveis causas relacionadas ao tipo de minério que possa ter impedido a boa performance da Usina 311.

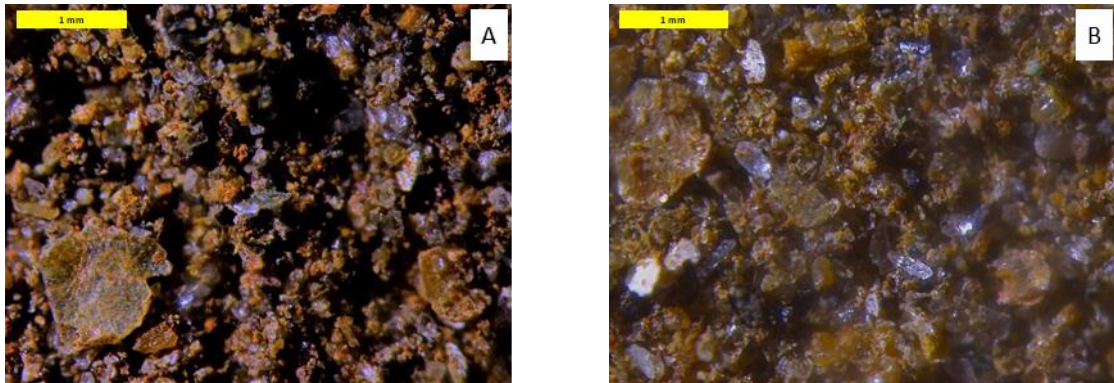
As análises apresentadas nos próximos itens (4.3 e 4.4) foram realizadas apenas com as pilhas 7640 e 7641 para fins comparativos.

4.3 Análise mineralógica das pilhas selecionadas

4.3.1 Análise Expedita

Por meio da análise expedita foram obtidas as imagens da Figura 13. A Figura 13 apresenta as imagens do estereomicroscópio, em que A e B são amostras das pilhas rastreadas 7640:476 e 7641:475, respectivamente.

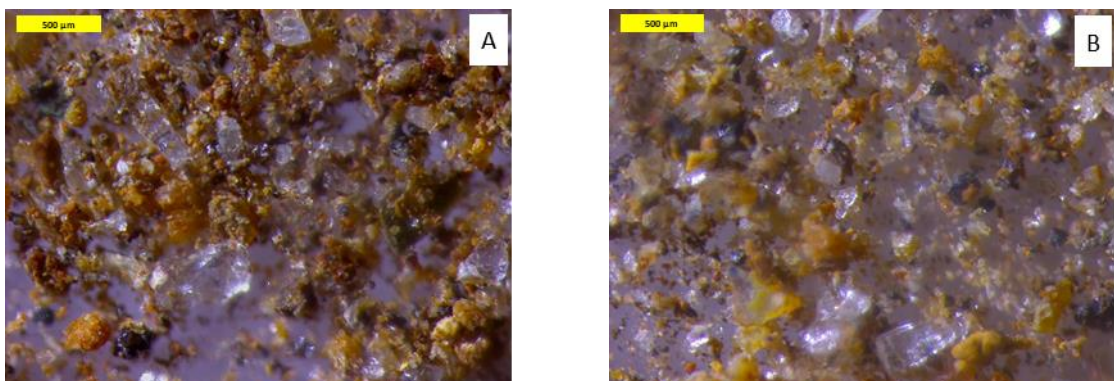
Figura 13 - Visão geral das amostras da alimentação da flotação de grossos na caracterização mineralógica das pilhas 7640:476 (A) e 7641:475 (B).



Nesta imagem, temos uma análise geral das amostras, na qual podemos observar a mineralogia similar entre elas, ambas com presença de apatita e mica grossa.

A Figura 14-A e a Figura 14-B são amostras das pilhas rastreadas 7640:476 e 7641:475, respectivamente.

Figura 14 - Amostra da alimentação da flotação de grossos na caracterização mineralógica, com foco na apatita, das pilhas 7640:476 (A) e 7641:475 (B).



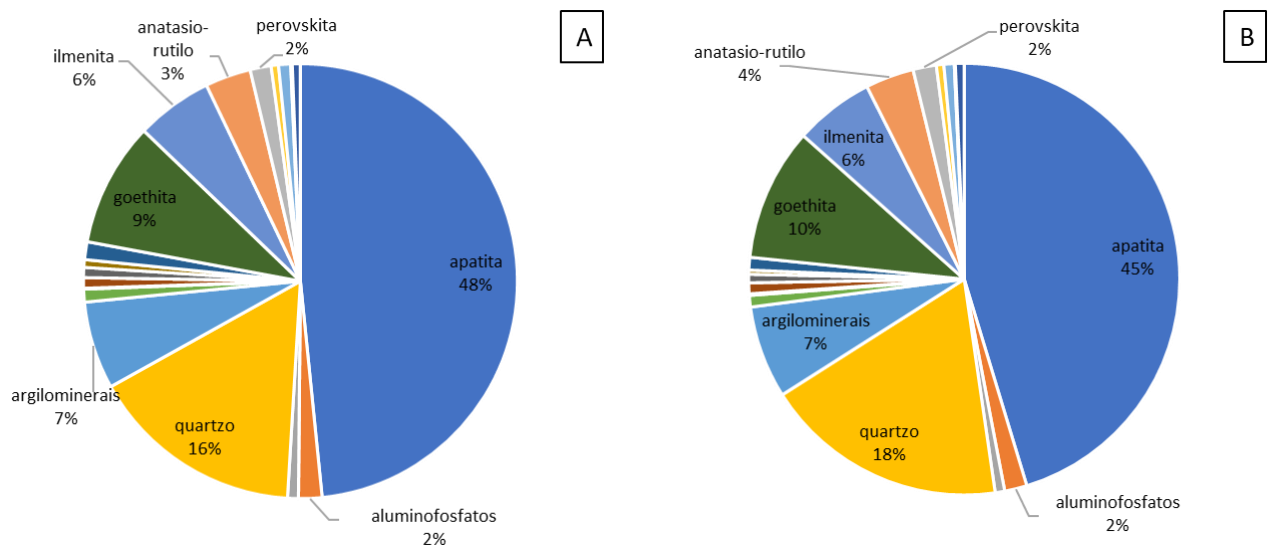
Esta imagem mostra com uma maior aproximação da lupa binocular sobre a amostra a semelhança de mineralogia, em que ambas possuem cristais monominerálicos de apatita límpida, bem formada e com variação granulométrica. Nas duas amostras também é observada magnetita.

4.3.2 Análise Detalhada

4.3.2.1 Composição mineralógica

A Figura 15 apresenta o resultado da composição mineralógica das pilhas rastreadas 7640:476 (Figura 15-A) e 7641:475 (Figura 15-B), na fração granulométrica maior que 0,020 mm.

Figura 15 - Composição mineralógica das pilhas rastreadas 7640:476 (A) e 7641:475 (B).



O resultado da composição mineralógica, obtida no MEV-EDS-MLA, mostra a grande similaridade entre as amostras das pilhas 7640:476 e 7641:475, com 48% e 45% de apatita, 16% e 18% de quartzo, 9% e 10% de goethita, e 3% e 4% de anatósio-rutilo, respectivamente. Ademais, verificam-se as mesmas proporções de argilominerais, ilmenita, aluminofosfatos e perovskita entre as

Tabela 3 - Distribuição dos teores por mineral - Amostra da pilha 7641:475.

| Mineral | Distribuição (%) | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------------|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|--------------------------------|------------------|
| | P ₂ O ₅ | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | SrO | MnO | BaO | OTR | Nb ₂ O ₅ | ZrO ₂ |
| apatita | 95 | 94 | | | | | | 81 | | | | | |
| aluminofosfatos | 2 | 0 | 0 | 24 | 2 | | 0 | 14 | 13 | 44 | 2 | | |
| monazita | 1 | 0 | | 0 | 0 | | | 1 | | 2 | 70 | | |
| quartzo | | | 82 | | | | | | | | | | |
| argilominerais | 0 | 0 | 11 | 48 | 9 | 48 | 2 | | 0 | | | | |
| piroxênio | | 1 | 2 | 0 | 0 | 7 | 0 | | | | | | |
| Mg-Si-O | | | 0 | | | 3 | | | | | | | |
| pirox-anfibólio | | 0 | 2 | 1 | 1 | 8 | | | | | | | |
| titanita | | 1 | 1 | | | | 3 | | | | | | |
| schorlomita | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | | | | | | 9 |
| magnetita-hematita | | | | 0 | 8 | 2 | 0 | | 1 | | | | |
| goethita | 1 | 0 | 1 | 18 | 62 | | 1 | 2 | 9 | | 1 | 10 | |
| ilmenita | | | | | 15 | 30 | 40 | | 26 | | | 17 | |
| anatásio-rutilo | 1 | 0 | | 4 | 1 | | 39 | | | | | 26 | |
| perovskita | | 2 | | 0 | 0 | | 12 | 1 | | | 13 | 7 | |
| zirkelita-zirconolita | | 0 | | 0 | 0 | | 2 | | | 2 | 5 | 24 | 82 |
| óxidos-MnBa | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | | | 50 | 38 | 5 | | |
| pirocloro | | 0 | 0 | | 0 | | 0 | 0 | | 2 | | 15 | |
| outros | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 2 | 0 | | 1 | 12 | 3 | 1 | 9 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Analisando as Tabela 2 e Tabela 3 verifica-se a equivalência na distribuição dos teores por mineral entre as amostras das pilhas 7640:476 e 7641:475. A apatita apresenta a distribuição dos teores de P₂O₅ e CaO idêntica para as amostras analisadas, e para os demais minerais a similaridade da distribuição dos teores dos óxidos se mantém.

4.3.2.3 Associações minerais

Os gráficos das Figura 16 e Figura 17 mostram os resultados das associações minerais para as pilhas rastreadas 7640:476 e 7641:475, respectivamente.

Figura 16 - Gráfico das associações minerais da apatita - Amostra da pilha 7640:476.

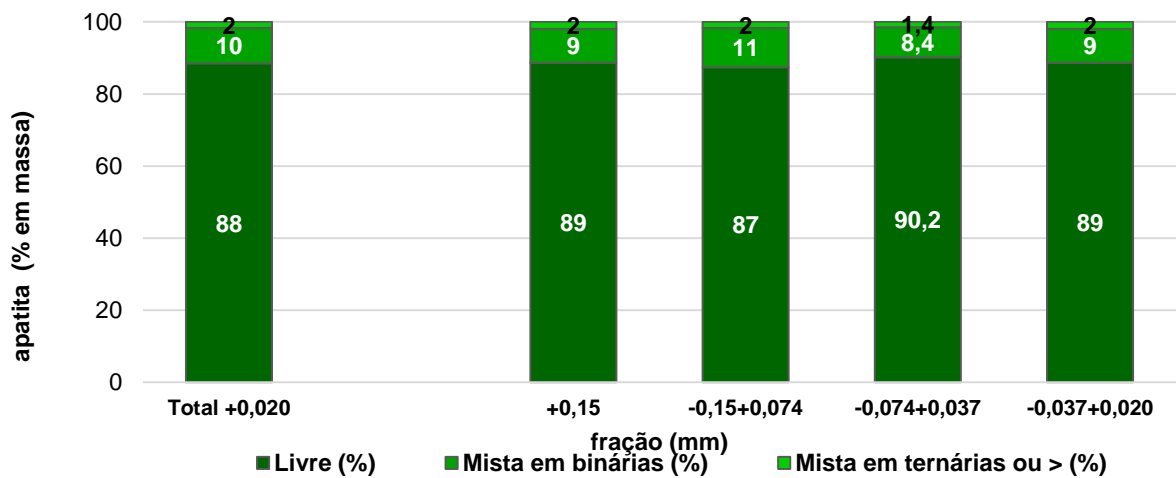
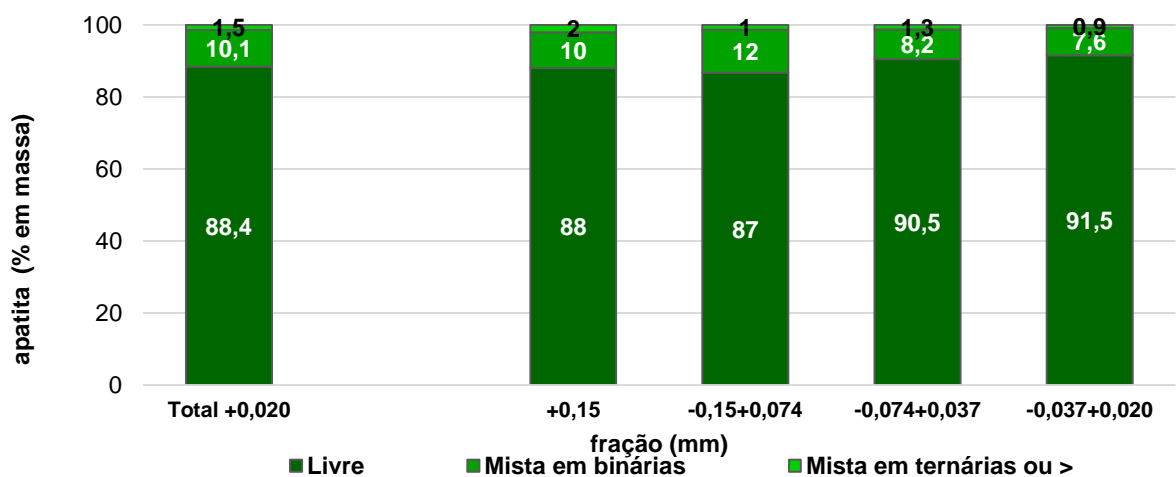


Figura 17 - Gráfico das associações minerais da apatita - Amostra da pilha 7641:475.



Por meio dos gráficos das Figura 16 e Figura 17 verifica-se um alto percentual de apatita (88% em massa) monominerálica, na fração granulométrica de maior que 0,020 mm. Para as frações +0,15, -0,15 + 0,074, +0,074 -0,037 e -0,037 e +0,020 as associações são similares à amostra total (>0,020mm), na qual a maior parte da apatita encontra-se livre; cerca de 10% são mistas em binárias e uma pequena parcela mistas em ternárias. Comparativamente, podemos avaliar que as associações minerais entre as amostras das pilhas 7640:476 e 7641:475 são semelhantes. A Tabela 4 mostra as principais associações minerais da apatita.

Tabela 4 - Principais minerais associados à apatita.

| Pilha | 7640 | 7641 |
|---|---------------------|---------------------|
| Fração (mm) | Total +0,020 | Total +0,020 |
| Livre (%) | 88 | 88.4 |
| Mista em binárias (%) | 10 | 10.1 |
| Mista em ternárias ou > (%) | 2 | 1.5 |
| <i>Distribuição - binárias</i> | | |
| aluminofosfatos | 1.4 | 1.3 |
| monazita | 1.9 | 1.7 |
| quartzo | 0.9 | 1.0 |
| argilominerais | 0.5 | 0.5 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.1 | 0.1 |
| titanita | 0.2 | 0.2 |
| schorlomita | 0.4 | 0.1 |
| magnetita-hematita | 0.1 | 0.1 |
| goethita | 3.0 | 3.4 |
| ilmenita | 0.6 | 0.9 |
| anatásio-rutilo | 0.1 | 0.2 |
| perovskita | 0.0 | 0.0 |
| zirkelita-zirconolita | 0.4 | 0.3 |
| óxidos-MnBa | 0.1 | 0.1 |
| pirocloro | 0.1 | 0.0 |
| outros | 0.1 | 0.2 |
| <i>Distribuição - ternárias ou ></i> | | |
| aluminofosfatos | 0.2 | 0.3 |
| monazita | 0.1 | 0.1 |
| quartzo | 0.2 | 0.2 |
| argilominerais | 0.1 | 0.1 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.0 |
| titanita | 0.1 | 0.1 |
| schorlomita | 0.1 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.1 | 0.0 |
| goethita | 0.3 | 0.3 |
| ilmenita | 0.2 | 0.1 |
| anatásio-rutilo | 0.1 | 0.1 |
| perovskita | 0.0 | 0.0 |
| zirkelita-zirconolita | 0.1 | 0.1 |
| óxidos-MnBa | 0.0 | 0.0 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.0 | 0.0 |

Através dos resultados da Tabela 4 é possível verificar que a apatita encontra-se associada principalmente a minerais de fosfato secundário e à goethita.

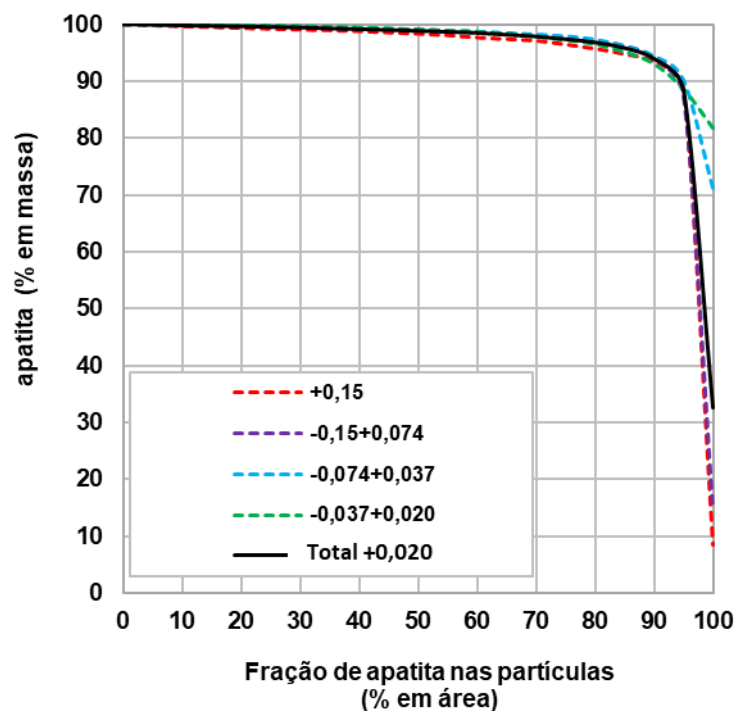
Essa associação é verificada de forma semelhante para ambas as amostras das pilhas 7640:476 e 7641:475.

Quanto às associações dos demais minerais analisados (quartzo, argilominerais, magnetita-hematita, goethita, ilmenita e anatásio), é observado comportamento semelhante para as pilhas 7640:476 e 7641:475 (APÊNDICE B).

4.3.2.4 Grau de liberação

A Figura 18 apresenta os resultados do grau de liberação da apatita da amostra da pilha 7640:476. Os resultados dos demais minerais podem ser verificados no APÊNDICE C.

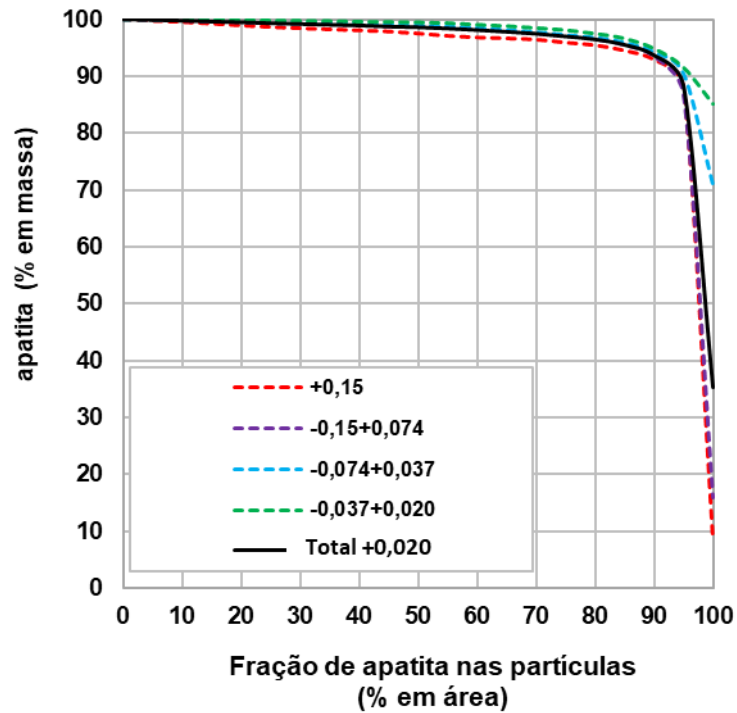
Figura 18 - Gráfico do grau de liberação – Amostra da pilha 7640:476.



O resultado mostra que 33% dos grãos que possuem apatita encontram-se totalmente livres. Verifica-se também que 90% dos grãos com apatita apresentam 94% de apatita no grão, logo podemos considerá-las como partículas majoritariamente livres.

O grau de liberação de apatita da amostra da pilha 7641:475 está apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico do grau de liberação – Amostra da pilha 7641:475.



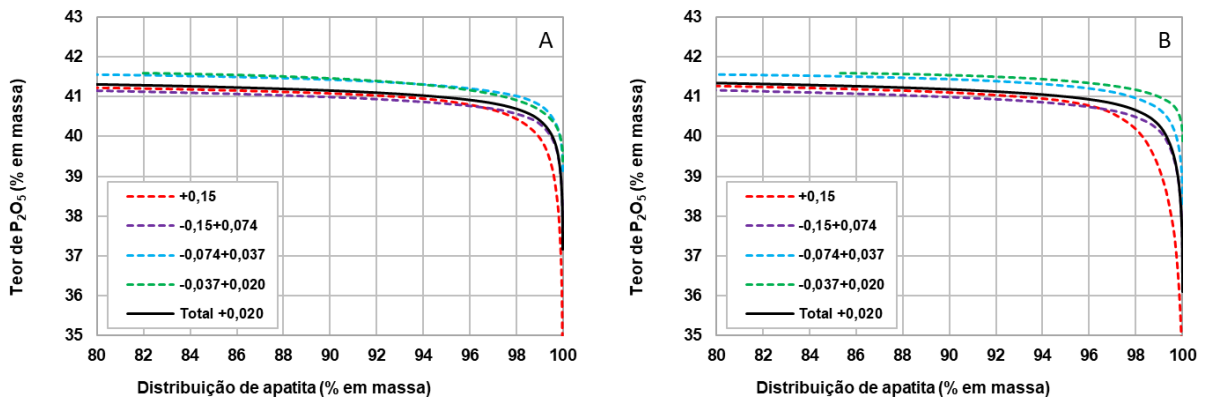
Neste gráfico, observa-se que 35% dos grãos que possuem apatita são monominerálicos. De forma semelhante ao gráfico da Figura 18, neste, 90% dos grãos com apatita possuem 94% de apatita no grão.

Avaliando comparativamente, verifica-se através dos gráficos (Figura 18 e Figura 19) que as amostras das pilhas 7640:476 e 7641: 475, possuem comportamento similar.

4.3.2.5 Recuperação potencial de P_2O_5 da apatita

O gráfico da Figura 20 apresenta a recuperação de P_2O_5 da apatita das amostras das pilhas 7640:476 (A) e 7641:475 (B).

Figura 20 - Recuperação de P_2O_5 da apatita - Amostras das pilhas 7640:476 (A) e 7641:475 (B).



Os gráficos mostram que as amostras analisadas apresentam comportamento semelhante. Observando em ambas as amostras, para uma recuperação mássica dos 80% dos grãos monominerálicos de apatita, tem-se um concentrado com 41% de P_2O_5 . Para a amostra da pilha 7640:476, uma recuperação mássica de 100% dos grãos com apatita, tem-se no concentrado 37,2% de P_2O_5 . Para a amostra da pilha 7641:475, por sua vez, esse resultado é de 36,1% de P_2O_5 . Tais resultados indicam que, para ambas as amostras, as partículas de apatita mistas não comprometem a recuperação de P_2O_5 .

4.3.3 Análise Mineralógica Do Produto Magnético

4.3.3.1 Composição mineralógica

A Tabela 5 apresenta os teores químicos do produto magnético das amostras das pilhas 7640:746 e 7641:475.

Tabela 5 - Teores químicos do produto magnético.

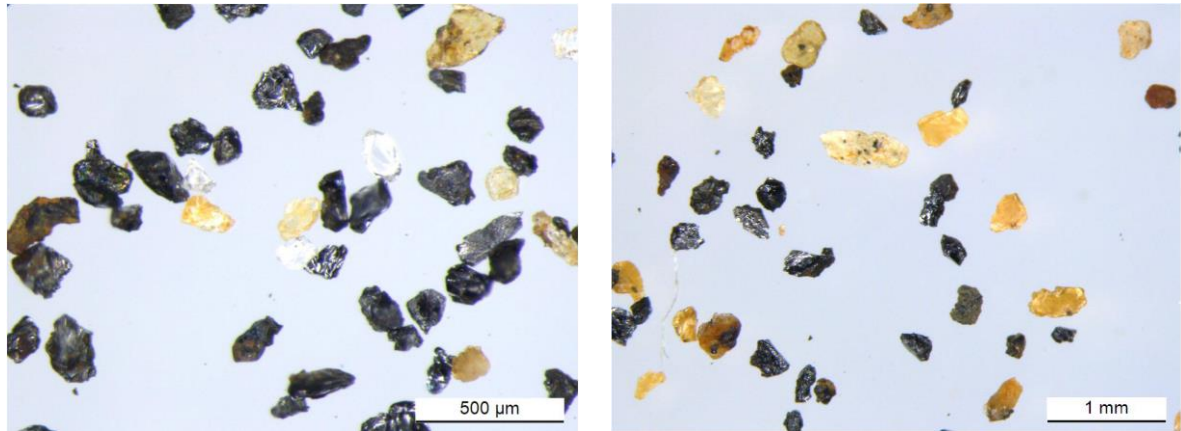
| Pilha | Fração (mm) | % massa | | Teores (% em massa) | | | | | | | | | | CaO/ P ₂ O ₅ |
|-------|------------------|---------|---------|-------------------------------|------------------------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| | | retida | amostra | P ₂ O ₅ | P ₂ O ₅ (ap) | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | Nb ₂ O ₅ | P ₂ O ₅ | |
| 7640 | +0,15 | 23.8 | 23.8 | 1.37 | 1.37 | 2.00 | 3.35 | 0.44 | 84.4 | 3.23 | 5.59 | <0,10 | 1.46 | |
| | -0,15+0,074 | 44.8 | 68.6 | 2.25 | 2.25 | 3.21 | 2.89 | 0.28 | 83.0 | 2.45 | 6.08 | <0,10 | 1.43 | |
| | - 0,074+0,037 | 21.7 | 90.3 | 2.71 | 2.71 | 3.77 | 2.57 | 0.29 | 81.9 | 2.15 | 6.34 | <0,10 | 1.39 | |
| | - 0,037+0,020 | 5.4 | 95.7 | 0.73 | 0.72 | 0.95 | 1.10 | 0.25 | 89.6 | 2.09 | 5.26 | <0,10 | 1.30 | |
| | -0.020 | 4.3 | 100.0 | 0.39 | 0.27 | 0.36 | 0.84 | 0.31 | 92.4 | 1.90 | 3.99 | <0,10 | 0.92 | |
| | Total dosado | 100.0 | | 1.98 | 1.97 | 2.80 | 2.74 | 0.32 | 83.9 | 2.53 | 5.89 | <0,10 | 1.41 | |
| 7641 | +0,15 | 23.0 | 23.0 | 1.16 | 1.16 | 1.77 | 3.67 | 0.33 | 83.7 | 2.51 | 6.89 | <0,10 | 1.53 | |
| | -0,15+0,074 | 44.1 | 67.1 | 1.60 | 1.60 | 2.34 | 2.70 | 0.21 | 84.3 | 2.23 | 6.62 | <0,10 | 1.46 | |
| | - 0,074+0,037 | 23.8 | 91.0 | 2.16 | 2.16 | 2.97 | 2.83 | 0.28 | 83.3 | 2.20 | 6.28 | <0,10 | 1.38 | |
| | - 0,037+0,020 | 4.7 | 95.7 | 1.98 | 1.98 | 2.72 | 2.36 | 0.39 | 84.2 | 2.07 | 5.98 | <0,10 | 1.37 | |
| | -0.020 | 4.3 | 100.0 | 1.12 | 1.00 | 1.32 | 1.72 | 0.41 | 88.3 | 1.87 | 4.83 | <0,10 | 1.18 | |
| | Total dosado | 100.0 | | 1.63 | 1.62 | 2.33 | 2.90 | 0.27 | 84.1 | 2.26 | 6.49 | <0,10 | 1.43 | |

Os teores químicos apresentados nesta tabela refletem a semelhança entre os produtos magnéticos das pilhas 7640:476 e 7641:475 em cada fração analisada. Os dados apresentados na Tabela 6 e nas Figura 21, Figura 22 e Figura 23 confirmam tal similaridade.

Tabela 6 - Análise mineralógica das amostras do produto magnético das pilhas 7640:476 e 7641:475.

| Minerais/Pilha | 7640 | 7641 |
|----------------|------|------|
| Vermiculita | x | x |
| Magnetita | x | x |
| Ilmenita | x | x |
| Goethita | x | x |
| Hematita | x | x |
| Apatita | x | x |
| Quartzo | x | x |

Figura 23 - Características texturais e associações minerais das amostras das pilhas 7640:746 e 7641:475.



Referente às características texturais das amostras (Figura 23), destacam-se vermiculita e quartzo livre, e magnetita e goethita mistas.

Os resultados confirmam a similaridade não apenas nas amostras da alimentação da flotação, mas também das amostras do produto magnético das duas pilhas analisadas. Verifica-se, dessa forma, que o baixo desempenho na recuperação da flotação de P_2O_5 de grossos da pilha 7640:476 não é devido ao tipo de material alimentado.

4.4 Análise de aderência

Este item apresenta a análise de aderência realizada para as pilhas 7640:476 e 7641:475.

Os gráficos das Figura 24 e Figura 25 mostram os resultados das análises de aderência entre os dados das pilhas planejadas 476 e 475, conforme o modelo de planejamento de curto prazo e os resultados obtidos por meio das amostras por pó de perfuratriz dessas pilhas em seu segundo tombo realizado nos estoques em Araxá.

Figura 24 - Gráfico da análise de aderência da Pilha 7640:476.

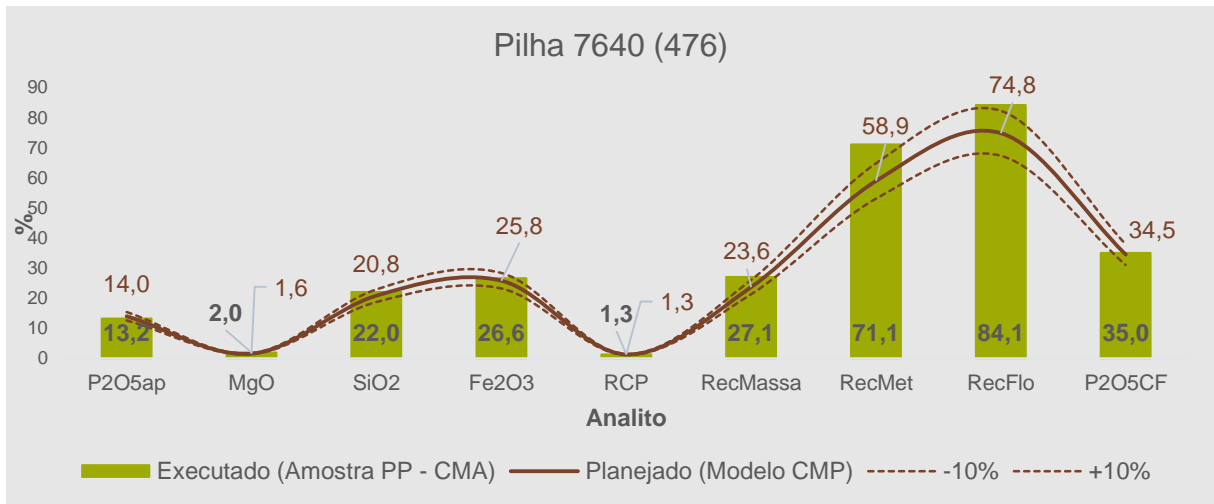
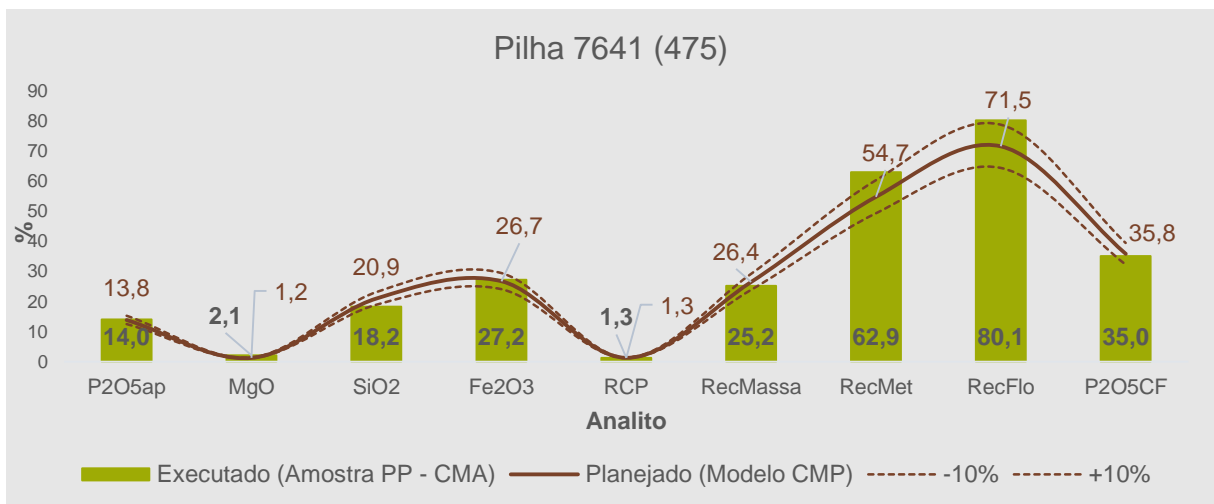


Figura 25 - Gráfico da análise de aderência da Pilha 7641:475.



Conforme visto nas Figura 24 e Figura 25, os resultados apresentam alta correlação entre os dados do modelo utilizado no planejamento e as amostras de pó de perfuratriz (resultados realizados) quanto aos óxidos considerados. Pode-se, assim, concluir que a rastreabilidade da pilha é fundamental para se obter aderência entre o planejado e o realizado. Adicionalmente, a confiabilidade do modelo do planejamento de curto prazo é confirmada pois observa-se, por exemplo, a Figura 24 em que o teor de P_2O_5ap planejado foi 14.0% e o resultado executado, 13.2%, obedecendo, portanto, os limites superior e inferior de 14.5 e 11.9, respectivamente.

No entanto, para os dados de geometalurgia é verificada uma baixa correlação entre planejado e o realizado, conforme ilustrado, por exemplo, na Figura

24. Esta figura apresenta uma recuperação metalúrgica de P_2O_5 realizada de 71.7%, enquanto o planejado foi de 58.9%, excedendo os limites de $\pm 10\%$. Essa menor correlação é devida ao baixo percentual de realização de ensaios de caracterização tecnológica das amostras coletadas nas frentes de lavra, utilizadas para a confecção dessas pilhas.

5 CONCLUSÕES

Conforme o objetivo proposto neste trabalho e após as análises realizadas, conclui-se que a rastreabilidade do minério de Patrocínio beneficiado em Araxá viabilizou a melhoria do controle das operações de beneficiamento do minério, bem como bons resultados de aderência entre o planejado e o realizado.

A rastreabilidade permitiu maior continuidade de recuperação metalúrgica de P_2O_5 na flotação de grossos do minério fosfático de Patrocínio na usina de Araxá.

As análises mineralógicas das pilhas rastreadas, 7640:476 e 7641:475, confirmaram a similaridade entre as amostras destas pilhas. Conclui-se assim que o resultado insatisfatório obtido na recuperação da flotação de P_2O_5 de grossos da pilha 7640:476 não é decorrente do tipo de material alimentado e que a rastreabilidade desta pilha permitiu tal análise.

A rastreabilidade possibilitou realizar a análise de aderência entre o planejado e o realizado. Verificou-se, com o estudo desta ferramenta, sua importância para a realização de análises de aderência como as apresentadas neste trabalho, uma vez que tais análises confirmaram a confiabilidade do modelo de blocos de curto prazo de Patrocínio.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, I. M. C. de P. **Gênese e controles da mineralização secundária de P, Ti e ETR no complexo alcalino carbonatítico de Salitre, MG.** 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/19880>>. Acesso em: 13 maio 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas de gestão da qualidade:** Fundamentos e vocabulário. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- BARBOSA, E. S. R. **Mineralogia e petrologia do complexo carbonatítico-foscorítico de Salitre, MG.** 2009. 432 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/10379>>. Acesso em: 15 maio 2021.
- BEZERRA, M. A. BROD, J. A. Mineralogia da Apatita do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira. CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO – CONPEEX, 2011, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2011.
- BROD, J. A. **Petrology and geochemistry of the tapira alkaline complex, minas gerais state, Brazil.** 1999. 498 f. Tese (Doutorado) – Durham University, 1999. Disponível em: <<http://etheses.dur.ac.uk/4971/>>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- BROD, J. A.; GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; JUNQUEIRA-BROD, T. C.; SEER, H. J.; MORAES, L. C. D.; BOAVENTURA, G. R. The kamafugite-carbonatite association in the alto paranaíba igneous province (apip) southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 408–412, 2000.
- CARLI, C. D. **Aplicação do método de opções reais no planejamento de pilhas de estoque na mineração.** 2018. 144 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- CARVALHO, W. T. Aspectos geológicos e petrográficos do complexo ultramáfico-alcalino de Catalão I, GO. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SGB, 1974.
- CHAVES, A. P. Estocagem e homogeneização. *In:* CHAVES, A. P. **Manuseio de sólidos granulados.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. (Teoria e Prática do Tratamento de Minérios; v. 5).
- CHAVES, A. P.; FERREIRA, F. M. Estocagem em pilhas. *In:* CHAVES, A. P. **Manuseio de sólidos granulados.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. (Teoria e Prática do Tratamento de Minérios; v. 5).
- CORDEIRO, P. F. O.; BROD, J. A.; DANTAS, E. L.; BARBOSA, E. S. R. Mineral chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the

Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil. **Lithos**, v. 118, n. 3–4, p. 223–237, ago. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2009**, v. 29. Departamento Nacional De Produção Mineral, p. 104, 2010.

DESCRITIVOS DE PROCESSOS - Complexo Mineraloquímico de Araxá CMA. **Relatório interno Vale Fertilizantes**, Araxá, 73p, 2011.

DIAS, V. P.; FERNANDES, E. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, 2006. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/?locale=pt_BR>. Acesso em: 8 maio 2021.

GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; LEONARDOS, O. H.; DICKIN, A. P.; MITCHELL, J. G. The Late Cretaceous Impact of the Trindade Mantle Plume: Evidence from Large-volume, Mafic, Potassic Magmatism in SE Brazil. **Journal of Petrology**, v. 36, n. 1, p. 189–229, fev. 1995.

GRASSO, C. B. **Geologia e geometalurgia dos minérios de fosfato na base do manto de intemperismo da mina do Barreiro, Araxá**. 2015. 261 f. Tese (Doutorado) – Instituto De Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/20762>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

GRASSO, C. B. **Implementação da rastreabilidade do minério do Complexo Mineraloquímico de Catalão (CMC) para controle da produção de ácido fosfórico no Complexo Industrial de Piaçaguera (CPG)**. Programa Trainee – Fosfertil, Catalão, 2005.

GRASSO, C. B. **Petrologia do complexo alcalino-carbonatítico de Serra Negra, MG**. 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto De Geociências, Universidade De Brasília, Brasília, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/8446>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

GUARANYS, C. A. L. B.; PESSANHA, R. R.; FARIA, R. M.; MORGADES, R. F. K. M.; MACIEL, G. S. Principais métodos de estocagem de minério de ferro: uma abordagem teórica. **Perspectiva online: Ciências exatas e engenharia**, v. 3, n. 6, p. 42–55, 2013.

ISOKANGAS, E.; SÖNMEZ, B.; WORTLEY, M.; VALERY, W. Using SmartTag™ to track ore in process integration and optimization projects: some case studies in a variety of applications. **Platinum 2012**, SAIMM Conference, p. 871–882, 2012.

MACHADO JUNIOR, D. de L. **Geologia e aspectos metalogenéticos do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão II (GO)**. 1991. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/287721>. Acesso em: 25 mar. 2021.

MORAES NETO, S. P. **Fertilizantes NPK e suas origens**. Repositório de Informação Tecnológica da Embrapa, 2010. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/875035>>. Acesso em: 8 maio 2021.

MORAES, L. C.; SEER, H. J. **Titânio**. 2018. Recursos Minerais de Minas Gerais. Disponível em: <<http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/titania/>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

MOSAIC FERTILIZANTES DO BRASIL LTDA. **Technical Report on the Mineral Resources Estimates for the Patrocínio Phosphate Deposit, Minas Gerais State, Brazil**. Technical Report. Patrocínio: Mosaic Fertilizantes do Brasil LTDA, 2020.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C.L.; ALCOVER NETO, A. 2010. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS – PARTE II. **Tratamento de minérios**. 5. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 3, p. 85-137, 2010.

OGASAWARA, E.; KULAIF, Y.; FERNANDES, F. R. C. 2010. A indústria brasileira de fertilizantes (cadeia NPK, enxofre, rocha fosfática e potássio) – projeções de 2010 a 2030. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 8, p. 145-168, 2010.

GRAZIANI, A, P. Planejamento, programação e controle da produção. **Livro didático**. Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça, cap. 1, p. 15-77, 2012.

PETERS, T. **O círculo da inovação**. São Paulo: Harbra, 1998.

PORPHÍRIO, N. H.; BARBOSA, M. I. M.; BERTOLINO, L. C. 2010. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS – PARTE I. **Tratamento de minérios**. 5. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 3, p. 57-81, 2010.

ROCHA, B. G. **Análises preliminares de desempenho do circuito de moagem da Vale Fertilizantes de Araxá-MG**. 2013. 187 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-06072014-200234/>>. Acesso em: 1 ago. 2021.

SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S.; ARAÚJO, R. V. V. Produção de fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira / Fosfertil. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS – ENTMMME, 19, 2002, Pernambuco. **Anais...** Pernambuco, 2002.

SEER, H. J.; DARDENNE, M. A.; PIMENTEL, M. M.; FONSECA, M. A.; MORAES, L. C. A Grupo Ibiá na sinforma de Araxá: um terreno tectonoestratigráfico ligado à evolução de arcos magmáticos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 737–744, 2000.

SONOKI, I. K.; GARDA, G. M. Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. **Boletim IG-USP**, Série Científica, v. 19, p. 63–85, jan. 1988.

SOUSA, A. A. T.; OLEGARIO, F.; SANTOS, P. F.; SILVA, M. A.; SILVEIRA, A. L.; RODRIGUES, R. A. R. Geometalurgia de curto prazo da Mina do Salobo. ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS – ENTMMME, 27, 2017, Belém. **Anais...** Belém, 2017.

SOUZA, A. E. (2001). **Balanco Mineral Brasileiro 2001. Agência Nacional de Mineração, 2001.** Disponível em: < Balanco Mineral Brasileiro 2001 — Português (Brasil) (www.gov.br)> Acesso em: 18 out. 2021.

TOLEDO, M.; FERRARI, V.; SANTOS, C. N.; NETO, A.; FONTAN, F.; RIBEIRO, C. C. Lateritic weathering effects over phosphatic Brazilian ores: Catalão I and Juquia (Brasil). *In*: INTERNATIONAL GEOCHEMICAL EXPLORATION SYMPOSIUM, 19., 1999. Vancouver. **Anais...** Vancouver, 1999.

TRAVERSA, G.; GOMES, C. B.; BROTZU, P.; BURAGLINI, N.; MORBIDELLI, L.; PRINCIPATO, M. S.; RONCA, S.; RUBERTI, E. Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 73, n. 1, p. 71–98, mar. 2001.

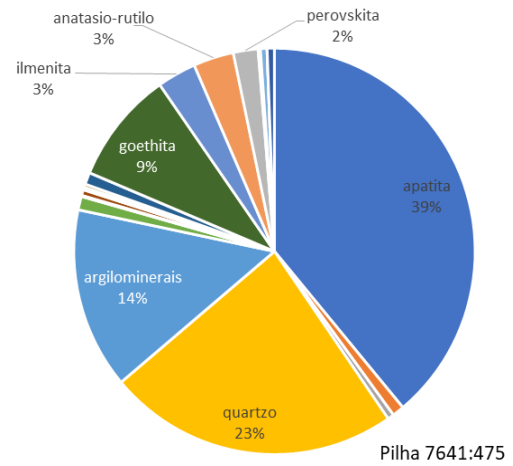
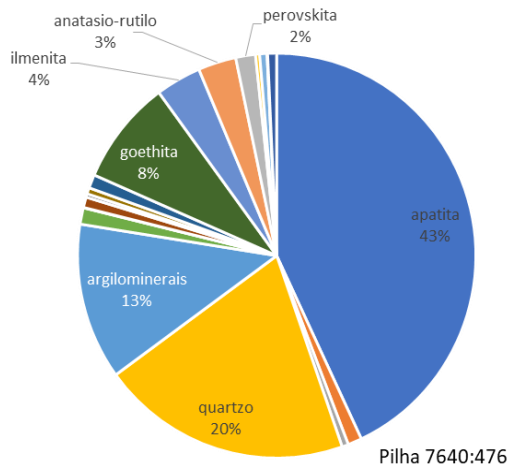
ULIANA, D. **Caracterização Tecnológica do Minério de Fosfato do Complexo Alcalino de Salitre, MG – Área Fosfertil.** 2010. 210 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-23112010-103420/publico/Dissertacao_Daniel_Uliana.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2021.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2021.** Virginia: United States Geological Survey, p. 200, 2021.

APÊNDICES

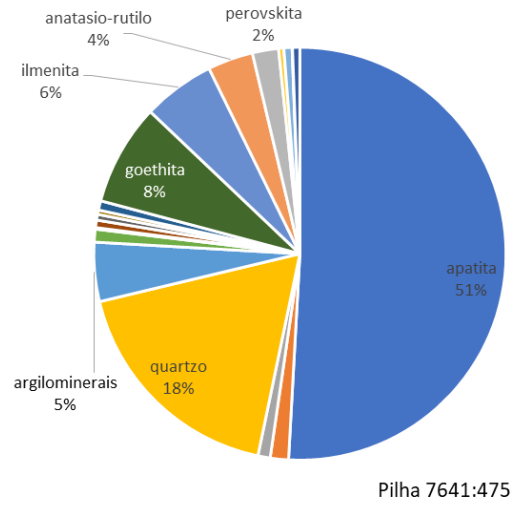
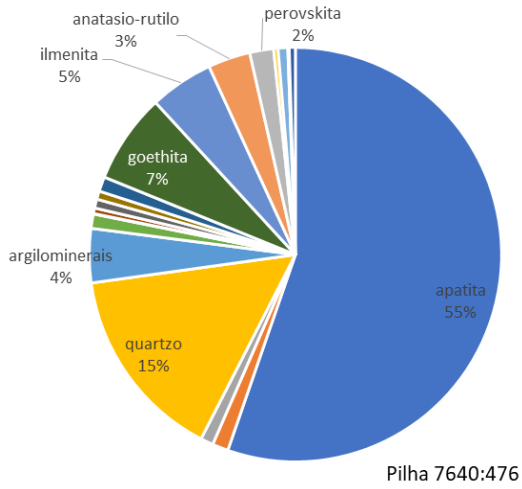
APÊNDICE A – Mineralogia por fração granulométrica

- Fração granulométrica +0,15 mm



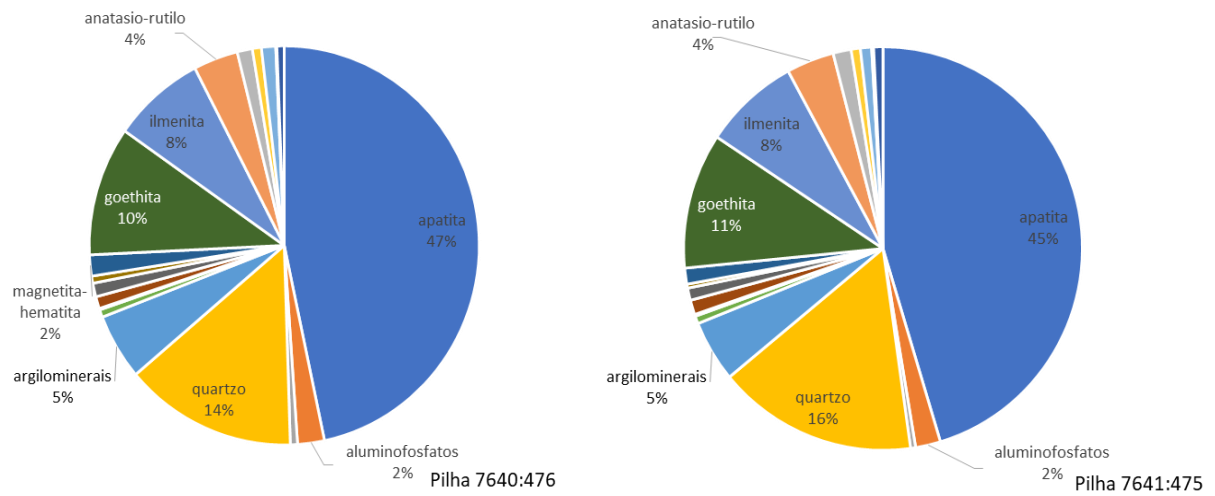
| Pilha | % massa retida | P ₂ O ₅ | P ₂ O ₅ ap | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | SrO | Na ₂ O | MnO | BaO | ETR | Nb ₂ O ₅ | PF | CaO/P ₂ O ₅ |
|-------|----------------|-------------------------------|----------------------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------|-------------------|------|------|------|--------------------------------|------|-----------------------------------|
| 7640 | 19.7 | Teores (% em massa) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 19.0 | 19.0 | 26.2 | 26.0 | 1.93 | 11.2 | 2.81 | 5.27 | 0.42 | 0.24 | 0.45 | 0.20 | 0.49 | 0.15 | 3.86 | 1.38 |
| 7641 | 19.8 | Teores (% em massa) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17.6 | 17.6 | 24.3 | 29.2 | 2.12 | 11.0 | 3.09 | 5.34 | 0.38 | 0.22 | 0.46 | 0.20 | 0.47 | 0.16 | 4.23 | 1.38 |

• Fração granulométrica -0,15 +0,074



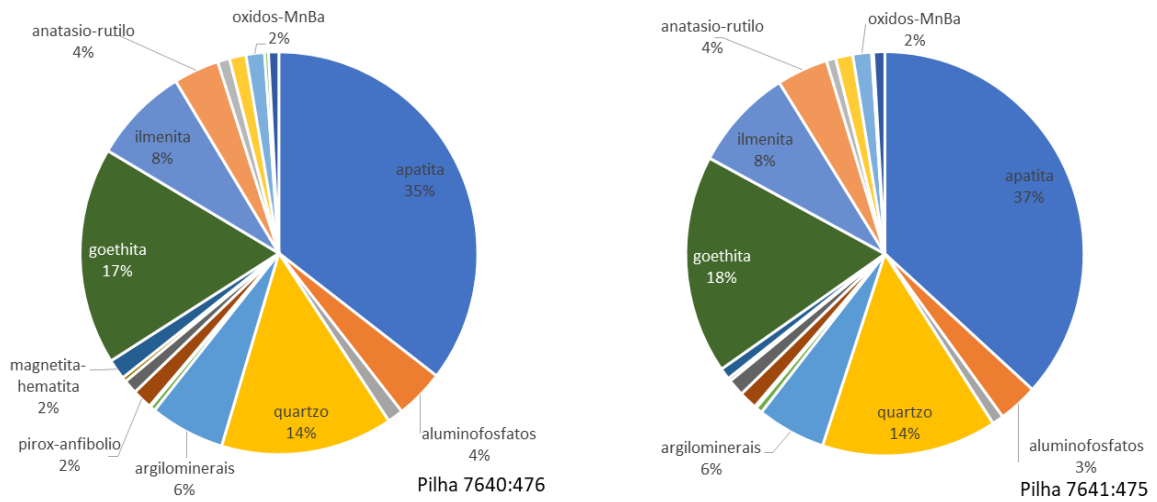
| Pilha | % massa retida | P ₂ O ₅ | P ₂ O ₅ ap | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | SrO | Na ₂ O | MnO | BaO | ETR | Nb ₂ O ₅ | PF | CaO/P ₂ O ₅ |
|-------|----------------|-------------------------------|----------------------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------|-------------------|------|------|------|--------------------------------|------|-----------------------------------|
| | | Teores (% em massa) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7640 | 37.4 | 23.5 | 23.5 | 31.9 | 18.4 | 1.05 | 10.5 | 1.33 | 6.72 | 0.51 | 0.32 | 0.47 | 0.19 | 0.62 | 0.20 | 2.65 | 1.36 |
| 7641 | 37.2 | 22.3 | 22.3 | 30.2 | 21.8 | 1.09 | 10.1 | 1.40 | 6.57 | 0.49 | 0.30 | 0.47 | 0.20 | 0.57 | 0.21 | 2.82 | 1.35 |

- Fração granulométrica -0.074 + 0.037 mm



| Pilha | % massa retida | P ₂ O ₅ | P ₂ O ₅ ap | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | SrO | Na ₂ O | MnO | BaO | ETR | Nb ₂ O ₅ | PF | CaO/ P ₂ O ₅ |
|-------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------|-------------------|------|------|------|--------------------------------|------|---------------------------------------|
| 7640 | 24.1 | Teores (% em massa) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 21.0 | 21.0 | 28.3 | 18.6 | 1.43 | 13.0 | 1.76 | 8.23 | 0.48 | 0.40 | 0.63 | 0.25 | 0.65 | 0.30 | 3.09 | 1.35 |
| 7641 | 25.0 | Teores (% em massa) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 20.3 | 20.3 | 27.5 | 20.3 | 1.40 | 12.8 | 1.79 | 8.28 | 0.47 | 0.40 | 0.63 | 0.24 | 0.62 | 0.30 | 3.31 | 1.35 |

- Fração granulométrica $-0.037 + 0.020$ mm

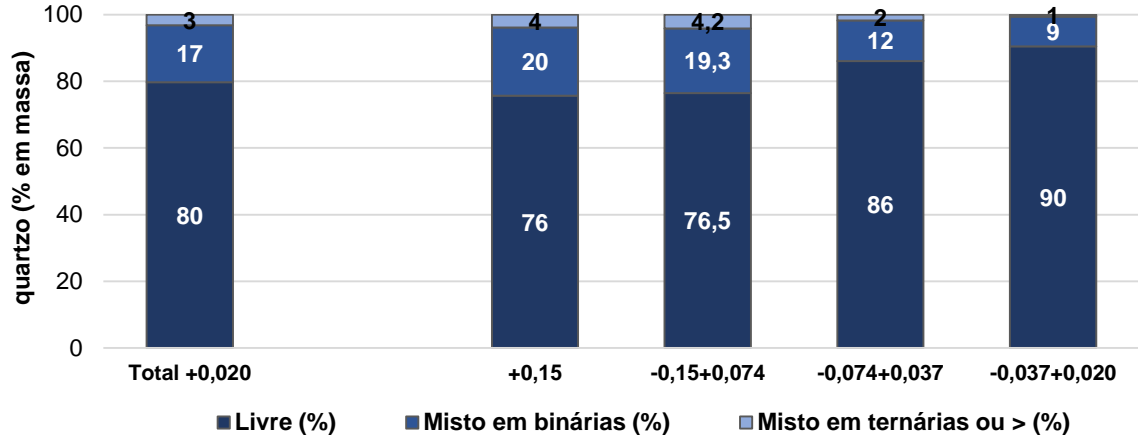


| Pilha | % massa retida | P ₂ O ₅ | P ₂ O ₅ ap | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | SrO | Na ₂ O | MnO | BaO | ETR | Nb ₂ O ₅ | PF | CaO/P ₂ O ₅ |
|-------|----------------|-------------------------------|----------------------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------|-------------------|------|------|------|--------------------------------|------|-----------------------------------|
| 7640 | 8.6 | Teores (% em massa) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17.2 | 17.2 | 22.8 | 19.6 | 2.01 | 18.0 | 1.76 | 8.74 | 0.43 | 0.47 | 0.86 | 0.34 | 0.75 | 0.43 | 4.06 | 1.33 |
| 7641 | 9.5 | Teores (% em massa) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 17.3 | 17.3 | 22.8 | 20.2 | 1.92 | 17.7 | 1.78 | 8.92 | 0.43 | 0.49 | 0.84 | 0.30 | 0.72 | 0.42 | 4.13 | 1.32 |

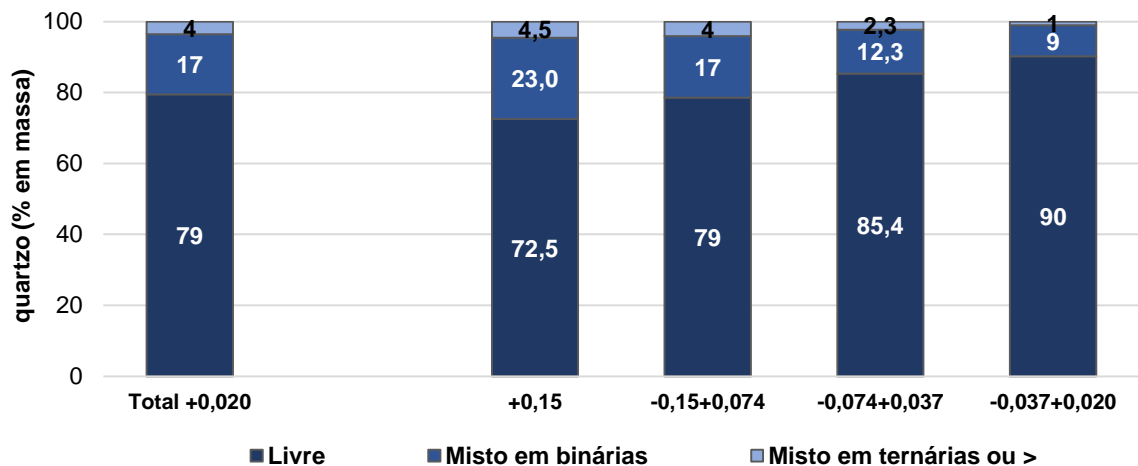
APÊNDICE B – Associação mineralógica

- Quartzo

- Pilha 7640:476



- Pilha 7641:475

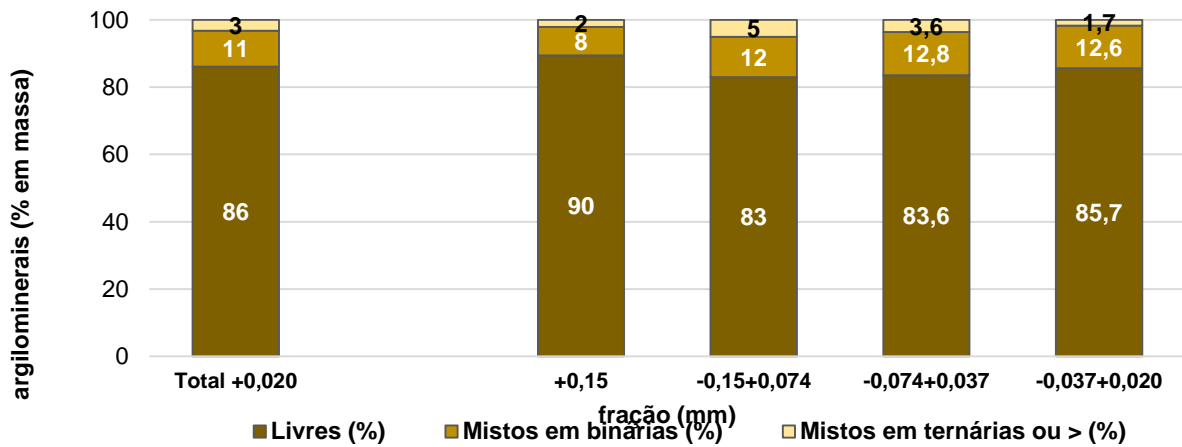


| Pilha | 7640 | 7641 |
|--------------------------------|--------------|--------------|
| Fração (mm) | Total +0,020 | Total +0,020 |
| Livre (%) | 80 | 79 |
| Misto em binárias (%) | 17 | 17 |
| Misto em ternárias ou > (%) | 3 | 4 |
| <i>Distribuição - binárias</i> | | |
| apatita | 4.6 | 4.9 |
| aluminofosfatos | 0.2 | 0.2 |
| monazita | 0.4 | 0.3 |
| argilominerais | 4.6 | 3.6 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.1 |
| titanita | 0.0 | 0.0 |
| schorlomita | 0.0 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.1 | 0.3 |
| goethita | 4.9 | 5.3 |
| ilmenita | 0.9 | 1.0 |

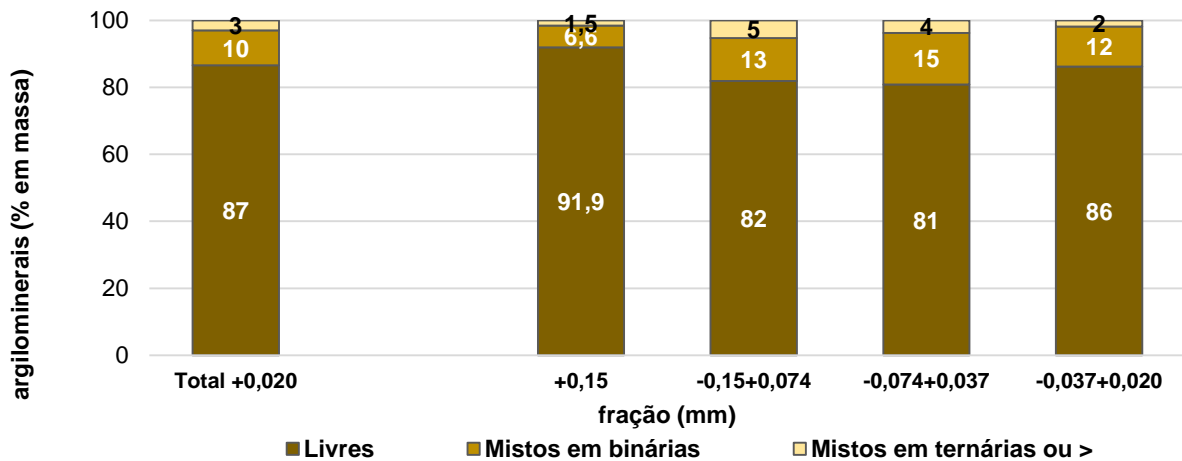
| | | |
|---|-----|-----|
| anatásio-rutilo | 0.5 | 0.8 |
| perovskita | 0.0 | 0.0 |
| zirkelita-zirconolita | 0.2 | 0.1 |
| óxidos-MnBa | 0.3 | 0.3 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.3 | 0.2 |
| <hr/> | | |
| <i>Distribuição - ternárias ou ></i> | | |
| apatita | 0.5 | 0.5 |
| aluminofosfatos | 0.0 | 0.0 |
| monazita | 0.2 | 0.1 |
| argilominerais | 0.9 | 0.8 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.0 |
| titanita | 0.0 | 0.0 |
| schorlomita | 0.0 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.0 | 0.1 |
| goethita | 0.8 | 1.3 |
| ilmenita | 0.3 | 0.2 |
| anatásio-rutilo | 0.3 | 0.2 |
| perovskita | 0.0 | 0.0 |
| zirkelita-zirconolita | 0.0 | 0.0 |
| óxidos-MnBa | 0.1 | 0.1 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.2 | 0.1 |
| <hr/> | | |

- Argilominerais

- Pilha 7640:476



- Pilha 7641:475



| Pilha | 7640 | 7641 |
|------------------------------|--------------|--------------|
| Fração (mm) | Total +0,020 | Total +0,020 |
| Livres (%) | 86 | 87 |
| Mistos em binárias (%) | 11 | 10 |
| Mistos em ternárias ou > (%) | 3 | 3 |

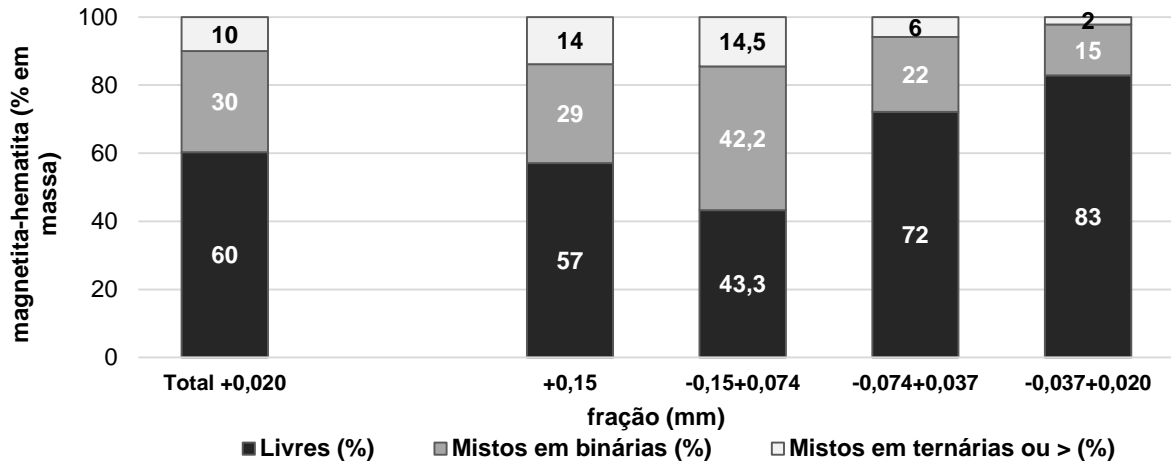
Distribuição - binárias

| | | |
|--------------------|-----|-----|
| apatita | 1.4 | 1.5 |
| aluminofosfatos | 0.4 | 0.3 |
| monazita | 0.0 | 0.0 |
| quartzo | 2.6 | 2.2 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 1.1 | 1.0 |
| titanita | 0.0 | 0.1 |
| schorlomita | 0.0 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.1 | 0.1 |
| goethita | 3.3 | 3.0 |
| ilmenita | 0.6 | 0.6 |
| anatásio-rutilo | 0.6 | 1.1 |
| perovskita | 0.0 | 0.0 |

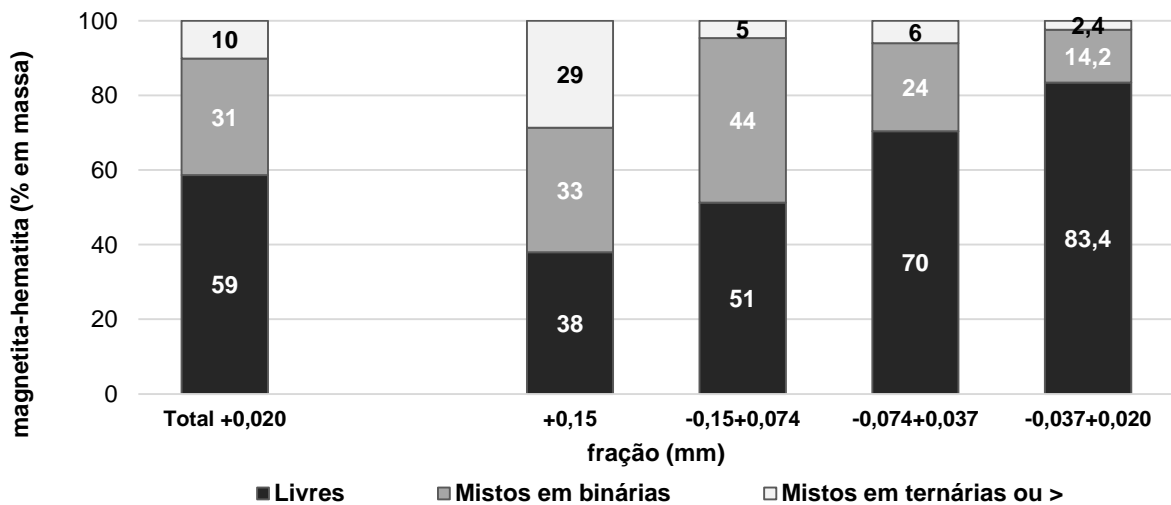
| | | |
|---|-----|-----|
| zirkelita-zirconolita | 0.1 | 0.0 |
| oxidos-MnBa | 0.1 | 0.0 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.5 | 0.5 |
| <hr/> | | |
| <i>Distribuição - ternárias ou ></i> | | |
| apatita | 0.4 | 0.4 |
| aluminofosfatos | 0.1 | 0.1 |
| monazita | 0.0 | 0.0 |
| quartzo | 1.1 | 1.1 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.1 |
| titanita | 0.1 | 0.0 |
| schorlomita | 0.1 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.1 | 0.0 |
| goethita | 0.7 | 0.6 |
| ilmenita | 0.1 | 0.2 |
| anatásio-rutilo | 0.1 | 0.1 |
| perovskita | 0.0 | 0.0 |
| zirkelita-zirconolita | 0.0 | 0.0 |
| oxidos-MnBa | 0.1 | 0.1 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.2 | 0.2 |
| <hr/> | | |

- Magnetita-hematita

- Pilha 7640:476



- Pilha 7641:475

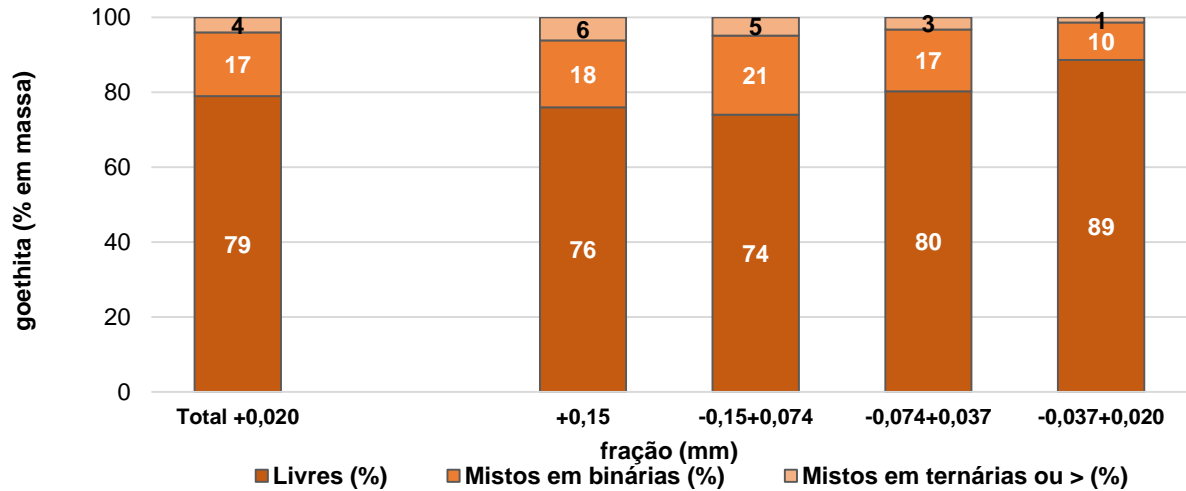


| Pilha | 7640 | 7641 |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| Fração (mm) | Total +0,020 | Total +0,020 |
| Livres (%) | 60 | 59 |
| Mistos em binárias (%) | 30 | 31 |
| Mistos em ternárias ou > (%) | 10 | 10 |
| <i>Distribuição - binárias</i> | | |
| apatita | 1.5 | 2.4 |
| aluminofosfatos | 0.4 | 0.6 |
| monazita | 0.0 | 0.0 |
| quartzo | 0.4 | 1.0 |
| argilominerais | 0.5 | 0.5 |
| piroxênio | 0.0 | 0.1 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.0 |
| titanita | 1.6 | 0.1 |
| schorlomite | 0.0 | 0.0 |
| goethita | 5.7 | 8.8 |

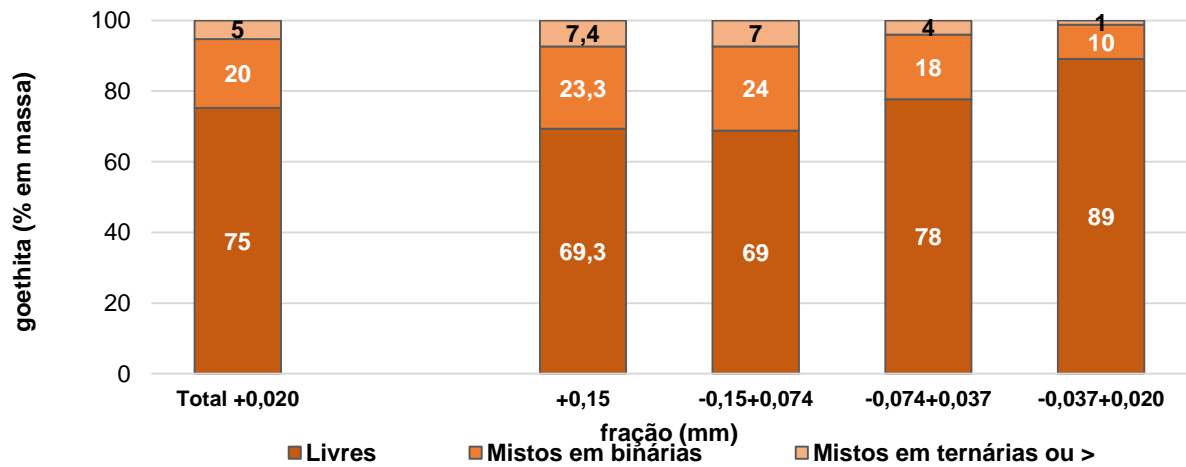
| | | |
|---|------|------|
| ilmenita | 17.2 | 15.6 |
| anatásio-rutilo | 2.0 | 1.9 |
| perovskita | 0.2 | 0.1 |
| zirkelita-zirconolita | 0.1 | 0.1 |
| óxidos-MnBa | 0.0 | 0.0 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.0 | 0.0 |
| <hr/> | | |
| <i>Distribuição - ternárias ou ></i> | | |
| apatita | 1.0 | 1.6 |
| aluminofosfatos | 0.2 | 0.3 |
| monazita | 0.3 | 0.0 |
| quartzo | 0.2 | 0.9 |
| argilominerais | 0.6 | 0.2 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.1 | 0.0 |
| titanita | 0.5 | 0.4 |
| schorlomita | 0.0 | 0.1 |
| goethita | 2.4 | 1.6 |
| ilmenita | 2.9 | 2.9 |
| anatásio-rutilo | 1.4 | 1.4 |
| perovskita | 0.1 | 0.1 |
| zirkelita-zirconolita | 0.1 | 0.3 |
| óxidos-MnBa | 0.1 | 0.0 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.2 | 0.1 |
| <hr/> | | |

- Goethita

- Pilha 7640:476



- Pilha 7641:475

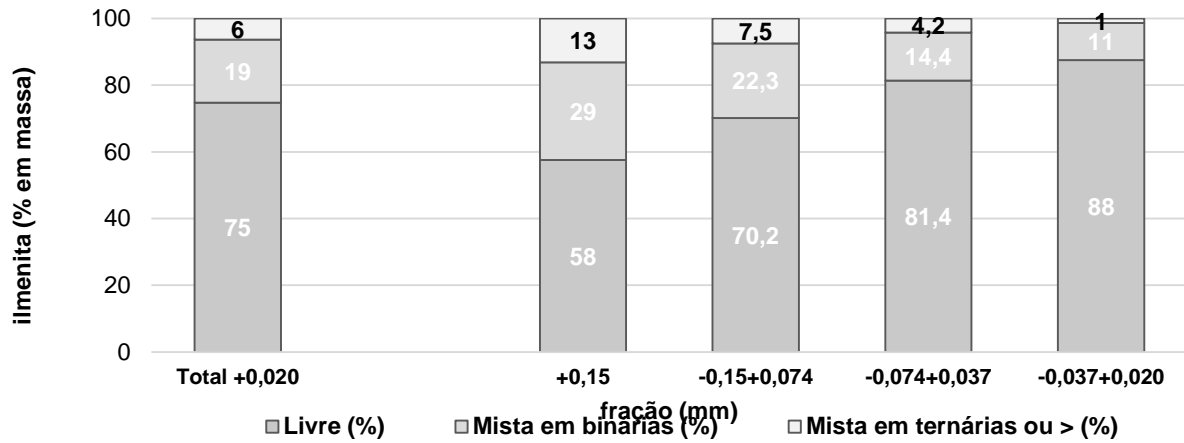


| Pilha | 7640 | 7641 |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| Fração (mm) | Total +0,020 | Total +0,020 |
| Livres (%) | 79 | 75 |
| Mistos em binárias (%) | 17 | 20 |
| Mistos em ternárias ou > (%) | 4 | 5 |
| <i>Distribuição - binárias</i> | | |
| apatita | 4.0 | 5.2 |
| aluminofosfatos | 2.2 | 2.7 |
| monazita | 1.7 | 1.3 |
| quartzo | 2.4 | 2.8 |
| argilominerais | 2.2 | 2.3 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.0 |
| titanita | 0.0 | 0.0 |
| schorlomita | 0.0 | 0.0 |

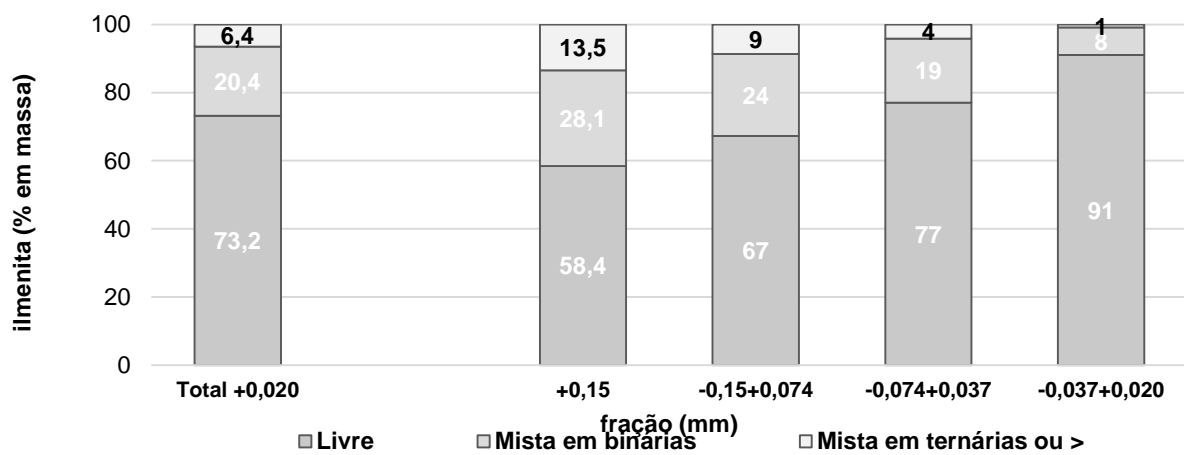
| | | |
|---|-----|-----|
| magnetita-hematita | 1.4 | 1.4 |
| ilmenita | 1.8 | 1.4 |
| anatásio-rutilo | 0.5 | 0.7 |
| perovskita | 0.0 | 0.1 |
| zirkelita-zirconolita | 0.1 | 0.2 |
| óxidos-MnBa | 0.6 | 0.9 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.2 | 0.5 |
| <hr/> | | |
| <i>Distribuição - ternárias ou ></i> | | |
| apatita | 0.9 | 0.8 |
| aluminofosfatos | 0.5 | 0.5 |
| monazita | 0.1 | 0.2 |
| quartzo | 0.8 | 1.3 |
| argilominerais | 0.6 | 0.5 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.0 |
| titanita | 0.1 | 0.0 |
| schorlomita | 0.0 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.2 | 0.2 |
| ilmenita | 0.4 | 0.6 |
| anatásio-rutilo | 0.2 | 0.4 |
| perovskita | 0.0 | 0.0 |
| zirkelita-zirconolita | 0.1 | 0.1 |
| óxidos-MnBa | 0.1 | 0.2 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.1 | 0.3 |
| <hr/> | | |

- Ilmenita

- Pilha 7640:476



- Pilha 7641:475

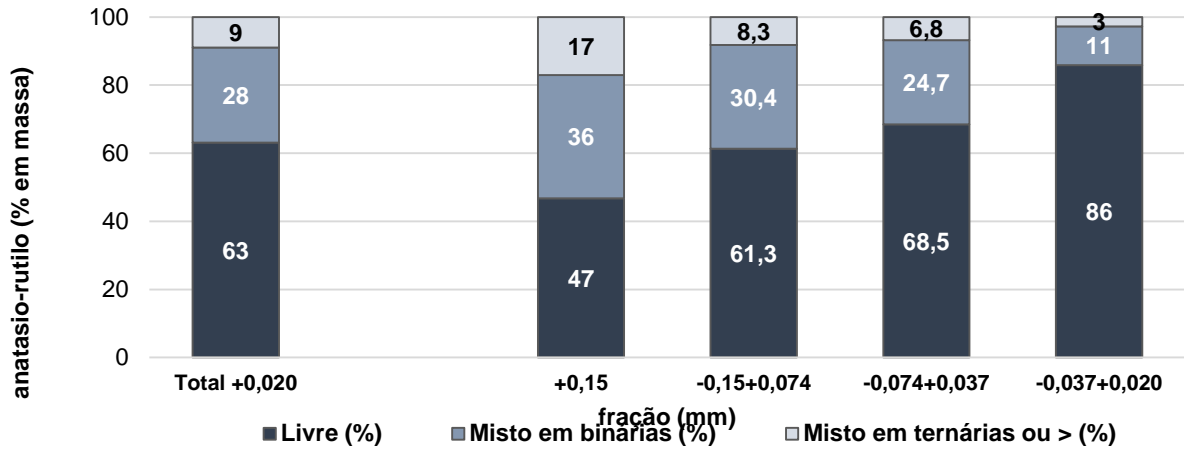


| Pilha | 7640 | 7641 |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| Fração (mm) | Total +0,020 | Total +0,020 |
| Livre (%) | 75 | 73,2 |
| Mista em binárias (%) | 19 | 20,4 |
| Mista em ternárias ou > (%) | 6 | 6,4 |
| <i>Distribuição - binárias</i> | | |
| apatita | 3,9 | 6,0 |
| aluminofosfatos | 1,1 | 0,7 |
| monazita | 0,1 | 0,1 |
| quartzo | 1,3 | 1,5 |
| argilominerais | 0,4 | 0,2 |
| piroxênio | 0,0 | 0,0 |
| Mg-Si-O | 0,0 | 0,0 |
| pirox-anfibólio | 0,1 | 0,2 |
| titanita | 0,0 | 0,1 |
| schorlomita | 0,0 | 0,0 |
| magnetita-hematita | 2,7 | 1,6 |
| goethita | 3,3 | 4,4 |

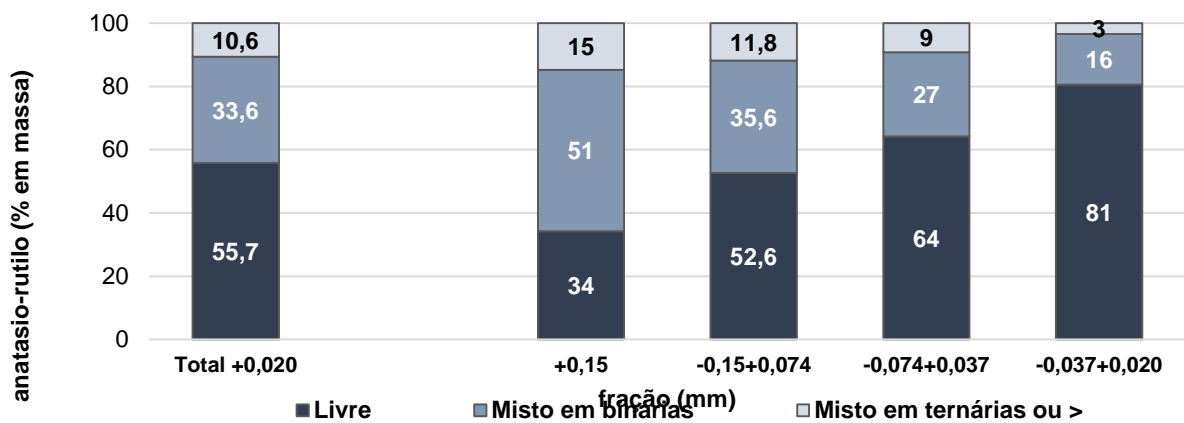
| | | |
|---|-----|-----|
| anatásio-rutilo | 4.1 | 4.0 |
| perovskita | 0.3 | 0.4 |
| zirkelita-zirconolita | 1.0 | 0.7 |
| óxidos-MnBa | 0.3 | 0.1 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.3 | 0.4 |
| <hr/> | | |
| <i>Distribuição - ternárias ou ></i> | | |
| apatita | 1.6 | 1.4 |
| aluminofosfatos | 0.3 | 0.4 |
| monazita | 0.0 | 0.1 |
| quartzo | 0.3 | 0.4 |
| argilominerais | 0.1 | 0.5 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.0 |
| titanita | 0.1 | 0.0 |
| schorlomita | 0.0 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.5 | 0.4 |
| goethita | 0.8 | 1.1 |
| anatásio-rutilo | 1.4 | 1.5 |
| perovskita | 0.3 | 0.3 |
| zirkelita-zirconolita | 0.5 | 0.3 |
| óxidos-MnBa | 0.1 | 0.1 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.2 | 0.1 |
| <hr/> | | |

- Anatásio-rutilo

- Pilha 7640:476



- Pilha 7641:475



| Pilha | 7640 | 7641 |
|-----------------------------|--------------|--------------|
| Fração (mm) | Total +0,020 | Total +0,020 |
| Livre (%) | 63 | 55,7 |
| Misto em binárias (%) | 28 | 33,6 |
| Misto em ternárias ou > (%) | 9 | 10,6 |

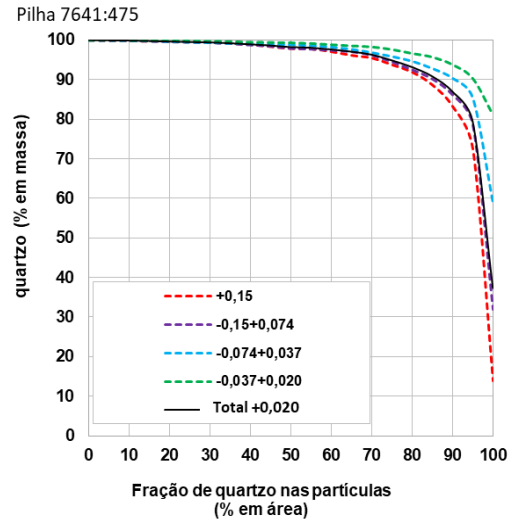
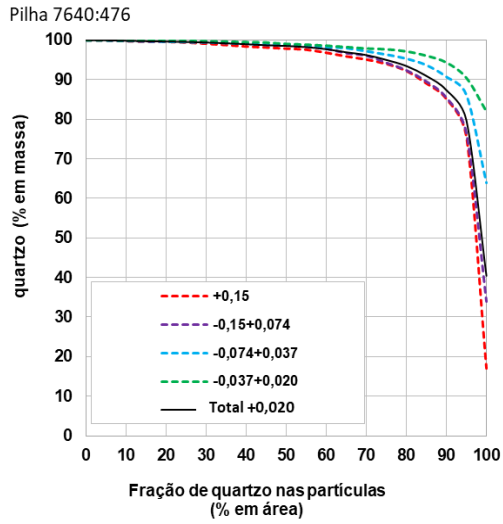
Distribuição - binárias

| | | |
|-----------------------|-----|-----|
| apatita | 2.5 | 2.1 |
| aluminofosfatos | 0.7 | 1.6 |
| monazita | 2.8 | 3.1 |
| quartzo | 0.9 | 1.5 |
| argilominerais | 1.2 | 1.7 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.0 |
| titanita | 0.7 | 1.3 |
| schorlomita | 0.0 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.5 | 1.3 |
| goethita | 2.2 | 1.9 |
| ilmenita | 7.5 | 6.9 |
| perovskita | 6.4 | 8.3 |
| zirkelita-zirconolita | 0.8 | 1.2 |

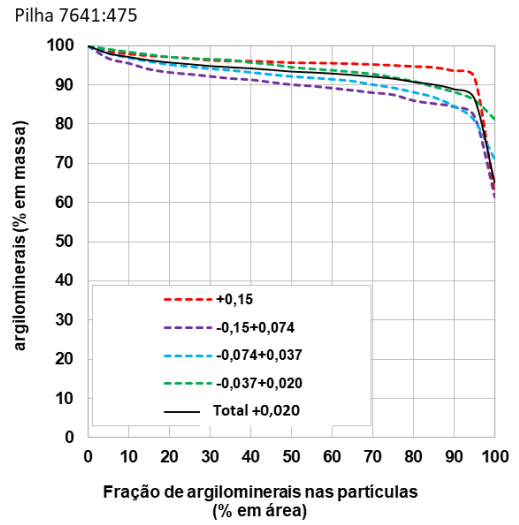
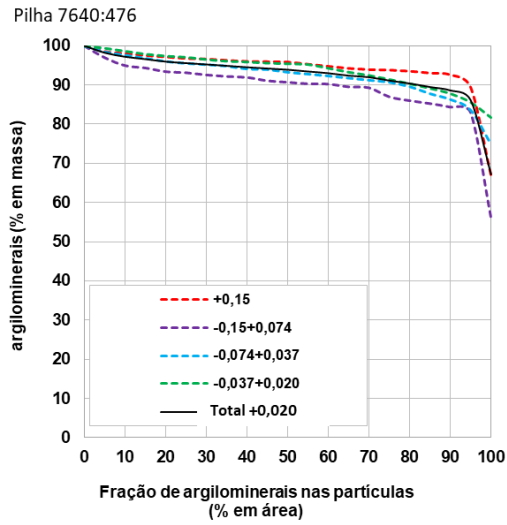
| | | |
|---|-----|-----|
| óxidos-MnBa | 0.1 | 1.0 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 1.6 | 1.6 |
| <hr/> | | |
| <i>Distribuição - ternárias ou ></i> | | |
| apatita | 1.3 | 1.5 |
| aluminofosfatos | 0.3 | 0.3 |
| monazita | 0.4 | 0.4 |
| quartzo | 0.8 | 0.6 |
| argilominerais | 0.1 | 0.4 |
| piroxênio | 0.0 | 0.0 |
| Mg-Si-O | 0.0 | 0.0 |
| pirox-anfibólio | 0.0 | 0.0 |
| titanita | 0.6 | 0.7 |
| schorlomita | 0.0 | 0.0 |
| magnetita-hematita | 0.3 | 0.4 |
| goethita | 0.7 | 1.5 |
| ilmenita | 2.1 | 3.0 |
| perovskita | 1.2 | 0.8 |
| zirkelita-zirconolita | 0.3 | 0.3 |
| óxidos-MnBa | 0.2 | 0.0 |
| pirocloro | 0.0 | 0.0 |
| outros | 0.6 | 0.7 |
| <hr/> | | |

APÊNDICE C – Grau de liberação

- Quartzo

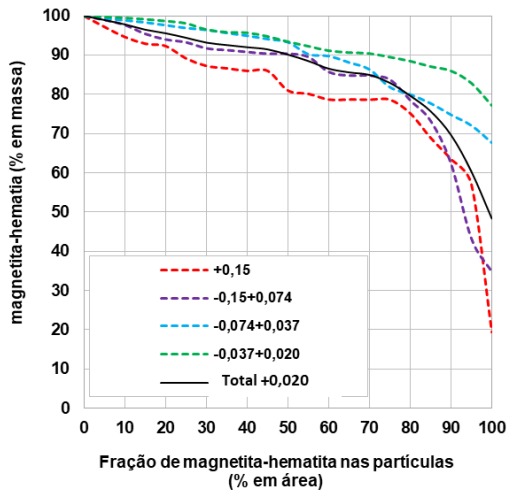


- Argilominerais

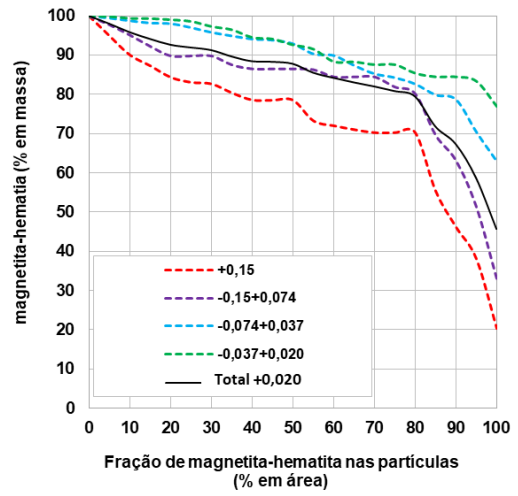


- Magnetita-hematita

Pilha 7640:476

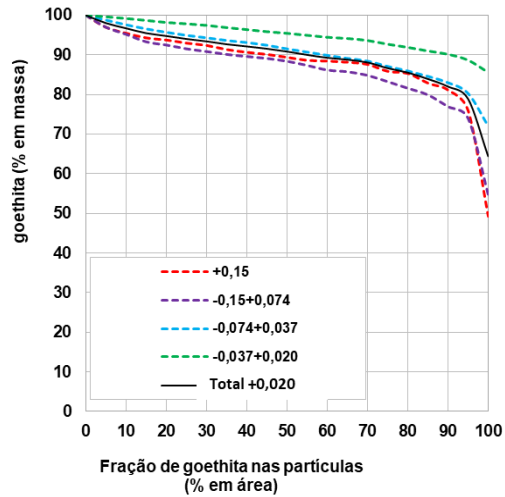


Pilha 7641:475

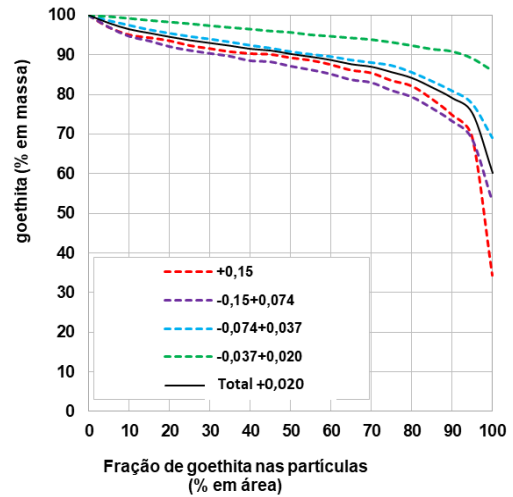


- Goethita

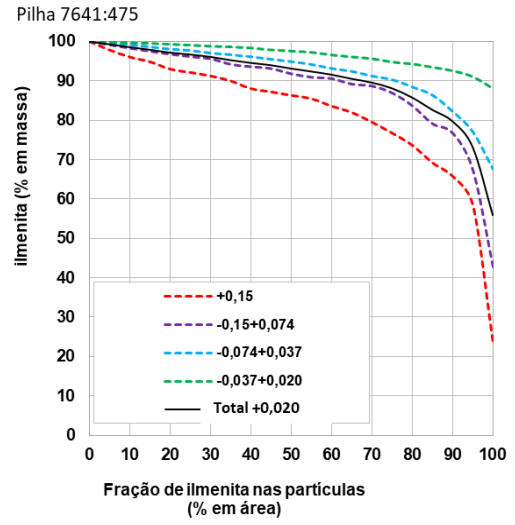
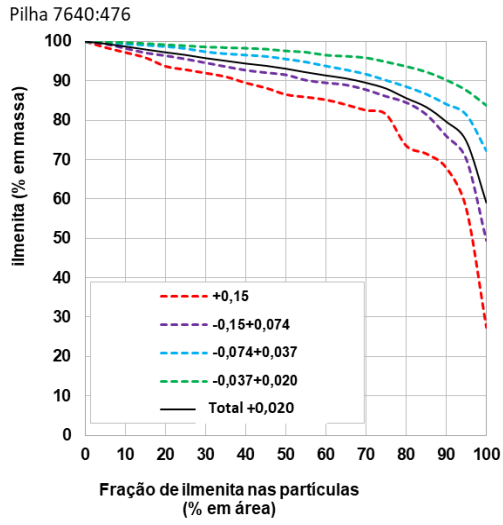
Pilha 7640:476



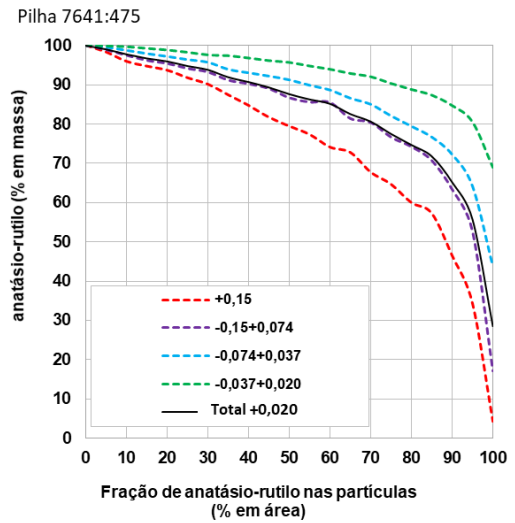
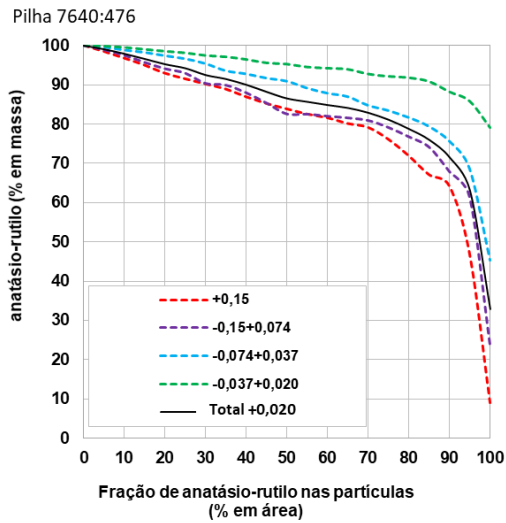
Pilha 7641:475



• Ilmenita



• Anatásio-rutilo



APÊNDICE D – Tabela de dados da análise de aderência.

| Pilha | Analito | Planejado (Modelo CMP) | Executado (Amostra PP - CMA) |
|----------|-------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 7640:476 | P₂O₅ap | 14.0 | 13.2 |
| | MgO | 1.6 | 2.0 |
| | SiO₂ | 20.8 | 22.0 |
| | Fe₂O₃ | 25.8 | 26.6 |
| | RCP | 1.3 | 1.3 |
| | P₂O₅ | 14.7 | 13.9 |
| | CAO | 19.1 | 17.8 |
| | AL₂O₃ | 3.3 | 3.4 |
| | BAO | 0.3 | 0.3 |
| | TiO₂ | 6.3 | 5.8 |
| | MNO | 0.7 | 0.8 |
| | NB₂O₅ | 0.3 | 0.3 |
| | BASO₄ | 0.2 | 0.2 |
| | RecMassa | 23.6 | 27.1 |
| | RecMet | 58.9 | 71.1 |
| | RecFlo | 74.8 | 84.1 |
| | P ₂ O ₅ CF | 34.5 | 35.0 |
| 7641:475 | P₂O₅ap | 13.8 | 14.0 |
| | MgO | 1.2 | 2.1 |
| | SiO₂ | 20.9 | 18.2 |
| | Fe₂O₃ | 26.7 | 27.2 |
| | RCP | 1.3 | 1.3 |
| | P₂O₅ | 14.8 | 12.9 |
| | CAO | 18.7 | 15.8 |
| | AL₂O₃ | 3.6 | 4.0 |
| | BAO | 0.3 | 0.4 |
| | TiO₂ | 5.5 | 5.5 |
| | MNO | 0.6 | 0.8 |
| | NB₂O₅ | 0.3 | 0.3 |
| | BASO₄ | 0.2 | 0.2 |
| | RecMassa | 26.4 | 25.2 |
| | RecMet | 54.7 | 62.9 |
| | RecFlo | 71.5 | 80.1 |
| | P ₂ O ₅ CF | 35.8 | 35.0 |