

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

**ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO E DO GRAU DE LIBERAÇÃO DE MAGNETITA
EM UM SILICATO DE MAGNÉSIO**

Aluno: Ulisses Ditlef

Orientador: Prof. Pedro Benedito Casagrande

Coorientadora: Prof.^a Andréia Bicalho Henriques

JULHO 2022.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Pedro Casagrande e Prof.^a Andréia Bicalho, pelos conselhos e atenção durante a preparação do trabalho.

À minha família, por todo apoio, paciência e compreensão.

À Hélvio Barcelos, Esther Matos e Alberto Lúcio Afonso pelo auxílio e paciência.

Ao Dr. Ottávio Carmignano pela oportunidade e orientação.

Aos amigos e colegas que não foram citados e que sempre estiveram comigo me auxiliando.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 3.1 - Amostra de bronzita serpentinito procedente da Saxônia..... | 15 |
| FIGURA 3.2 - Amostra de Dunito Serpentinizado, advinda de Minas Gerais, e sua seção delgada, proveniente do processo de serpentinização de peridotitos com presença de olivinas..... | 15 |
| FIGURA 3.3 - Amostra de metapiroxênio, decorrente do estado de Minas Gerais, oriundo da serpentinização de piroxênios..... | 16 |
| FIGURA 3.4 - Ocorrências de rochas industriais na Região Central do estado de Minas Gerais, incluindo o serpentinito..... | 16 |
| FIGURA 3.5 - Superfície quadrada e retangular de peneiramento..... | 20 |
| FIGURA 3.6 - Cyclosizer Warman possui hidrociclones invertidos em série..... | 22 |
| FIGURA 3.7 - Representação das partículas livres e mistas usadas no cálculo de liberação..... | 23 |
| FIGURA 3.8 - Tipos de partículas mistas: 1 – justaposta; 2 – inclusão; 3 – envolvimento e 4 – disseminação..... | 24 |
| FIGURA 3.9 - Separador magnético tipo Jones (de Carrossel) | 26 |
| FIGURA 4.1- Peneirador vibratório de bancada utilizado..... | 29 |
| FIGURA 4.2 - Ábacos de correção correspondentes a temperatura, vazão, densidade e tempo de elutriação..... | 31 |
| FIGURA 4.3 - Cyclosizer em funcionamento separando os finos do metapiroxênio | 32 |
| FIGURA 4.4 - Série de 5 funis utilizados para o recolhimento dos materiais retidos no Cyclosizer..... | 32 |
| FIGURA 4.5 - Separador magnético tipo LIMS de baixa intensidade..... | 33 |
| FIGURA 4.6 - Separador magnético de alta intensidade CARPCO 3x4L..... | 34 |
| FIGURA 4.7 - Visualização das partículas do dunito serpentinizado por um esteriomicroscópio de lupa binocular..... | 35 |
| FIGURA 4.8 - Microscópio de lupa binocular Olympus (80X) utilizado para determinação do grau de liberação do dunito serpentinizados..... | 35 |
| FIGURA 4.9 - Difrátômetro Philips-PANalytical modelo PW2400..... | 36 |
| FIGURA 4.10 - Equipamento da marca Shimadzu modelo EDX-720 utilizado..... | 37 |
| FIGURA 4.11 - Pastilhas analisadas..... | 37 |
| FIGURA 4.12 - Prensa hidráulica Nowak..... | 38 |
| FIGURA 5.1 - Microscópio Axioskope 40 Zeiss com câmera Axiocam 208 color ZEISS acoplada na parte superior..... | 50 |
| FIGURA 5.2 - Imagem microscópica de dunito serpentinizado – 500 µm (em vermelho: mineral opaco de magnetita disseminado em uma fase de lizardita) | 50 |
| FIGURA 5.3 - Imagem microscópica de dunito serpentinizado – 300 µm (em vermelho: mineral opaco de magnetita disseminado em uma fase de lizardita) | 51 |
| FIGURA 5.4 - Imagem microscópica de dunito serpentinizado – 75 µm (em vermelho: mineral opaco de magnetita disseminado em uma fase de lizardita) (em azul: fase evidente de antigorita) | 51 |
| FIGURA 5.5 - Imagem microscópica de dunito serpentinizado – 45 µm..... | 52 |

FIGURA 5.6 - Imagem microscópica de dunito serpentizado – 850 μm (em vermelho: mineral opaco de magnetita disseminado em uma fase de lizardita) **52**

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 3.1 – Série de peneiras mais utilizadas..... | 20 |
| TABELA 4.1 - Malha das peneiras utilizadas no peneiramento vibratório de bancada | 28 |
| TABELA 4.2 - Tamanhos limites de separação do Cyclosizer..... | 29 |
| TABELA 4.3 - Condições operacionais do Cyclosizer..... | 30 |
| TABELA 5.1 - Massas retidas e respectivas massas de Gaudin..... | 39 |
| TABELA 5.2 - Valores de k e m para cada modelagem..... | 40 |
| TABELA 5.3 - Tabela com resultados de D10,D50 e D90 do dunito serpentinizado.... | 41 |
| TABELA 5.4 - Tabela de condições operacionais do Cyclosizer..... | 41 |
| TABELA 5.5 - Fatores de correção..... | 42 |
| TABELA 5.6 - Tamanhos limites de separação de cada hidrociclone..... | 43 |
| TABELA 5.7 - Porcentagens de massas retidas simples, acumulada e passante..... | 43 |
| TABELA 5.8 - Menores valores de m e k para o somatório dos erros ao quadrado dos modelos GGS e RR em relação aos dados experimentais..... | 43 |
| TABELA 5.9 - Passante experimental, modelo GGS e RR e o quadrado de seus erros... | 44 |
| TABELA 5.10 - Massas passantes e retidas no separador magnético tipo LIMS..... | 45 |
| TABELA 5.11 - Massas passantes e retidas no separador magnético CARPCO 3x4L... | 46 |
| TABELA 5.12 - Tabela de frequência absoluta da magnetita e o seu grau de liberação total..... | 47 |
| TABELA 5.13 - Análise Química Dunito serpentinizado in natura..... | 53 |
| TABELA 5.14 - Análise química metapiroxênio..... | 54 |
| TABELA 5.15 - Análise Química Dunito S. Retido em baixo campo..... | 54 |
| TABELA 5.16 - Análise química Dunito S. passante em baixo campo..... | 55 |
| TABELA 5.17 - Análise Química Metapiroxênio passante em baixo campo..... | 55 |
| TABELA 5.18 - Análise Química metapiroxênio retido em baixo campo..... | 55 |
| TABELA 5.19- Análise Química Dunito S. passante em alto campo..... | 56 |
| TABELA 5.20 - Análise Química Dunito S. retido em alto campo..... | 57 |
| TABELA 5.21 - Análise Química metapiroxênio passante em alto campo..... | 57 |
| TABELA 5.22 - Análise Química metapiroxênio retido em alto campo..... | 58 |
| TABELA 5.23 - Fases minerais das amostras de Dunito S..... | 58 |
| TABELA 5.24- Fases minerais das amostras de metapiroxênio..... | 59 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| GRÁFICO 5.1 - Análise granulométrica do dunito serpentizado..... | 39 |
| GRÁFICO 5.2 - Soma dos erros ao quadrado..... | 40 |
| GRÁFICO 5.3 - Ábacos usados para determinar o fator de correção dos valores acertados de densidade, vazão, tempo de elutriação e temperatura..... | 42 |
| GRÁFICO 5.4 - Gráfico comparativo entre os modelos..... | 44 |
| GRÁFICO 5.5 - Soma dos erros do quadrado dos modelos de GGS e RR..... | 45 |
| GRÁFICOS 5.6 - 5.7 - Índices de liberação de magnetita nas granulometrias de 1200 e 850 μm , respectivamente..... | 47 |
| GRÁFICOS 5.8 - 5.9 - Índices de liberação de magnetita nas granulometrias de 500 e 300 μm , respectivamente..... | 47 |
| GRÁFICOS 5.10 - 5.11 - Índices de liberação de magnetita nas granulometrias de 150 e 75 μm , respectivamente..... | 48 |
| GRÁFICO 5.12 - Índice de liberação de magnetita na granulometrias de 45 μm | 48 |
| GRÁFICO 5.13 - Grau de Liberação da magnetita para as Faixas Granulométricas Consideradas..... | 49 |

SUMÁRIO

| | | |
|---|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | OBJETIVOS | 13 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| | 3.1 Formação e Geologia do Serpentinito | 14 |
| | 3.2 Depósitos Nacionais | 17 |
| | 3.3 Aplicação do Serpentinito na Agricultura | 17 |
| | 3.4 Aplicação do Serpentinito como carga mineral em polímeros | 17 |
| | 3.5 Análise de Fluorescência de Raio-x por dispersão de energia (EDS) | 18 |
| | 3.6 Análise por Difratomia de raios X (DRX)..... | 18 |
| | 3.7 Análise Granulométrica por peneiramento | 19 |
| | 3.8 Análise Granulométrica por Cyclosizer..... | 21 |
| | 3.9 Grau de Liberação – Método de Gaudin..... | 23 |
| | 3.10 Separação Magnética | 25 |
| 4 | METODOLOGIA | 27 |
| | 4.1 Coleta e preparo das amostras | 27 |
| | 4.2 Procedimentos experimentais | 27 |
| | 4.3 Análise granulométrica | 27 |
| | 4.4 Sub-Peneiramento (Ciclosizer) | 29 |
| | 4.4 Separação Magnética | 33 |
| | 4.5 Grau de Liberação..... | 34 |
| | 4.4 Análises Químicas..... | 36 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| | 5.1 Análise Granulométrica | 39 |
| | 5.1 Sub-peneiramento Cyclosizer | 41 |
| | 5.2 Separação Magnética | 45 |
| | 5.3 Grau de Liberação..... | 46 |
| | 5.4 Análise Química | 53 |
| | 5.5 Difratomia de Raios-X..... | 58 |
| 6 | CONCLUSÕES | 60 |
| 7 | SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS..... | 61 |
| | ANEXOS | 64 |

RESUMO

As rochas classificadas como silicatos de magnésios, devido aos seus altos teores de magnésio e silício, abrangem uma gama de aplicações em seguimentos relevantes como siderurgia, agricultura e indústria química. No entanto, a presença de algumas fases ferríferas, são impeditivos para a sua aplicação como carga mineral em alguns produtos específicos no setor industrial de polímeros, sendo primordial o estudo do comportamento magnético dessa rocha através de ensaios de separação magnética. O objetivo desse estudo buscou caracterizar amostras de duas litologias distintas de um silicato de magnésio previamente moído, em moinhos pendulares, com o intuito de mensurar a redução dos teores de ferro, e o grau de liberação de suas fases ferríferas, após ser submetido a ensaios de separação magnética. Determinar a composição química, as fases minerais e a distribuição granulométrica. Sendo assim, testes de separação magnética em campos magnéticos de baixo e alto grau foram realizados para quantificar e separar as fases portadoras de ferro. As amostras para o estudo foram obtidas de uma mineradora que exporta silicato de magnésio em uma mina ao ar livre localizada no estado de Minas Gerais. Foram realizados ensaios em 2 amostras, com 2 faixas granulometrias e 2 tipos de minérios, analisá-las quimicamente e obter suas fases minerais, determinar suas curvas granulométricas, realizar testes de separação magnética e analisar o grau de liberação da magnetita nas diferentes faixas de tamanho. Os testes de separação magnética foram aplicados em duas litologias conhecidas como dunito serpentizado e metapiroxênito, após passarem por um processo de moagem, com o intuito de averiguar as variações nos teores de ferro sob a influência de campos de baixa, 800 GAUSS, e alta intensidade, 11.000 GAUSS. Foram determinadas as granulometrias das amostras, apontado o grau de liberação das fases férricas, análises químicas quantitativas e das fases presentes com difratometria de raio-X antes e após a separação magnética. Observou-se que os ensaios de separação conseguiram reduzir consideravelmente os teores de Fe_2O_3 do dunito (50%) se comparado com a diminuição obtida no metapiroxênito (5,75%). A fase principal portadora de ferro detectada pelo difratômetro foi a magnetita, em ambas as litologias com concentrações de 4,7% para o dunito serpentizado e aproximadamente 1% para o metapiroxênito. Além da magnetita outras fases minerais comuns às duas rochas foram detectadas como a lizardita e o talco. A granulometria do dunito serpentizado, $D_{50}=101 \mu m$, não consegue liberar de modo eficiente as fases ferromagnéticas, foi perceptível o grande número de partículas arrastadas, principalmente, sob efeito de alto campo magnético. O resultado do grau de liberação total do dunito serpentizado foi de 2,6%. Características intrínsecas ao mineral como opacidade, conter uma certa diversidade na sua

composição mineral e o arranjo espacial do tipo disseminado das fases ferríferas dificultaram a ponto de inviabilizar o método de Gaudin para a determinação do grau de liberação do silicato de magnésio. Os resultados do estudo foram promissores, exibindo evidências e criando expectativas para a concepção e viabilidade de uma rota de processamento.

Palavras — chaves: Concentração de Magnetita; Grau de Liberação de Magnetita; Silicato de Magnésio.

ABSTRACT

Rocks classified as magnesium silicates, due to their high contents of magnesium and silicon, cover a range of applications in relevant segments such as steel, agriculture and chemical industry. However, the presence of some iron phases are impediments for its use as mineral filler in some specific products in the polymers industrial area, making it fundamental to study the magnetic behavior of this rock through magnetic separation tests. This study aims to characterize samples of two different lithologies of a magnesium silicate previously grounded, in different pendulum mills, in order to measure the reduction of the iron contents, and the degree of release of its iron phases, after being subjected to magnetic separation tests. Also, it aims to determine the chemical composition, the mineral phases and the granulometric distribution. Therefore, magnetic separation tests in low and high degree magnetic fields were performed to quantify and separate the iron-bearing phases. The samples used in this study were obtained from a mining company that exports magnesium silicate in an open-air mine located in the state of Minas Gerais, Brazil. Tests were carried out on 2 samples, with 2 granulometry ranges and 2 types of ores, to chemically analyze them and obtain their mineral phases, determine their granulometric curves, carry out magnetic separation tests and analyze the degree of magnetite release in the different size ranges. The magnetic separation testes were applied in two lithologies known as serpentinized dunite and metapyroxenite, after going through a milling process, in order to investigate the variations in iron contents under the influence of fields of low intensity, 800 GAUSS, and high intensity, 11.000 GAUSS. The granulometries of the samples were determined, indicating the degree of release of the iron phases, quantitative chemical analyses and the phases present with x-ray diffractometry before and after magnetic separation. It was noted that the separation tests managed to considerably reduce the Fe_2O_3 contents from the dunite (50%) when compared to the decrease obtained from the metapyroxenite (5.75%). The main iron-bearing phase detected by the diffractometer was magnetite, in both lithologies with a 4,7% concentration for the serpentinized dunite and approximately 1% for metapyroxenite. In addition to the magnetite, other common mineral phases to both rocks were detected such as lizardite and talc. The granulometry of the serpentinized dunite, $D_{50}=101 \mu\text{m}$, cannot efficiently release the ferromagnetic phases, the large number of particles entrained mainly under the effect of a high magnetic field was noticeable. The result of the total release degree of serpentinized dunite was 2.6%. Intrinsic characteristics of the mineral such as opacity, having a certain diversity in its mineral composition and the spatial arrangement of the widespread type of iron phases made it too

difficult to the point of making Gaudin's method impossible to determine the degree of magnesium silicate release. The results from the study were promising, providing evidence and creating expectations for the conception and feasibility of a processing route.

Key Words: Magnetite Concentration; Degree of Magnetite Release; Magnesium Silicate.

1 INTRODUÇÃO

Rochas e minerais industriais (RMI) tornaram-se bens imprescindíveis para a produção de uma infinidade de produtos, que sem sua existência comprometeria a existência humana no mundo moderno. A rocha metamórfica Serpentinó, composto principalmente por silicatos de magnésio, faz parte deste grupo de minerais que segundo Perez (2001), constituem bens representados por “materiais naturais” empregados na atividade humana, não para obter metais ou energia, mas pelas suas propriedades físicas, químicas ou ornamentais, manifestas no mineral ou rocha tal qual como são extraídas, ou após uma transformação não metalúrgica.

Para Ciminelli (2005), a funcionalidade múltipla que o mineral industrial pode desenvolver é o seu principal diferencial no segmento dos não-metálicos e explorar esta diversidade é o caminho para a rentabilidade e o crescimento da participação no mercado do mineral em questão.

O serpentinito e a esteatita são as litologias mais abundantes do depósito estudado, localizado no estado de Minas Gerais. Essa litologia e suas variações segundo Ferreira (2017), estão presentes em muitos países como Itália, Austrália, Nova Zelândia e os Estados Unidos. Essa rocha possui uma variada gama de aplicações: como fertilizante, refratário, como carga mineral no processo de vulcanização da borracha, em revestimentos e agregados na construção civil e fundente anti-clustering para processos metalúrgicos (CARMIGNANO *et al.*, 2020).

Fases minerais como cromita, magnetita e hematita são muitas vezes encontrados nas diferentes litologias do serpentinito (FERREIRA, 2017). Essas fases, ao todo, possuem teores médios em óxidos de 7–10% dificultando sua utilização como carga mineral para vulcanização de alguns compostos a base de polímeros, muito utilizados para confecção de peças de revestimento automotivos, visto que a presença do ferro fragiliza alguns pontos do material gerando trincas (ORÉFICE *et al.*, 2012). Por essa razão, há uma demanda de estudos visando observar a eficiência e o comportamento do serpentinito ao ser submetido a separação magnética, sob efeito de diferentes intensidades, e como o grau de liberação de suas fases ferríferas influenciam no processo.

2 OBJETIVOS

Caracterizar amostras de duas litologias distintas de um silicato de magnésio previamente moído, em moinhos pendulares, com o intuito de mensurar a redução dos teores de ferro, e o grau de liberação de suas fases ferríferas, após ser submetido a ensaios de separação magnética. Determinar composição química com ensaios de EDX, as fases minerais com ensaios de DRX e a distribuição granulométrica obedecendo a série Tyler de peneiras e Cyclosizer.

Os testes de separação magnética em campos magnéticos de baixo e alto grau serão necessários para quantificar e separar as fases portadoras de ferro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo tem como objetivo explorar alguns tópicos da literatura que sejam relevantes para este trabalho, tais como alguns aspectos gerais da rocha serpentinito sobre sua formação geológica e algumas de suas aplicações industriais.

3.1 Formação e Geologia do Serpentinito

Os Serpentinitos derivam de rochas ultramáficas conhecidas como dunitos, peridotitos e piroxênitos. Sendo esses últimos formados principalmente pelos minerais olivinas e piroxênios e resultam da cristalização de magmas ricos em ferro e magnésio, com o manto como local de origem e as crostas como locais de cristalização. As formações dos serpentinitos acontecem em seguida a essas cristalizações, mas em ambientes e condições muito diferentes (COSTA & CAMPELLO, 2017)

A serpentinitização é o processo de formação do serpentinito que ocorre na crosta localizadas acima do manto da terra, continentais e oceânicas, mas principalmente nas últimas e envolvendo sempre a alteração de rochas peridotíticas e piroxênitos expostos ou que se encontram no interior das mesmas. Considerando a composição das crostas oceânicas, em boa parte formadas por rochas com olivinas e piroxênios, se explica o porquê do maior volume de serpentinitos nas mesmas, quando comparado com aquele presente nas crostas continentais (COSTA & CAMPELLO, 2017)

Esse processo decorre do contato destas rochas com fluidos, em especial com a água. Nestas condições de baixas temperaturas, peridotitos com maior conteúdo em olivina são serpentinizados e minerais tais como serpentina $[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]$ e brucita $[Mg, Fe (OH)_2]$ são formados. Se, por outro lado, o conteúdo for maior em piroxênios, a serpentinitização ocorre, mas com formação de serpentina e talco $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$. As reações podem ser complexas e outros minerais, se presentes, podem reagir e levar à formação de mais serpentina, como no caso da hidratação do diopsídio, sendo um piroxênio cálcico. No que lhe concerne, esta reação libera sílica que, em presença de água, pode reagir com a brucita e formar mais serpentina (COSTA & CAMPELLO, 2017).



FIGURA 3.1 - Amostra de bronzita serpentinito procedente da Saxônia.
Fonte: SCHUMANN, 1982.

O serpentinito é uma rocha de granulação fina, verde-escura, com propriedades magnéticas, baixa densidade, e, composta principalmente pelos minerais crisotila, a lizardita e a antigorita. A serpentina define o subgrupo de minerais filossilicatos, com sítios trioctedrais preenchidos por diferentes cátions como Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} e Al^{3+} . Cromita e magnetita são minerais comumente encontrados em serpentinitos (FERREIRA, 2017).



FIGURA 3.2 - Amostra de Dunito Serpentinizado, advinda de Minas Gerais, e sua seção delgada, proveniente do processo de serpentinização de peridotitos com presença de olivinas.
Fonte: Autor, 2022

Os principais depósitos de serpentinito onde existe sua exploração, ocorrem no estado de Minas Gerais. As principais áreas encontram-se associadas ou não, com rochas metamórficas, normalmente quartzo-feldspática e com rochas variando entre o arqueano e o mesoproterozóico. Estão localizadas principalmente nos municípios de Nova Lima, Ouro Branco, Catas Altas, Santa Bárbara e Piranga (COSTA & CAMPELLO, 2017).



FIGURA 3.3 - Amostra de metapiroxênito, decorrente do estado de Minas Gerais, oriundo da serpentinização de piroxênios.
Fonte: Autor, 2022

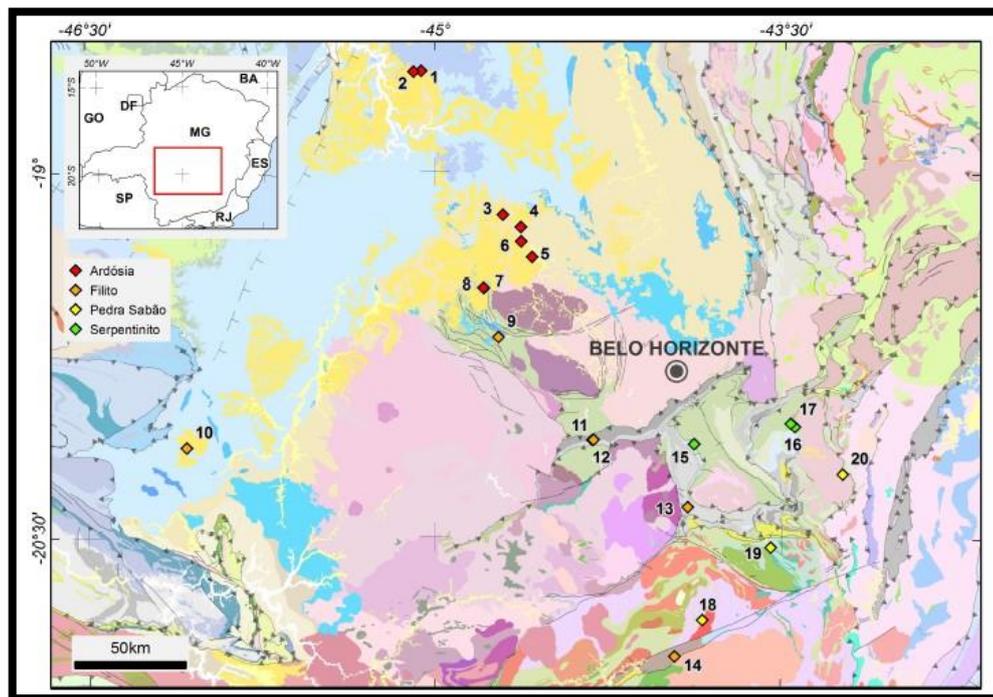


FIGURA 3.4 - Ocorrências de rochas industriais na Região Central do estado de Minas Gerais, incluindo o serpentinito
Fonte: COSTA & CAMPELLO, 2017.

3.2 Depósitos Nacionais

No ano de 2022 existem 58 processos ativos na Agência Nacional de Mineração (ANM) dentre autorização e requerimento de pesquisa assim como concessão e requerimento de lavra para o Serpentinó. Esses processos estão presentes em 4 regiões do País nos estados de: Minas Gerais, Tocantins, Paraná, São Paulo, Espírito Santo, Goiás, Pará, Alagoas e Santa Catarina (ANM, 2022)

3.3 Aplicação do Serpentinó na Agricultura

Na agricultura o serpentinó é considerado um agromineral viável para ser aplicado no solo. Para Luz; Sampaio e França (2010), ele pode ser utilizado no processo de calagem do solo, correção da sua acidez, e como corretivo agrícola ao disponibilizar silicatos e micronutrientes para algumas culturas. Para o arroz, Zaidan (2003) propõe a utilização do serpentinó como fonte de silício. Já Kondorfer & Costa (2003), o indicam como remineralizador e corretivo de solos devido as suas fontes de silício e magnésio. No estado da Bahia, Teixeira (2010), chegou a mesma conclusão. O serpentinó corrigiu os solos ácidos da região elevando o pH do solo após seu emprego.

Santinato *et al.* (2012) comparou o emprego de três fontes de magnésio na cultura do café; o sulfato e o silicato de magnésio e uma fonte de fertilizante químico. Ao final do seu experimento, concluiu que a fonte de silicato de magnésio, serpentinó, além de aumentar consideravelmente a produção do grão, corrigiu a deficiência de magnésio existente no local.

3.4 Aplicação do Serpentinó como carga mineral em polímeros

Cargas minerais são aplicadas em compósitos poliméricos buscando principalmente redução de custo, melhorar o processamento, controle de densidade, efeitos ópticos, controle de expansão térmica, retardamento de chama, condutividade térmica, resistência elétrica e susceptibilidade magnética, além da melhora das propriedades mecânicas, tais como a dureza e a resistência ao rasgo (CIMINELLI, 1988).

Na patente de Carmignano (2021) é descrito o método de utilização do serpentinito como acelerador e ativador no processo de vulcanização de borrachas naturais (NR) e sintéticas, como os copolímeros aleatórios estireno-butadienos (SBR). A presença da rocha foi capaz de reduzir o “*scorch time*” em 50%, e acelerar a velocidade de vulcanização em 200%. Além disso, aumentou o módulo de elasticidade, a resistência mecânica (em 30%) e a deformação na fratura (em mais de 100%).

3.5 Análise de Fluorescência de Raio-x por dispersão de energia (EDS)

Nessa técnica a fluorescência de raios-X emitida pela amostra é direcionada para um detector de estado sólido que produz uma distribuição de pulsos “contínuos”, estas tensões são proporcionais à entrada de fótons de energia. Este sinal é processado por um analisador multicanal (MCA), que produz um espectro digital acumulado que pode ser processado para obtenção de dados analíticos. Para a análise quantitativa dos elementos, utilizam-se padrões com concentrações conhecidas dos elementos a serem analisados (SEARS; YOUNG; ZEMANSKY, 2008).

Na análise por dispersão de comprimento de onda (WDS), a fluorescência de raios-X emitida pela amostra é dirigida para um monocromador de grade de difração. A grade de difração utilizada normalmente é um cristal único. Ao variar o ângulo de incidência e partida do cristal, um único comprimento de onda de raios-X pode ser selecionado (SEARS; YOUNG; ZEMANSKY, 2008)

3.6 Análise por Difratomia de raios X (DRX)

A técnica é utilizada para determinar as diferentes fases de minerais das amostras estudadas. Ela consiste em incidir uma radiação em uma determinada amostra, e, detectar o feixe de fótons, considerando um material cristalino, com átomos ordenados e periodicamente arranjados no espaço.

Os raios-X são radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda que se estendem de 0,1 a 1000 Angstroms, podendo ser polarizados, refletidos e difratados (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). O feixe difratado, sem mudança do comprimento de onda, resultante da

dispersão dos raios-X pelos elétrons dos átomos do cristal, só é produzido se for satisfeita a equação de Bragg: ($n\lambda=2.d.\text{sen}\theta$), sendo:

λ = comprimento de onda dos raios difratados,

d = distância dos átomos ou da rede de planos cristalinos – distância interplanar,

n = número inteiro correspondente a ordem de difração

θ = ângulo oblíquo ou ângulo de Bragg.

A difração de raios X é empregada não só para a identificação de 95% das substâncias inorgânicas, como da mesma forma para os estudos das estruturas cristalinas (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

3.7 Análise Granulométrica por peneiramento

A análise das dimensões das partículas possui importância para diversos estudos para conhecer e entender como o material se comporta. Segundo Dias (2004), entender sobre a distribuição granulométrica permite deduzir indicações preciosas como, por exemplo, sobre a proveniência do material, sua disponibilidade de determinados tipos de partículas e sobre as possíveis rochas origem, além disso, como se daria seu transporte, dada a maturidade textura, resistência das partículas à abrasão e à alteração química, além de muitas outras características.

A análise granulométrica por peneiramento é muito utilizada na prática laboratorial, segundo Oliveira *et al.* (2018), consiste na definição do tamanho das partículas, além da periodicidade com que aparecem em uma faixa de tamanho. Sua importância se dá no estudo de caracterização tecnológica de minérios, no controle de qualidade de um produto para comercialização, na seleção de equipamentos, além da eficiência das etapas.

As peneiras utilizadas apresentam uma superfície de peneiramento, chamada de malha, elaborada por fios traçados perpendicularmente, formando aberturas que podem ser quadradas ou retangulares (VALADÃO *et al.*, 2007).

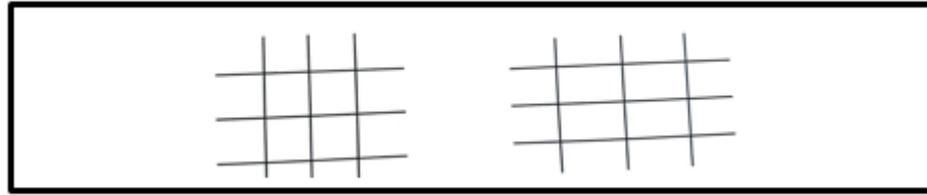


FIGURA 3.5 - Superfície quadrada e retangular de peneiramento.
 Fonte: VALADÃO *et al.*, 2007.

A análise granulométrica por peneiramento é caracterizada por utilizar uma escala granulométrica, uma série padronizada de peneiras que obedecem uma progressão geométrica entre elas (VALADÃO *et al.*, 2007)

$$a_n = a_0 r^n \tag{3.1}$$

Sendo:

a_n = abertura de ordem n

a_0 = abertura de referência ou base de escala

r = razão da escala ou base de escala.

Os resultados da análise granulométrica são dados em forma de tabelas e gráficos (Tabela3.1). Contendo principalmente as malhas das peneiras utilizadas com suas massas retidas e os valores em % retida e passantes acumuladas.

TABELA 3.1 – Serie de peneiras mais utilizadas
 Fonte: CETEM, 2010.

| Escala Tyler $r = \sqrt{2} = 1,414$ $a_0 = 74 \mu\text{m}$ | | Escala Richards $r = \sqrt[3]{2} = 1,19$ $a_0 = 1,0 \text{ mm} = 18$ malhas | | | Escala ISO |
|--|------------------|---|-------|-----------|------------|
| Malhas | mm | Malhas | mm | polegadas | Malhas |
| 3 | 6,680 | 3 | 6,35 | 0,250 | |
| | | 3 ½ | 5,66 | 0,223 | 3 ½ |
| 4 | 4,699 | 4 | 4,77 | 0,187 | |
| | | 5 | 4,00 | 0,157 | 5 |
| 6 | 3,327 | 6 | 3,36 | 0,132 | |
| | | 7 | 2,83 | 0,111 | 7 |
| 8 | 2,362 | 8 | 2,38 | 0,0937 | |
| | | 10 | 2,00 | 0,0787 | 10 |
| 10 | 1,651 | 12 | 1,68 | 0,0661 | |
| | | 14 | 1,41 | 0,0555 | 14 |
| 14 | 1,168 | 16 | 1,19 | 0,0469 | |
| | | 18 | 1,00 | 0,0394 | 18 (Base) |
| 20 | 0,833 | 20 | 0,841 | 0,0331 | |
| | | 25 | 0,707 | 0,0278 | 25 |
| 28 | 0,589 | 30 | 0,595 | 0,0234 | |
| | | 35 | 0,500 | 0,0197 | 35 |
| 35 | 0,417 | 40 | 0,420 | 0,0165 | |
| | | 45 | 0,354 | 0,0139 | 45 |
| 48 | 0,295 | 50 | 0,297 | 0,0117 | |
| | | 60 | 0,250 | 0,0098 | 60 |
| 65 | 0,208 | 70 | 0,210 | 0,0083 | |
| | | 80 | 0,177 | 0,0070 | 80 |
| 100 | 0,147 | 100 | 0,149 | 0,0059 | |
| | | 120 | 0,125 | 0,0049 | 120 |
| 150 | 0,104 | 140 | 0,105 | 0,0041 | |
| | | 170 | 0,088 | 0,0035 | 170 |
| | 200 (Base) 0,074 | 200 | 0,074 | 0,0029 | |
| | | 230 | 0,063 | 0,0025 | 230 |
| 270 | 0,053 | 270 | 0,053 | 0,0021 | |
| | | 325 | 0,044 | 0,0017 | 325 |
| 400 | 0,038 | 400 | 0,037 | 0,0015 | |

Muitos fatores podem influenciar os resultados da análise granulométrica. Segundo Valadão *et al.* (2007), a amostra precisa ser representativa, o tempo de peneiramento deve ser adequado ao tipo de material, o tipo de peneiramento efetuado, a seco, a úmido e combinado assim como a quantidade de massa do mineral a ser ensaiada.

Segundo Valadão *et al.* (2007), são usualmente utilizadas as equações de Gates-Gaudin-Schumann (GGS) e de Rosin Rammler (RR) para descrever matematicamente a distribuição granulométrica de uma amostra:

- Equação de GGS

$$Y = 100 \cdot (x/k)^m \quad (3.2)$$

Onde:

Y = % passante acumulada no tamanho x

m, k = constantes

- Equação de RR

$$Y = 100 \cdot e^{-(x/k)^m} \quad (3.3)$$

Onde:

Y = % retida acumulada

m, k = constantes

3.8 Análise Granulométrica por Cyclosizer

O Cyclosizer é uma configuração de hidrociclones invertidos em série, com o intuito de se obter um conjunto de produtos com granulometrias distintas. Esse conjunto de cicloclassificadores foi utilizado na determinação da distribuição granulométrica de amostras de serpentinito, na faixa de, aproximadamente, 10 a 50 μm , utilizado para materiais com densidade similar à do quartzo (2,7). Essa faixa estende-se para granulometrias abaixo de 4 μm , caso dos minerais e/ou minérios mais pesados.

A geometria de cada hidrociclone favorece a classificação, em decorrência dos diâmetros decrescentes na tubulação de entrada (alimentação) e de saída (*vortex*) na direção do fluxo. Essa redução dos diâmetros resulta em maiores velocidades da suspensão e forças centrífugas com intensidades elevadas no interior dos hidrociclones, promovendo um decréscimo do tamanho limite de separação das partículas (SAMPAIO *et al.*, 2007).

O diâmetro das partículas é determinado pela equação de Stokes, mostrada a seguir:

$$V = \frac{g d^2 (\delta - \rho)}{18\eta} \quad (3.4)$$

Onde:

V = velocidade de sedimentação (m/s)

d = diâmetros das partículas sólidas (m)

δ = massa específica das partículas sólidas (kg/m^3)

ρ = massa específica do líquido (kg/m^3)

η = viscosidade do líquido (kg/m.s)



FIGURA 3.6 - Cyclosizer Warman possui hidrociclones invertidos em série
Fonte: SAMPAIO *et al.*, 2007.

3.9 Grau de Liberação – Método de Gaudin

Na grande maioria dos minérios, o principal objetivo da fragmentação é a liberação dos diferentes minerais presentes na rocha. Assim, a liberação é um parâmetro de considerável importância no âmbito do tratamento de minérios, pois representa o pré-requisito mais importante para a utilização de métodos de concentração. A liberação, segundo Valadão *et al.* (2007), é a condição de liberdade mútua entre minerais presentes em um dado sistema. Assim, a liberação de uma dada espécie mineral é a porcentagem desta que ocorre como partículas livres em relação ao conteúdo total desse mineral, que ocorre na forma livre e associada.

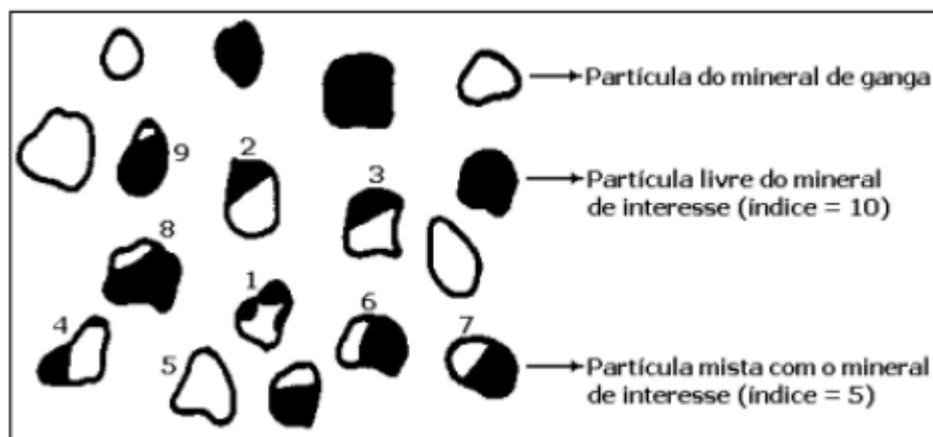


FIGURA 3.7 - Representação das partículas livres e mistas usadas no cálculo de liberação
Fonte: RAMOS, *et al.* 2015.

De forma análoga, o grau de associação pode ser definido como o percentual do mineral-minério que ocorre de forma associada no minério, em relação ao percentual que ocorre de forma livre e associada. Na prática, existem limites tecnológicos e econômicos para determinar o quanto fragmentar e qual o grau de liberação ideal para cada mineral, realizado por meio de estudos e ensaios industriais (VALADÃO *et al.*, 2007).

A quantificação da liberação de um mineral foi definida por Gaudin sendo:

$$gl_i = \frac{ql_i}{ql_i + qm_i} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

gl_i = grau de liberação da espécie i

ql_i = quantidade da espécie i que ocorre como partícula livre

qm_i = quantidade da espécie i que ocorre em partículas mistas

Segundo Valadão *et al.* (2007), a avaliação da liberação dos materiais pode ser realizada por vários métodos, sendo esses divididos em diretos e indiretos. O método de Gaudin é o principal representante da avaliação direta das amostras. Esse método consiste na observação da amostra em várias faixas granulométricas, utilizando-se de um microscópio óptico, de modo a obter o grau de liberação para cada uma delas. A maior restrição a esse método é quanto a cor do mineral de interesse frente aos demais, não sendo aplicável quando a cor do mineral de interesse difere muito dos demais.

Já os métodos indiretos baseiam-se em propriedades diferenciadoras dos minerais, como densidade, susceptibilidade magnética, condutividade e propriedades superficiais. Nesses métodos, o grau de liberação é obtido pela análise de resultados de concentração para cada faixa granulométrica ou por curvas de separabilidade.

A ocorrência de partículas mistas é um aspecto importante a ser considerado. Caso a partícula mista tenha 50% em volume de um mineral X, e, 50% em um mineral Y, sua densidade terá um valor entre os dois. Isso irá influenciar, além do seu comportamento em um processo de separação, também na obtenção de uma maior recuperação ou teor mais elevado no concentrado dependendo do posicionamento da partícula na concentração (VALADÃO *et al.*, 2007).

Existem 4 tipos básicos principais de partículas mistas (Figura 3.8) e o nível de dificuldade em se obter partículas liberadas sobre cada uma delas se dá de forma crescente a sua numeração.

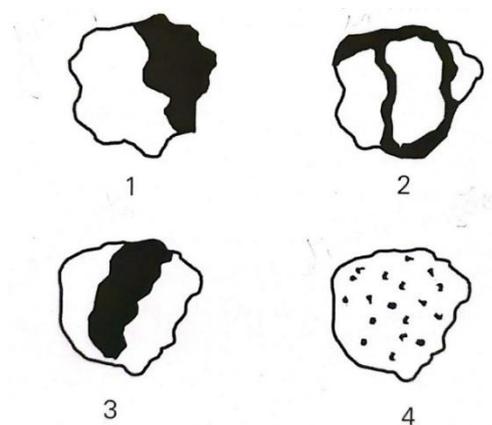


FIGURA 3.8 - Tipos de partículas mistas: 1 – justaposta; 2 – inclusão; 3 – envolvimento e 4 – disseminação

Fonte: VALADÃO *et al.*, 2007.

3.10 Separação Magnética

Segundo Valadão *et al.* (2007), a separação magnética vale-se da reação do comportamento das partículas minerais sob a ação de um campo magnético. O principal uso dos separadores magnéticos se dá para as fases ferríferas de magnetita e hematita de quartzo.

Existem os materiais paramagnéticos e diamagnéticos, esses são os dois principais grupos na classificação de seus atributos magnéticos. Os diamagnéticos são rebatidos, ao longo da linha de força magnética, para o ponto onde a intensidade desse ponto é menor. Um exemplo seria o mineral quartzo.

Já os materiais paramagnéticos tendem a se alinhar com as linhas de força sendo atraídas para pontos de maior intensidade deste campo. Ilmenita, cromita e rutilo são os principais exemplos de minerais que podem ser concentrados em separadores de alta intensidade (VALADÃO *et al.*, 2007).

Caso o mineral possua uma natureza intensamente paramagnética, esse material pode ser chamado ferromagnético e/ou ferrimagnético o que lhe caracteriza uma alta susceptibilidade às forças magnéticas. O principal exemplo seria do mineral magnetita (VALADÃO *et al.*, 2007).

As grandezas vetoriais que atuam no campo magnético são, a densidade magnética, e intensidade de campo, de acordo com sistema internacional (SI) são medidas em Tesla (T). Onde \vec{B} é o número de linhas de indução que passam através da partícula do mineral, e \vec{H} é a força de magnetização que induz a passagem das linhas de indução através da partícula (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Segundo Valadão *et al.* (2007), a chamada magnetização B (Tesla), está relacionada com a intensidade de magnetização M (ampère/m) pela Equação (3.6):

$$B = \mu_o (H + M) \quad (3.6)$$

Onde:

μ_o = permeabilidade no espaço = $4\pi \times 10^{-7}$ (Tesla.metro/ampère)

No vácuo $M = 0$ e no ar seu valor é irrelevante, então:

$$B = \mu_o H \quad (3.7)$$

A susceptibilidade magnética K é a grandeza que relaciona a intensidade de magnetização M de um material e o campo magnetizante aplicado H , conforme é mostrado na Equação (3.8):

$$K = \frac{M}{H} \quad (3.8)$$

Para os materiais paramagnéticos, K assume valores positivos inferiores a 10^{-3} . Já nos diamagnéticos, os valores são negativos e menores que 10^{-5} , em módulo.

O separador magnético tipo Jones (Figura 3.9), de alta intensidade, é um dos equipamentos mais utilizados em escala industrial. Há uma gama de separadores magnéticos que vão desde baixa até alta intensidade de campo, a seco ou a úmido.

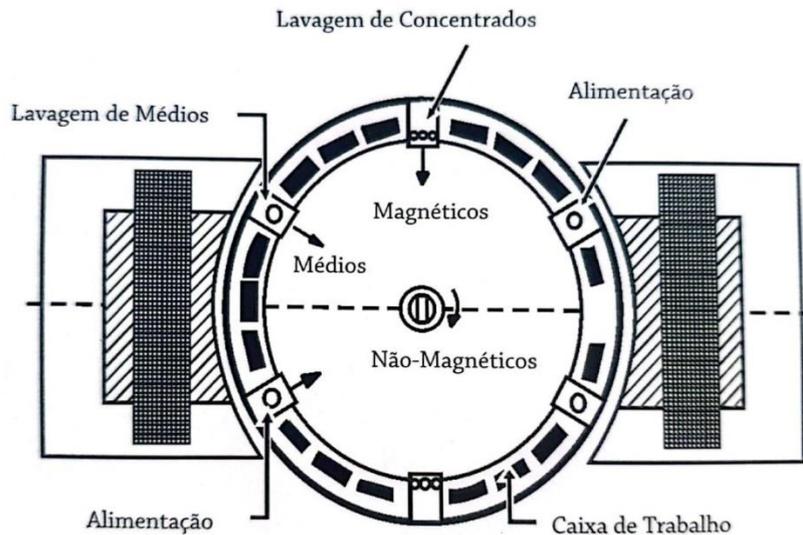


FIGURA 3.9 - Separador magnético tipo Jones (de Carrossel)
Fonte: VALADÃO *et al.*, 2007.

4 METODOLOGIA

4.1 Coleta e preparo das amostras

As amostras para o estudo foram obtidas de uma mineradora que explora silicato de magnésio em uma mina à céu aberto localizada no estado de Minas Gerais. Os processos de seleção dessas amostras obedecerão aos requisitos de qualidade seguidos pelo laboratório da companhia. Critérios geológicos e químicos são aferidos para determinar a litologia e assim direcionar os usos do minério presente nas frentes que serão desmontadas utilizando-se o método de detonação por explosivos.

Após a detonação, os materiais são carregados em caminhões do tipo rodoviário e transportados até a usina onde alimentará os britadores de mandíbula. Em seguida, o minério britado com granulometria entre 5 e 10 milímetros alimentará moinhos pendulares onde serão obtidos produtos com 2 granulometrias distintas, grossa, ($50\% < 100\mu\text{m}$) e média/fina ($70\% < 45\mu\text{m}$). Essas granulometrias fazem parte das especificações de alguns produtos oferecidos pela empresa.

Foram escolhidas amostras, de 2 kg, de duas litologias da rocha serpentinito pertencentes ao depósito estudado. Tais litologias são classificadas como Dunito Serpentinizado e Metapiroxênio. A amostra de Dunito serpentinizado se encontra em granulometria grossa e a do metapiroxênio em granulometria média/fina.

4.2 Procedimentos experimentais

Os ensaios consistem em selecionar 2 amostras, com 2 faixas granulométricas e 2 tipos de minérios, analisá-las quimicamente e obter suas fases minerais, determinar suas curvas granulométricas, realizar testes de separação magnética e analisar o grau de liberação da magnetita nas diferentes faixas de tamanho.

4.3 Análise granulométrica

As curvas granulométricas das amostras de Dunito serpentinizado e Metapiroxênio serão obtidas utilizando duas metodologias, por peneiramento convencional a seco em peneirador

vibratório de bancada com peneira circular de malha quadrada regular e outra para as partículas menores que 45 μm , o método de sub-peneiramento Cyclosizer.

Para a determinação da quantidade massa utilizada no teste, bem como na análise e tratamento dos dados coletados, utilizou-se a equação de Gaudin:

$$m_{m\acute{a}x}: n \cdot \left(\frac{d_i + d_s}{2} \right) \cdot A \cdot \rho \quad (4.1)$$

Onde:

- $m_{m\acute{a}x}$: massa de material máxima retida em uma peneira ao fim do peneiramento;
- d_i : abertura da peneira em análise;
- d_s : abertura da peneira imediatamente superior;
- A : área da peneira;
- ρ : densidade real do minério;
- n : número de camadas de partícula.

Para o peneiramento convencional foram utilizadas 7 peneiras (Figura 4.2) com aberturas que variam de 1200 μm a 45 μm (Figura 4.1).

TABELA 4.1 - Malha das peneiras utilizadas no peneiramento vibratório de bancada
Fonte: dados da pesquisa, 2022

| Abertura (μm) | Malha |
|----------------------------|-------|
| 1200 | #10 |
| 850 | #20 |
| 500 | #32 |
| 300 | #50 |
| 150 | #100 |
| 75 | #200 |
| 45 | #325 |



FIGURA 4.1- Peneirador vibratório de bancada utilizado
Fonte: Autor, 2022

As peneiras, foram previamente limpas e encaixadas umas nas outras em fileira, de forma crescente da abertura da malha 1200 micrômetros até 45 micrômetros, da base para o topo. O procedimento foi feito em apenas uma série de 30 minutos. Logo em seguida, o conteúdo de cada uma das peneiras foram pesados e etiquetados, separadamente.

4.4 Sub-Peneiramento (Ciclosizer)

No processo de sub-peneiramento, 5 hidrociclones invertidos ligados em série foram calibrados e projetados para classificar a faixa mais fina ($< 45\mu\text{m}$) das amostras. Os hidrociclones possuem dimensões limites de separação, demonstrados na tabela a seguir (Tabela 4.3):

TABELA 4.2 - Tamanhos limites de separação do Cyclosizer
Fonte: VALADÃO *et al.*, 2007 (modificado)

| Ciclone | Tamanho Limite de Separação | Erro |
|---------|-----------------------------|-----------|
| 1 | 42.7 | $\pm 0,5$ |
| 2 | 30.5 | $\pm 0,5$ |
| 3 | 22.1 | $\pm 0,5$ |
| 4 | 15 | $\pm 0,5$ |
| 5 | 12 | $\pm 0,5$ |

A preparação da polpa a ser injetada como alimentação no cyclosizer foi feita adicionando-se ao material contendo o silicato de magnésio, uma amostra de 50,6 gramas com granulometria inferior a 45 μm , uma solução de pH básico em um recipiente tipo béquer. Desse modo era esperado evitar a aglomeração de partículas. A polpa preparada foi então depositada na câmara de alimentação do cyclosizer com cautela de modo que todo o recipiente fosse ocupado, evitando assim entrada de ar.

Para ser feita a preparação do equipamento, um fluxo de água contínuo foi estabelecido no cyclosizer com a finalidade de dar vazão a qualquer porção de ar que se encontrava no circuito. De modo análogo, com a abertura da saída do *apex*, pretendeu-se retirar qualquer bolha de ar alojada em sua câmara. Uma vez estabelecida a operação do sistema em estado de equilíbrio, foram definidas condições operacionais de vazão, temperatura e tempo de elutriação (Tabela 4.4).

TABELA 4.3 - Condições operacionais do Cyclosizer
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Condições operacionais | |
|--|------|
| Vazão da água (L/min) | 11.4 |
| Temp. da água (°C) | 26 |
| Densidade do material (g/cm ³) | 2.65 |
| Tempo de elutriação (min) | 20 |
| Massa de alimentação (g) | 50.6 |

As condições operacionais definidas influenciam diretamente no tamanho efetivo de separação que ocorre de fato em cada hidrociclone. Dessa forma, foi necessário obter os fatores de correção para retificar os tamanhos limites de separação padronizados (Tabela 4.3), utilizando-se a equação 4.2.

$$d(e) = d_i \times f1 \times f2 \times f3 \times f4 \quad (4.2)$$

Onde:

$d(e)$ = Tamanho Efetivo de Separação do sistema;

d_i = Tamanho Limite de separação padrão;

$f1$ = fator de correção do parâmetro da temperatura do líquido;

$f2$ = fator de correção do parâmetro vazão;

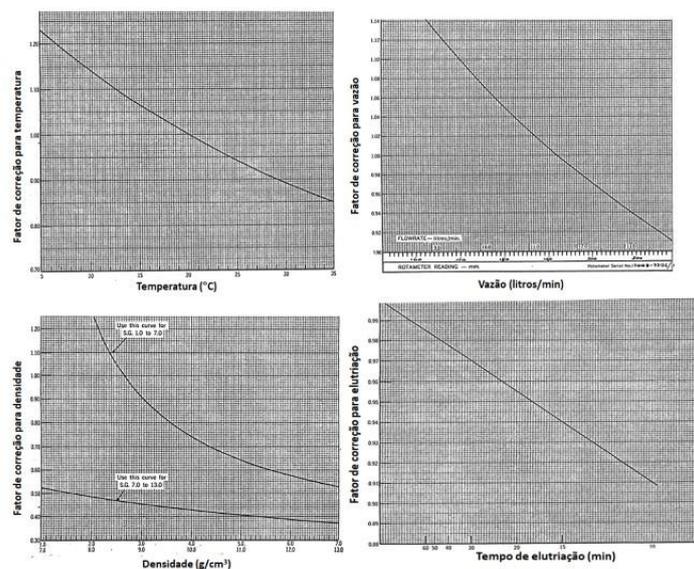
$f3$ = fator de correção do parâmetro densidade do material;

$f4$ = fator de correção do parâmetro tempo de elutriação

A determinação dos fatores de correção, observados na equação acima, é realizada através de gráficos pré-estabelecidos denominados ábacos (Figura 4.2) os quais apresentam em seu eixo X as medidas de cada parâmetro e em seu eixo Y o fator de correção do mesmo parâmetro, de forma que, observando o comportamento gráfico da função de cada ábaco podemos relacionar um fator de correção para cada medida.

FIGURA 4.2 - Ábacos de correção correspondentes a temperatura, vazão, densidade e tempo de elutriação

Fonte: CETEM, 2010



Uma vez estabelecida as condições de trabalho o circuito é alimentado com a polpa e a separação por tamanho ocorre. Ao final do processo não é possível recuperar o material do *overflow* do último ciclone devido a características inerentes ao próprio equipamento. A porção da polpa confinada na câmara do *apex* de cada hidrociclone é recolhida em ordem de menor para maior granulometria, garantindo aumento da vazão do sistema nos hidrociclone anteriores, e, por consequência, que as partículas nesses hidrociclones permaneçam aprisionadas em suas respectivas câmaras.



FIGURA 4.3 - Cyclosizer em funcionamento separando os finos do metapiroxênio
Fonte: Autor, 2022

Os filtros utilizados para retenção do material recolhido em cada câmara do *apex* são previamente pesados e postos sobre provetas distintas. Uma vez feita a deposição das diferentes porções de polpa em suas respectivas provetas e a retenção de sólidos nos filtros, esses foram levados até a estufa onde passaram pelo processo de secagem. Aguardado o tempo necessário para recuperação da umidade natural da amostra, cada filtro foi novamente pesado, dessa vez com o material retido, permitindo assim a aferição da massa retida para cada hidrociclone.



FIGURA 4.4 - Série de 5 funis utilizados para o recolhimento dos materiais retidos no Cyclosizer
Fonte: Autor, 2022

4.4 Separação Magnética

Devido à susceptibilidade magnética da magnetita, foi realizado o teste de separação magnética nas amostras com o intuito de determinar, em outras etapas, os teores de magnetita e por ventura de outras fases ferríferas, liberados no processo de moagem. Foram executados dois ensaios de separação para cada litologia, dunito serpentizado e metapiroxênito, utilizando-se dois separadores magnéticos, um com campo de baixa intensidade (LIMS) (Figura 4.5), de 800 gauss, e o segundo de alta intensidade (CARPCO 3X4L) (Figura 4.6), 11.000 gauss.



FIGURA 4.5 - Separador magnético tipo LIMS de baixa intensidade
Fonte: Autor, 2022

Amostras de 200 gramas de cada litologia foram misturados em água, passando por um processo de agitação que levaram alguns minutos. Em seguida, as polpas alimentaram os separadores, onde ocorreram a coleta dos produtos magnéticos e não magnéticos, e posteriormente foram devidamente secos e pesados.

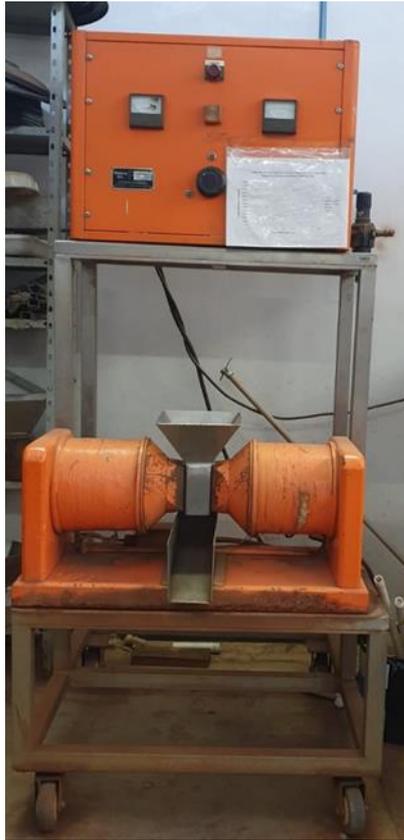


FIGURA 4.6 - Separador magnético de alta intensidade CARPCO 3x4L
Fonte: Autor, 2022

4.5 Grau de Liberação

Para o estudo do grau de liberação das fases ferríferas foi dada ênfase a litologia do tipo dunito serpentizado. Foi definido o método óptico baseando-se no método de Gaudin, visto que as cores dos principais minerais presentes (magnetita, talco e serpentina) seriam facilmente distinguíveis.

Primeiramente, foram analisadas 30 partículas retidas de cada malha proveniente da análise granulométrica, atribuindo assim, índices de 0-100% a cada partícula analisada. Com os dados coletados, gráficos foram plotados e analisados. A expectativa é de que os resultados obtidos mostrarão a tendência no aumento do grau de liberação do mineral de interesse à medida que a granulometria diminui assim como determinar a relação ótima.

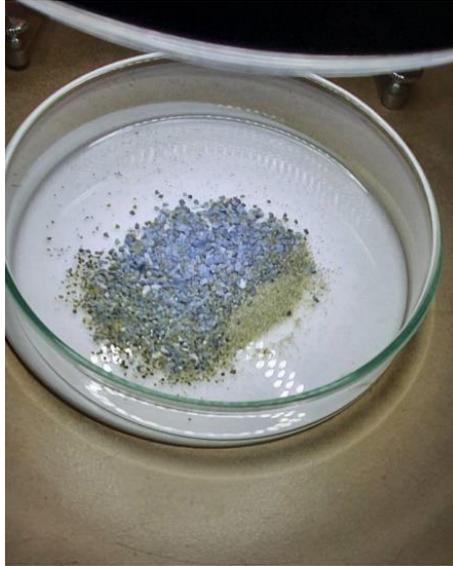


FIGURA 4.7 - Visualização das partículas do dunito serpentinizado por um esteriomicroscópio de lupa binocular
Fonte: Autor, 2022.

As amostras foram depositadas em placas de petri, e alocados na base do microscópio para análise. Os ajustes de luminosidade, foco e nível de aumento serão realizados para obter uma melhor visualização das partículas, assim como o uso da espátula para separá-las. Para isso, será utilizado um aumento de 40X para as frações mais grosseiras ($>106\mu\text{m}$), e 80X para as frações mais finas ($<106\mu\text{m}$).



FIGURA 4.8 - Microscópio de lupa binocular Olympus (80X) utilizado para determinação do grau de liberação do dunito serpentinizados
Fonte: Autor, 2022.

4.4 Análises Químicas

As oito amostras, mais duas de controle, obtidas no processo de separação magnética, que incluem materiais passantes e retidos das litologias dunito serpentizado e metapiroxênio, passaram por análises químicas visando obter os elementos químicos e as fases minerais presentes.

Os ensaios de caracterização das fases minerais das amostras por difração de raios-x foram obtidos a partir de um difratômetro Philips-PANalytical modelo PW2400 (Figura 4-9), utilizando radiação Cu e monocromador. O método de análise se baseia na comparação dos valores das distâncias Inter planares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas. Com o auxílio do software HighScorePlus as amostras foram analisadas qualitativamente e a partir de uma ferramenta presente no software citado, que utiliza o método de Rietveld, foi obtida as fases minerais de modo quantitativo.



FIGURA 4.9 - Difratômetro Philips-PANalytical modelo PW2400

Fonte: Autor, 2022.

A análise química foi realizada pelo método de espectrometria de fluorescência de raios-X por dispersão de energia, utilizando-se o equipamento da marca Shimadzu modelo EDX-720 (Figura 4.10). Essa análise forneceu a composição química do material de forma quantitativa, indicando os compostos presentes.



FIGURA 4.10 - Equipamento da marca Shimadzu modelo EDX-720 utilizado
Fonte: Autor, 2022.

As pastilhas (Figura 4.11) para a análise das amostras das duas litologias estudadas foram confeccionadas utilizando-se: moinho de panela, prensa hidráulica (Figura 4.12) e adicionando 10% em massa de cera de poliamida. Os elementos analisados incluíram: SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , CaO , NiO , K_2O , Ta_2O_5 e ZnO .



FIGURA 4.11 - Pastilhas analisadas
Fonte: dados da pesquisa, 2022.



FIGURA 4.12 - Prensa hidráulica Nowak
Fonte: Autor, 2022

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise Granulométrica

Antes da análise de dados se averiguou as massas retidas em cada malha ao final do peneiramento menores que a Massa de Gaudin, sendo a massa máxima de retenção de cada malha. Com base na Tabela 5-1, foi possível notar que todas as aberturas atenderam a esse requisito.

TABELA 5.1 - Massas retidas e respectivas massas de Gaudin

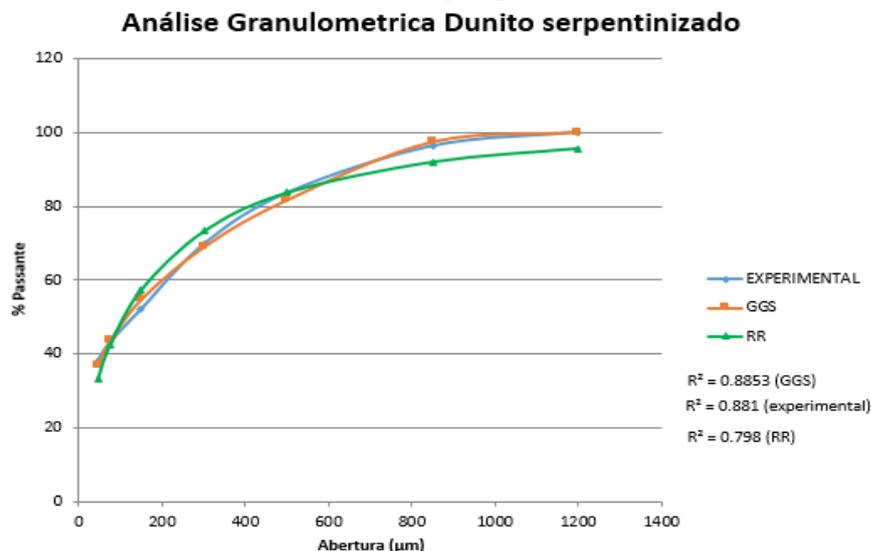
Fonte: Dados da pesquisa, 2022

| Abertura (µm) | Malha | Massa Retida (g) | %Retido Simples | Massa de Gaudin | |
|--------------------|-------|------------------|-----------------|-----------------|-----|
| 1200 | #10 | 0.134 | 0.053 | 361.779 | SIM |
| 850 | #20 | 9.357 | 3.716 | 256.260 | SIM |
| 500 | #32 | 41.318 | 16.407 | 150.741 | SIM |
| 300 | #50 | 35.020 | 13.906 | 90.445 | SIM |
| 150 | #100 | 44.220 | 17.559 | 45.222 | SIM |
| 75 | #200 | 22.604 | 8.976 | 22.611 | SIM |
| 45 | #325 | 12.658 | 5.026 | 13.567 | SIM |
| Fundo | | 86.524 | 34.357 | | |
| Somatório | | 251.835 | | | |
| Alimentação (g) | | 280.322 | | | |
| Perda de massa (g) | | 28.487 | | | |

A partir das informações presentes na Tabelas 5.1 foi possível plotar as curvas de distribuição granulométrica, as quais relacionam a abertura das peneiras e a porcentagem passantes (Gráfico 5.1). Dessa forma, realizou-se as modelagens de Gates-Gaudin-Schumann (GGS) e de Rosin Rammler (RR).

GRÁFICO 5.1 - Análise granulométrica do dunito serpentizado

Fonte: Dados da pesquisa, 2022



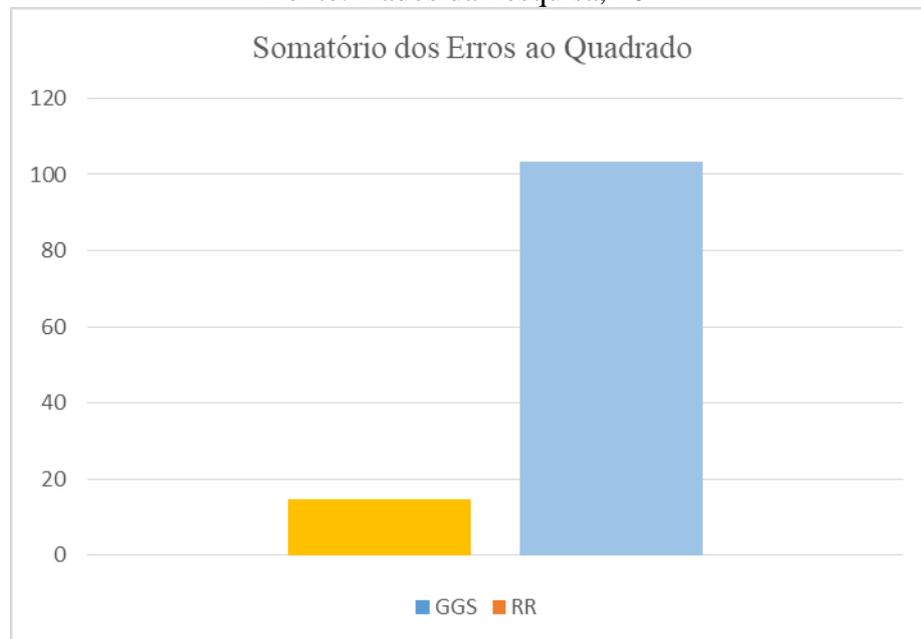
As modelagens foram feitas conforme as equações 3.2 e 3.3, obtendo os valores de k , módulo de distribuição, e m , módulo de tamanho, de forma aleatória (Tabela 5-2). Dessa forma, será possível encontrar os valores otimizados de cada uma das variáveis, ou seja, aqueles cujos somatórios dos quadrados dos erros sejam os menores possíveis. Nesse contexto é importante mencionar que o método de minimização adotado foi o oferecido pela ferramenta solver do Microsoft Excel.

TABELA 5.2 - Valores de k e m para cada modelagem
Fonte: Dados da pesquisa, 2022

| | M | K |
|-----|-------|---------|
| GGS | 0.333 | 920.778 |
| RR | 0.624 | 193.069 |

O somatório dos erros dos quadrados (Gráfico 5.2) tem como objetivo verificar qual modelo se aproxima melhor da distribuição granulométrica da amostra.

GRÁFICO 5.2 - Soma dos erros ao quadrado
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022



Nesse caso, o modelo Rosin-Rammler possui um menor erro, constatando-se que esse se aproxima melhor da curva de distribuição granulométrica do material estudado. A partir da equação (Equação 5.1) do comportamento da curva experimental, foram obtidos os valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} (Tabela 5.3).

$$Y = 20.281 \ln X - 43.683 \quad (5,1)$$

$$X = e^{\frac{(y+43.683)}{20,281}}$$

Sendo:

x = tamanho da partícula

y = porcentagem acumulada

TABELA 5.3 - Tabela com resultados de D10, D50 e D90 do dunito serpentizado
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| | Dunito Serpentizado (μm) |
|-----|---------------------------------------|
| D10 | 14.11 |
| D50 | 101.42 |
| D90 | 728.90 |

Apesar do ensaio se adequar à alguns parâmetros de controle de análise granulométrica, um outro fator relevante para a qualidade do peneiramento é a contaminação e perda de massa, observa-se uma perda de massa superior à 10%, o que diminui a confiabilidade dos dados obtidos.

5.1 Sub-peneiramento Cyclosizer

Os hidrociclones foram alimentados com uma massa de 50,6 gramas de metapiroxênio, com uma granulometria < 45 μm , e os parâmetros e condições operacionais específicas (Tabela 5.4) para determinação do tamanho limite de separação (Tabela 5.6) foram colhidas e tratadas a partir dos ábacos de correção (Gráficos 5.3 e Tabela 5.5).

TABELA 5.4 - Tabela de condições operacionais do cyclosizer
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Condições operacionais | |
|--|------|
| Vazão da água (L/min) | 11.4 |
| Temp. da água ($^{\circ}\text{C}$) | 26 |
| Densidade do material (g/cm^3) | 2.65 |
| Tempo de elutriação (min) | 20 |
| Massa de alimentação (g) | 50.6 |

GRÁFICO 5.3 - Ábacos usados para determinar o fator de correção dos valores acertados de densidade, vazão, tempo de elutriação e temperatura (Tabela 5.4)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

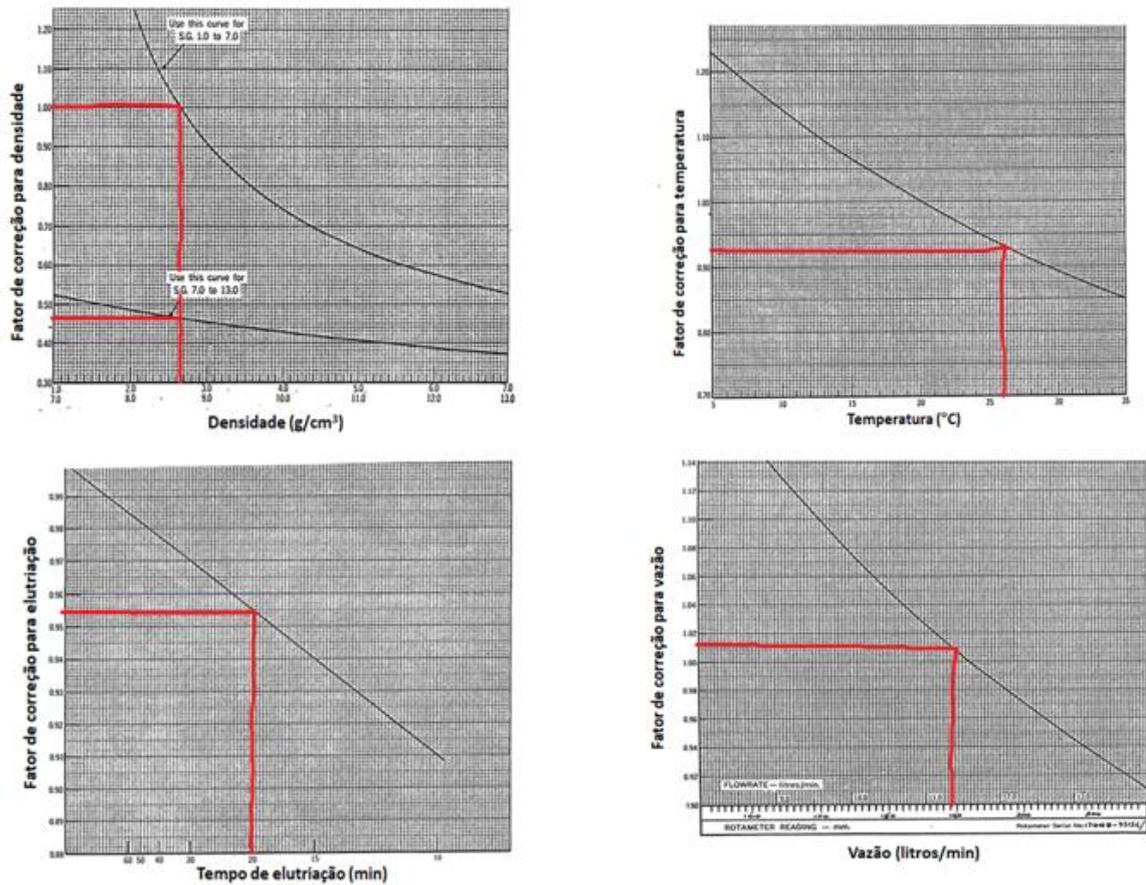


TABELA 5.5 - Fatores de correção

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| $De = D_i * f_1 * f_2 * f_3 * f_4$ | |
|--|-------|
| f1 = correção para temperatura | 0.950 |
| f2 = correção para vazão | 1.016 |
| f3 = correção para a densidade | 0.730 |
| f4 = correção para tempo de elutriação | 0.955 |
| Df | 0.673 |

TABELA 5.6 - Tamanhos limites de separação de cada hidrociclone
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Ciclones | Tamanho limite padrão (μm) | Tamanho efetivo de Separação |
|----------------|---|------------------------------|
| 1 ^o | 42.7 | 28.732 |
| 2 ^o | 30.5 | 20.523 |
| 3 ^o | 22.1 | 14.871 |
| 4 ^o | 15 | 10.093 |
| 5 ^o | 12 | 8.075 |

Já com os valores do tamanho efetivo de separação, bem como a massa da alimentação e massa retida em cada ciclone, foi determinado as porcentagens retidas simples, acumulada e passante de cada experimento e também a quantidade de massa perdida no *overflow* do quinto ciclone (massa da alimentação subtraída do somatório das massas retidas) ao final do processo (Tabela 5.7).

TABELA 5.7 - Porcentagens de massas retidas simples, acumulada e passante
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| | Tamanho efetivo de separação | Massa retida (g) | % Retida Simples | % Retida Acumulada | % Passante acumulada Experimental |
|-----------------------|------------------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Ciclone 1 | 28.732 | 20.380 | 40.277 | 40.277 | 59.723 |
| Ciclone 2 | 20.523 | 8.010 | 15.830 | 56.107 | 43.893 |
| Ciclone 3 | 14.871 | 8.690 | 17.174 | 73.281 | 26.719 |
| Ciclone 4 | 10.093 | 6.350 | 12.549 | 85.830 | 14.170 |
| Ciclone 5 | 8.075 | 5.440 | 10.751 | 96.581 | 3.419 |
| Overflow do ciclone 5 | 0.000 | 1.700 | 3.360 | 99.941 | 0.059 |
| Somatório | | 50.570 | 99.941 | | |

Da mesma forma que na análise granulométrica, foram utilizados os modelos de Rosin-Rammler e Gates-Gaudin-Schumann como comparação aos valores obtidos de modo experimental (Tabela 5.8). Os módulos de distribuição, m, e tamanho, k, foram escolhidos de forma ocasional (Tabela 5.9).

TABELA 5.8 - Menores valores de m e k para o somatório dos erros ao quadrado dos modelos GGS e RR em relação aos dados experimentais

| | M | K |
|-----|-------|--------|
| GGS | 1.403 | 40.217 |
| RR | 1.825 | 29.220 |

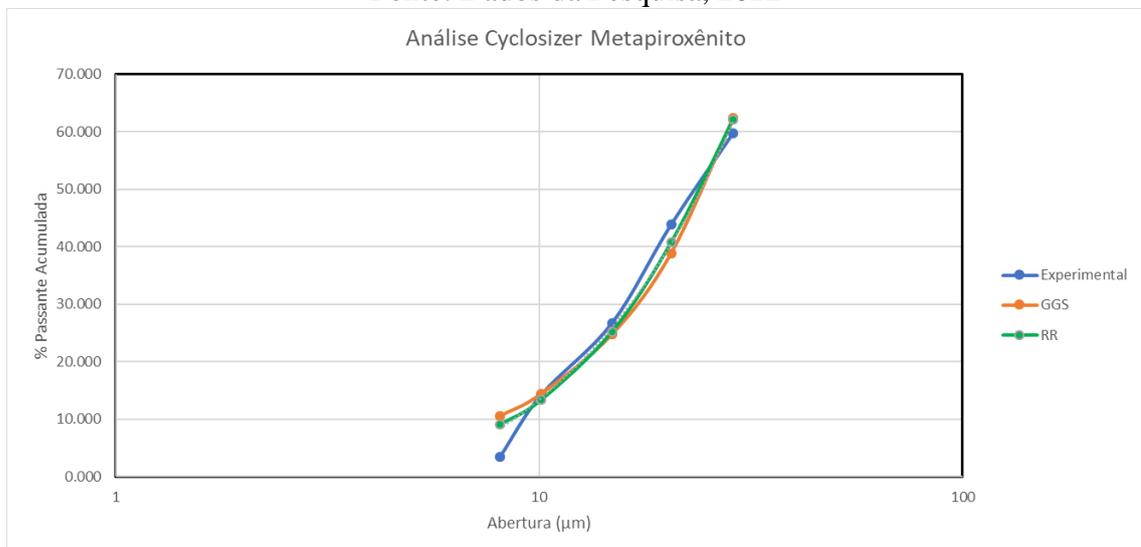
TABELA 5.9 - Passante experimental, modelo GGS e RR e o quadrado de seus erros
 Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| % Passante acumulada | | | Quadrado dos erros | |
|----------------------|--------|--------|--------------------|--------|
| Experimental | GGS | RR | GGS | RR |
| 59.723 | 62.379 | 62.081 | 7.055 | 5.560 |
| 43.893 | 38.900 | 40.829 | 24.931 | 9.392 |
| 26.719 | 24.751 | 25.283 | 3.875 | 2.064 |
| 14.170 | 14.368 | 13.384 | 0.039 | 0.618 |
| 3.419 | 10.504 | 9.118 | 50.203 | 32.484 |
| Soma dos erros | | | 86.103 | 50.119 |

Observando os resultados dos somatórios do quadrado dos erros se observa que o modelo Rosin-Rammler apresenta menor erro comparado ao modelo de Gates-Gaudin-Schuhmann sugerindo que seu modelo seja o mais próximo dos dados experimentados.

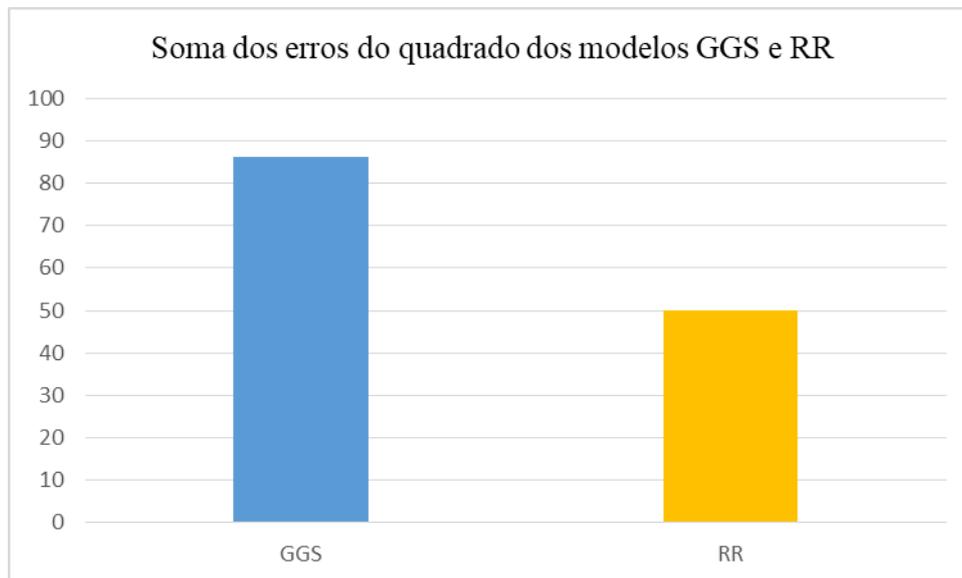
Foram plotados os gráficos de dispersão com linhas suaves e marcadores, sendo possível observar qual dos dois modelos mais se aproxima com os dados experimentais (Gráfico 5.4).

GRÁFICO 5.4 - Gráfico comparativo entre os modelos
 Fonte: Dados da Pesquisa, 2022



Ressaltando os gráficos de dispersão apresentados, observa-se que nenhum dos modelos reproduz com exatidão as dispersões dos dados experimentais, porém, apresentam alguns pontos em concordância sugerindo que a comparação é válida. É possível observar uma maior interseção entre os dados experimentados e o modelo de Rosin-Rammler, sendo que os erros dos quadrados apresentados foram significativamente menores (Gráfico 5.5).

GRÁFICO 5.5 - Soma dos erros do quadrado dos modelos de GGS e RR
 Fonte: Dados da Pesquisa, 2022



5.2 Separação Magnética

Os resultados a partir do comportamento das litologias de serpentinito, em ambos os separadores magnéticos, de alta e baixa intensidade, são condizentes as expectativas prévias ao ensaio. Sob efeito de um separador de baixa intensidade, o material magnetizado retido no ímã, proveniente do dunito serpentinizado foi substancialmente maior se comparado com o mesmo material extraído do metapiroxênio (Tabela 5.10).

TABELA 5.10 - Massas passantes e retidas no separador magnético tipo LIMS
 Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Separador Magnético de Baixa intensidade - 800 Gauss | | | |
|--|-----------------------|--------------------|------------------|
| Amostra de 200 gramas | Dunito serpentinizado | Massa Passante (g) | Massa Retida (g) |
| | | 165.3 | 32.32 |
| Amostra de 200 gramas | Metapiroxênio | 196.52 | 1.98 |

A presença significativamente maior de fases ferromagnéticas, como a magnetita, presentes no dunito serpentizado, justificariam os 16,16% de massa retida contra os 2% em relação ao metapiroxênio.

Os resultados no separador de alta intensidade (Tabela 5.11) ratificam aqueles obtidos no de baixa. A massa retida magnética de 46,67% com relação à amostra de dunito serpentizados, demonstram a presença de outras fases minerais com presença de ferro em sua composição como a tremolita, clorita.

TABELA 5.11 - Massas passantes e retidas no separador magnético CARPCO 3x4L
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Separador Magnético de alta intensidade - 11.000 Gauss | | | |
|--|---------------------|--------------------------|------------------------|
| Amostra de 200 gramas | Dunito serpentizado | Massa Passante (g) | Massa Retida (g) |
| | | 106.67 | 93.33 |
| Amostra de 200 gramas | Metapiroxênio | 191.6 | 8.4 |

As discussões em relação aos resultados da separação magnéticas serão melhor elucidadas nas seções referentes ao grau de liberação e análises químicas.

5.3 Grau de Liberação

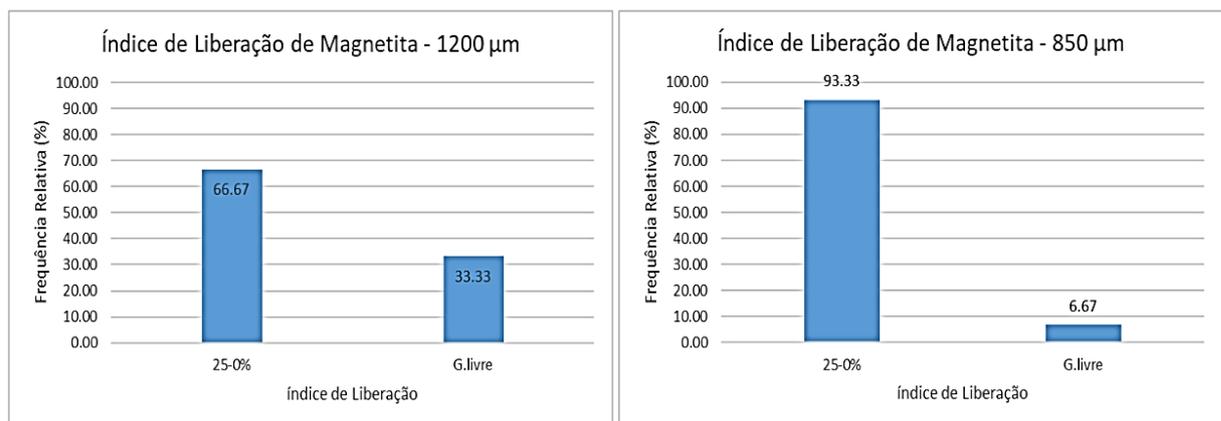
Os resultados referentes ao grau de liberação da magnetita, feita a partir da contagem de 30 partículas escolhidas aleatoriamente para cada uma das 7 granulometrias obtidas, estão representados nas tabelas e gráficos a seguir:

TABELA 5.12 - Tabela de frequência absoluta da magnetita e o seu grau de liberação total
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Abertura (µm) | Frequência Absoluta | | | Total | Grau de Liberação % |
|--------------------------------|---------------------|---------|-----------|-------|---------------------|
| | M.livre | G.livre | ΣP.mistas | | |
| 1200 | 0 | 3 | 6 | 9 | 0.00 |
| 850 | 0 | 2 | 28 | 30 | 0.00 |
| 500 | 0 | 6 | 24 | 30 | 0.00 |
| 300 | 0 | 9 | 21 | 30 | 0.00 |
| 150 | 0 | 18 | 12 | 30 | 0.00 |
| 75 | 0 | 20 | 10 | 30 | 0.00 |
| 45 | 1 | 20 | 9 | 30 | 18.18 |
| Grau de Liberação Total | | | | | 2.60 |

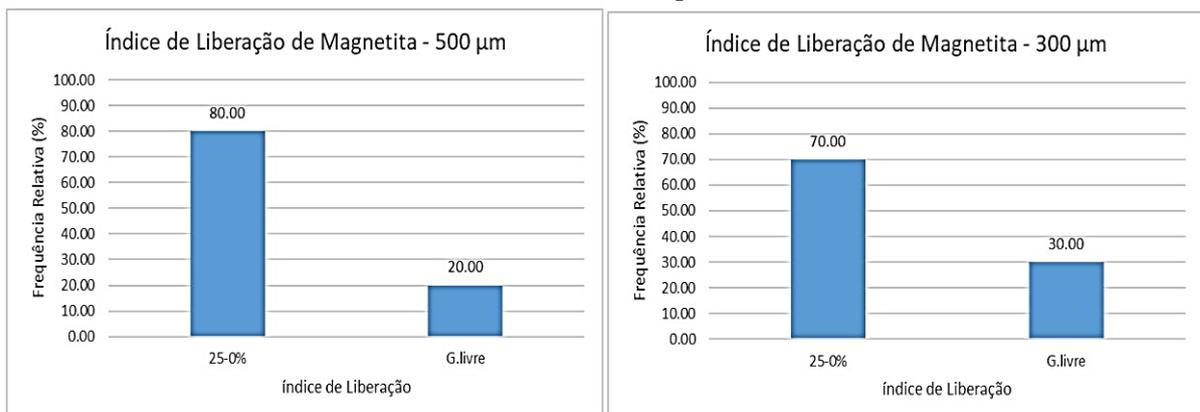
GRÁFICOS 5.6 - 5.7 - Índices de liberação de magnetita nas granulometrias de 1200 e 850 µm, respectivamente

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022



GRÁFICOS 5.8 – 5.9 - Índices de liberação de magnetita nas granulometrias de 500 e 300 µm, respectivamente

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022



GRÁFICOS 5.10 - 5.11 - Índices de liberação de magnetita nas granulometrias de 150 e 75 μm , respectivamente

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

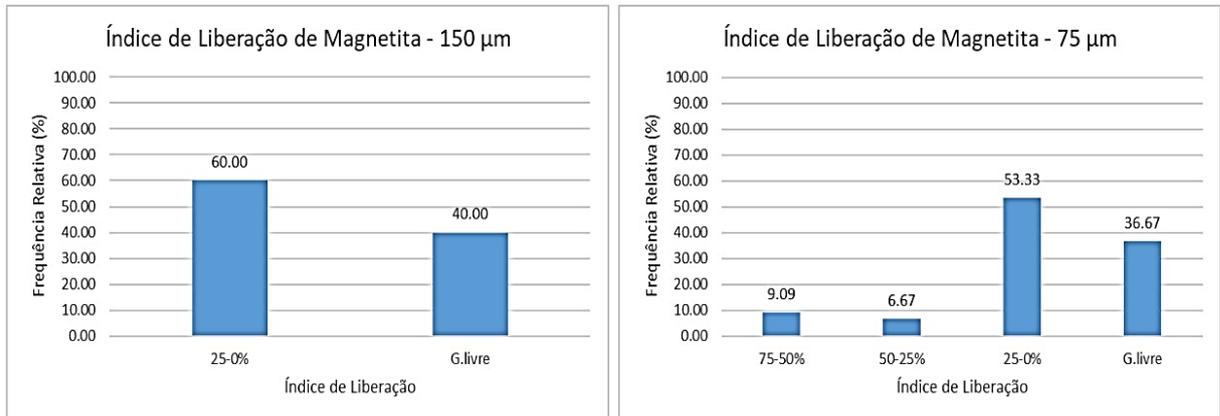
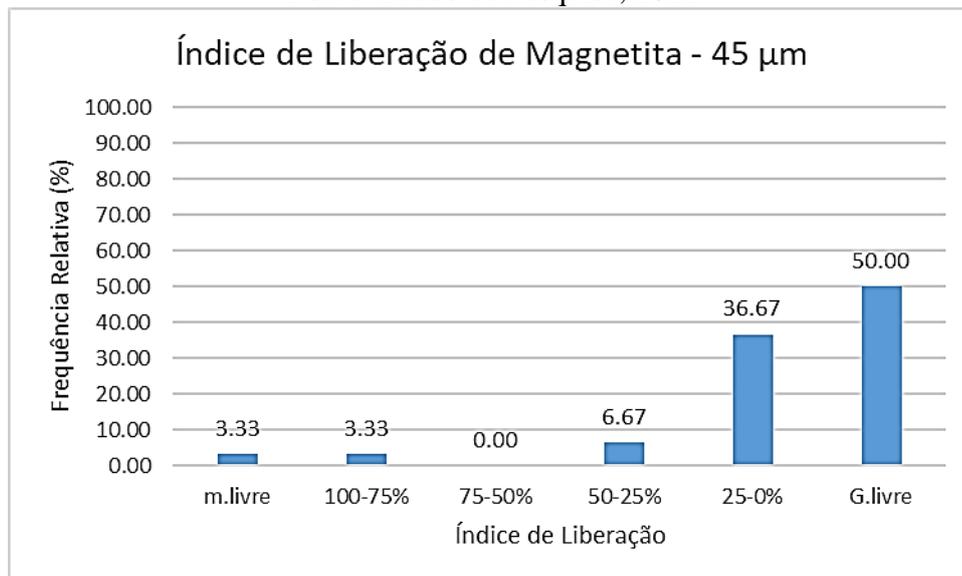


GRÁFICO 5.12 - Índice de liberação de magnetita na granulometrias de 45 μm

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

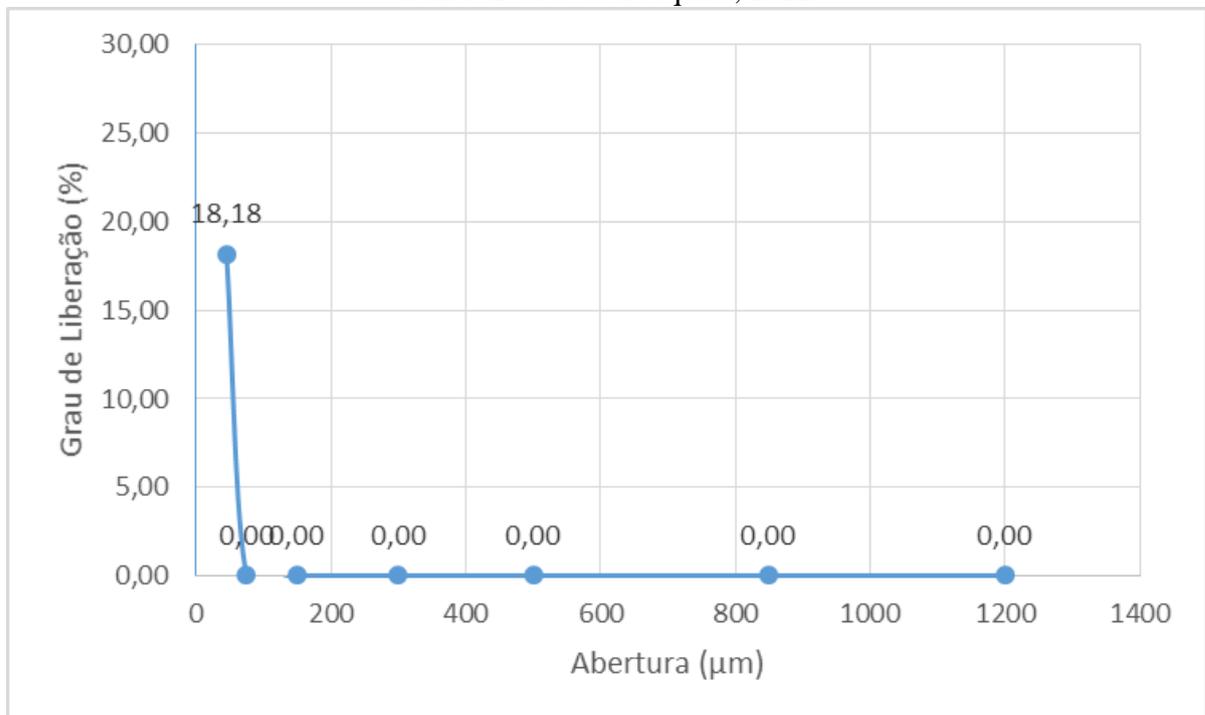


Dos gráficos 5.6 a 5.12, nota-se que das maiores aberturas para as menores há um aumento nas frequências relativas dos índices de liberação intermediários, do intervalo de 0-25% até 100%, e, conseqüente o aumento nos extremos. Esperava-se por este comportamento, visto que ele é um dos objetivos das etapas de cominação, reduzir o tamanho das partículas para ocorrer o aumento da liberação entre o mineral-minério e mineral de ganga, que no âmbito deste trabalho são a magnetita e minerais do grupo da serpentina, respectivamente.

No entanto, o grau de liberação só foi percebido, e de modo muito inibido, a partir da última granulometria analisada de 45 μm , de 18,8% (Gráfico 5.13). Já nas granulometrias mais grossas, as determinações, de forma ocular, foram inconclusivas e custosas. Sendo determinado um grau de liberação global de 2,60%. Isso deve-se principalmente à forma disseminada como a magnetita se distribui pela rocha, ao seu baixo teor (entre 5-10%), a sua opacidade e a de outros minerais que também compõe o serpentinito são barreiras que impedem uma diferenciação mais precisa das fases minerais presentes.

GRÁFICO 5.13 - Grau de Liberação da magnetita para as Faixas Granulométricas Consideradas

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022



Essas percepções podem ser observadas a partir das imagens (Figuras 5.2 a 5.7) obtidas de algumas das partículas analisadas. As imagens foram captadas com o auxílio de uma câmera Axiocam 208 color ZEISS acoplada em um microscópio Axioskop 40 ZEISS (Figura 5.1).



FIGURA 5.1 - Microscópio Axioskop 40 Zeiss com câmera Axiocam 208 color ZEISS acoplada na parte superior
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

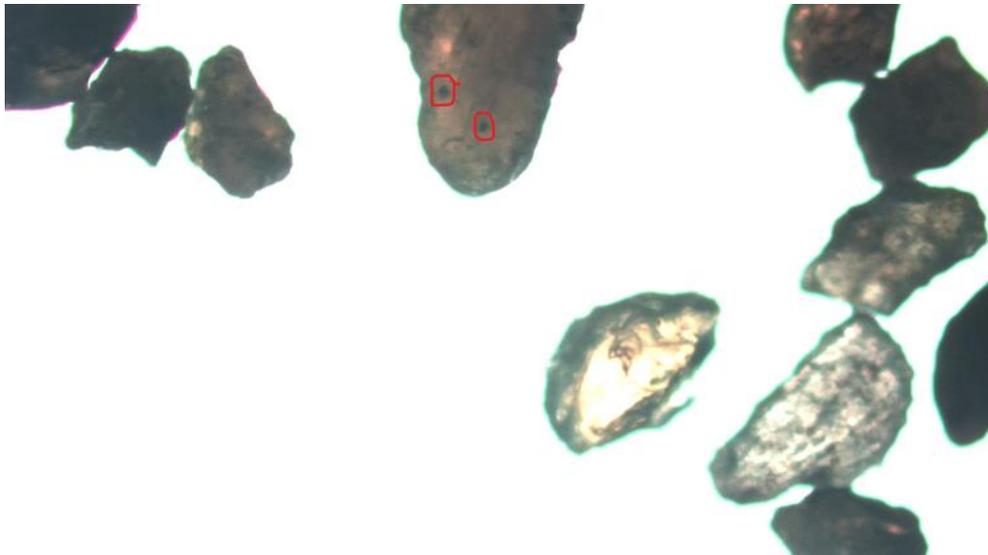


FIGURA 5.2 - Imagem microscópica de dunito serpentizado – 500 μm (em vermelho: mineral opaco de magnetita disseminado em uma fase de lizardita)
Fonte: Autor, 2022



FIGURA 5.3 - Imagem microscópica de dunito serpentinizado – 300 μm (em vermelho: mineral opaco de magnetita disseminado em uma fase de lizardita)
Fonte: Autor, 2022

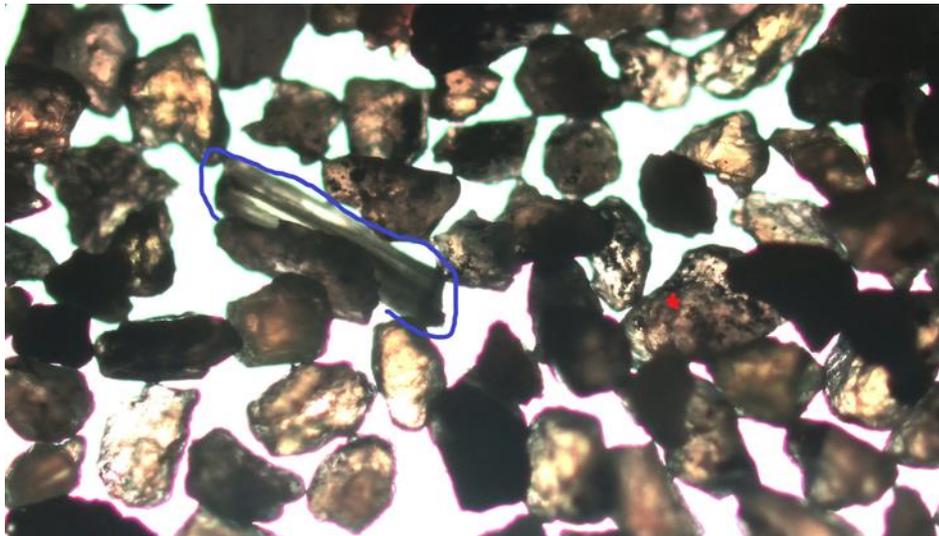


FIGURA 5.4 - Imagem microscópica de dunito serpentinizado – 75 μm (em vermelho: mineral opaco de magnetita disseminado em uma fase de lizardita) (em azul: fase evidente de antigorita)
Fonte: Autor, 2022

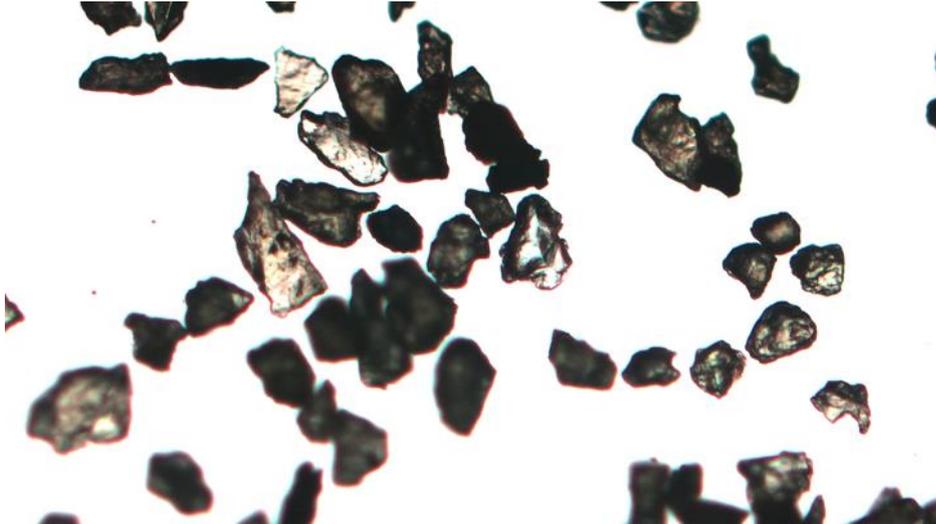


FIGURA 5.5 - Imagem microscópica de dunito serpentinizado – 45 μm
Fonte: Autor, 2022

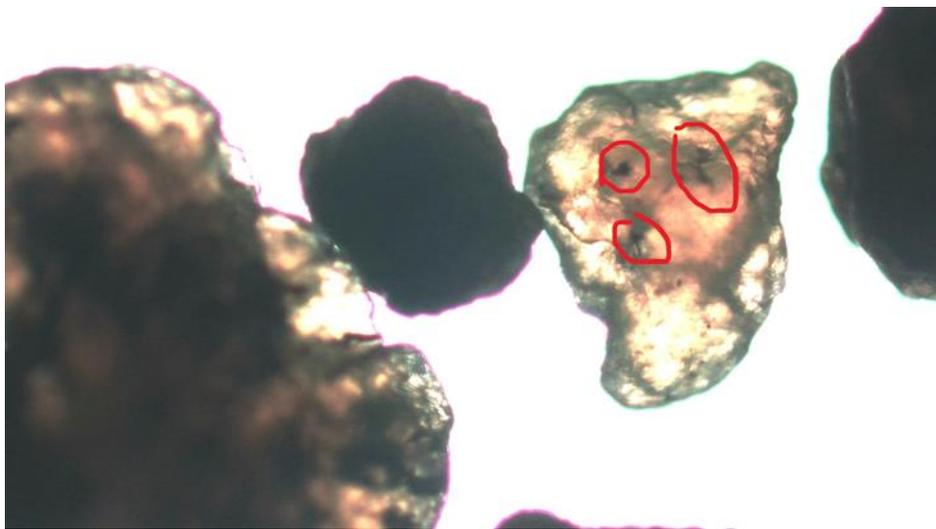


FIGURA 5.6 - Imagem microscópica de dunito serpentinizado – 850 μm (em vermelho:
mineral opaco de magnetita disseminado em uma fase de lizardita)
Fonte: Autor, 2022

Salienta-se os possíveis erros cometidos pelo inspetor que, por meio da lupa binocular, consegue visualizar apenas duas dimensões da partícula, o que conseqüentemente o impede de considerar possíveis contaminações por outros minerais.

É importante ressaltar ainda, a partir das imagens apresentadas, que a opacidade dos minerais que constituem as amostras exerceu muita influência nas análises. Esses minerais, por não permitirem a passagem de luz, dificultam um exame mais eficaz de possíveis contaminações no interior da partícula, assim como na superfície da partícula que não está claramente visível.

5.4 Análise Química

Os resultados das análises químicas das 4 amostras obtidas após a separação magnética em baixo campo são apresentados nas Tabelas 5.13 a 5.16. Além disso, 2 amostras das litologias também foram analisadas (TABELAS 5.11 e 5.12) com finalidade comparativa.

A separação magnética sob baixo campo realizado no dunito serpentizado (dunito s.) foi mais eficiente em comparação ao metapiroxênito (Meta). Além da massa magnética retida ter sido superior como mostrado na Tabela 5.9, na seção 5.3, a queda de 36.55% nas concentrações do elemento Fe_2O_3 , decaindo de 11.08% para 7.03% analisados na massa passante, evidenciam um desfecho satisfatório. No meta, as concentrações do elemento tiveram uma queda irrisória, passando de 8.52% para 8.42% de Fe_2O_3 , uma queda de 1,17%.

TABELA 5.13 - Análise Química Dunito serpentizado in natura
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Dunito S. - in natura | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Análise Química EDX | |
| Elemento | Concentração (%) |
| MgO | 43.31% |
| SiO ₂ | 40.83% |
| Fe ₂ O ₃ | 11.08% |
| Al ₂ O ₃ | 2.41% |
| Cr ₂ O ₃ | 1.30% |
| CaO | 0.63% |
| NiO | 0.26% |
| MnO | 0.11% |
| SO ₃ | 0.07% |

TABELA 5.14 - Análise química metapiroxênio
 Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Metapiroxênio - in natura | |
|----------------------------------|------------------|
| Análise Química EDX | |
| Elemento | Concentração (%) |
| MgO | 28.56% |
| Al ₂ O ₃ | 1.96% |
| SiO ₂ | 42.59% |
| CaO | 1.29% |
| MnO | 1.30% |
| Fe ₂ O ₃ | 8.52% |

TABELA 5.15 - Análise Química Dunito S. Retido em baixo campo
 Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Dunito S. - Baixo campo | |
|--------------------------------|------------------|
| Análise Química Retido | |
| Elemento | Concentração (%) |
| MgO | 36.22% |
| Fe ₂ O ₃ | 31.85% |
| SiO ₂ | 27.94% |
| Cr ₂ O ₃ | 1.79% |
| Al ₂ O ₃ | 1.28% |
| NiO | 0.33% |
| CaO | 0.30% |
| MnO | 0.17% |
| SO ₃ | 0.05% |
| Ta ₂ O ₅ | 0.05% |
| ZnO | 0.01% |

TABELA 5.16 - Análise química Dunito S. passante em baixo campo
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Dunito S. - Baixo campo | |
|--------------------------------|------------------|
| Análise Química passante | |
| Elemento | Concentração (%) |
| MgO | 44.18% |
| SiO ₂ | 43.71% |
| Fe ₂ O ₃ | 7.03% |
| Al ₂ O ₃ | 2.61% |
| Cr ₂ O ₃ | 1.20% |
| CaO | 0.81% |
| NiO | 0.25% |
| MnO | 0.14% |
| SO ₃ | 0.08% |

TABELA 5.17 - Análise Química Metapiroxênio passante em baixo campo
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Metapiroxênio- Baixo campo | |
|-----------------------------------|------------------|
| Análise Química Passante | |
| Elemento | Concentração (%) |
| MgO | 28.74% |
| Al ₂ O ₃ | 1.94% |
| SiO ₂ | 42.95% |
| CaO | 1.35% |
| MnO | 0.12% |
| Fe ₂ O ₃ | 8.42% |

TABELA 5.18 - Análise Química metapiroxênio retido em baixo campo
Fonte: Dados da Pesquisa, 2022

| Metapiroxênio- Baixo campo | |
|-----------------------------------|------------------|
| Análise Química Retido | |
| Elemento | Concentração (%) |
| MgO | 10.77% |
| Al ₂ O ₃ | 0.64% |
| SiO ₂ | 9.95% |
| CaO | 0.53% |
| MnO | 0.29% |
| Fe ₂ O ₃ | 32.44% |

As análises químicas das 4 últimas amostras, após a separação magnética em alto campo, estão localizadas nas TABELAS 5.17 a 5.20. No dunito S., os resultados obtidos apontam que os teores de Fe_2O_3 após a separação reduziram de 11,08% para 5,41%, comparando com a análise da amostra in natura. Isso significa um decréscimo na concentração de 51,17%, havendo uma superioridade de 28,57% se comparado ao ensaio de baixo campo. Apesar do progresso nos resultados, a fração de massa magnética retida atingiu 46,67% da amostra analisada (TABELA 5.9). Isso aponta uma ocorrência muito grande de arraste de partículas, justificando e demonstrando que o D_{50} da amostra estudada, igual a 101 μm , não consegue atingir um grau de liberação satisfatório das suas fases ferríferas.

No metapiroxênito os teores de Fe_2O_3 tiveram uma diminuição de 5,75%. Ainda que inexpressivo, foi substancialmente maior se compararmos com a decaimento de 1,17% obtido na separação magnética de baixo campo. Em contraste ao dunito s., a fração de massa magnética retida foi consideravelmente menor, em torno de 4,2 e 1% em alto e baixo campo, respectivamente. Indicando que sua granulometria de 70% < 45 μm , é suficiente para atingir um grau de liberação de suas fases ferríferas e alcançar uma maior seletividade nas separações magnéticas.

TABELA 5.19 - Análise Química Dunito S. passante em alto campo
Fonte: Dados da pesquisa, 2022

| Dunito S. - alto campo | |
|---------------------------------|-------------------------|
| Análise Química Passante | |
| Elemento | Concentração (%) |
| SiO ₂ | 44.94% |
| MgO | 44.41% |
| Fe ₂ O ₃ | 5.41% |
| Al ₂ O ₃ | 2.84% |
| Cr ₂ O ₃ | 1.17% |
| CaO | 0.77% |
| NiO | 0.24% |
| MnO | 0.11% |
| SO ₃ | 0.08% |
| Ag ₂ O | 0.05% |

TABELA 5.20 - Análise Química Dunito S. retido em alto campo
 Fonte: Dados da pesquisa, 2022

| Dunito S. - alto campo | |
|--------------------------------|------------------|
| Análise Química Retido | |
| Elemento | Concentração (%) |
| SiO ₂ | 49.05% |
| MgO | 34.54% |
| Fe ₂ O ₃ | 9.59% |
| Al ₂ O ₃ | 4.03% |
| Cr ₂ O ₃ | 0.69% |
| CaO | 1.75% |
| NiO | 0.14% |
| MnO | 0.20% |

TABELA 5.21 - Análise Química metapiroxênio passante em alto campo
 Fonte: Dados da pesquisa, 2022

| Metapiroxênio- Alto campo | |
|----------------------------------|------------------|
| Análise Química Passante | |
| Elemento | Concentração (%) |
| MgO | 28.89% |
| Al ₂ O ₃ | 1.96% |
| SiO ₂ | 42.84% |
| CaO | 1.34% |
| MnO | 0.12% |
| Fe ₂ O ₃ | 8.03% |

TABELA 5.22 - Análise Química metapiroxênito retido em alto campo
 Fonte: Dados da pesquisa, 2022

| Metapiroxênito- Alto campo | |
|-----------------------------------|------------------|
| Análise Química Retido | |
| Elemento | Concentração (%) |
| MgO | 16.61% |
| Al ₂ O ₃ | 1.19% |
| SiO ₂ | 22.73% |
| CaO | 0.64% |
| MnO | 0.24% |
| Fe ₂ O ₃ | 16.41% |

5.5 Difractometria de Raios-X

As difratometrias de raio-X foram realizadas nas amostras das duas litologias e os resultados qualitativos podem ser averiguados na seção Anexos. As 5 amostras analisadas referentes ao dunito serpentinizado estão representados na Tabela 5.21. O espectro de raio-X detectou nas amostras de dunito S. teores importantes de lizardita, talco e magnetita, corroborando com a maioria dos resultados prévios das análises químicas caso seja feita uma correlação com os elementos encontrados.

TABELA 5.23 - Fases minerais das amostras de Dunito S.
 Fonte: Dados da pesquisa, 2022

| Dunito Serpentinizado | | | | | | |
|------------------------------|---|----------------------------|--|--|---------------------------------------|---|
| Análise DRX | | | | | | |
| Fase mineral | Fórmula Química | Teor (%) amostra in natura | Teor (%) amostra retida em baixo campo | Teor (%) amostra passante em baixo campo | Teor (%) amostra retida em alto campo | Teor (%) amostra passante em alto campo |
| Lizardita | Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ | 72.5 | 58.7 | 72.5 | 76.5 | 75.1 |
| Magnetita | Fe ³⁺ ₂ Fe ²⁺ O ₄ | 4.7 | 41.4 | - | 19.2 | - |
| Talco | Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 22.8 | 0 | 27.5 | 4.3 | 24.9 |

A presença de elementos, em quantias que podem ser considerados traços, como Ni, Ag, Cr, Al e S, e a não detecção de alguma fase mineral pelo difratômetro, pode ser justificado devido à baixa concentração desses, o que dificulta o reconhecimento da fase pelo equipamento, atrelado ao fato da proximidade dos picos de intensidades de algumas fases, ferríferas principalmente, como é o caso da cromita (FeCr_2O_4) e da magnetita. A antigorita, mineral do grupo das serpentinas, é muitas vezes encontrada no dunito s. e no metapiroxênio, mas por possuir um pico de intensidade muito semelhante também ao da lizardita, passa despercebido.

Os resultados dos difratômetros das 5 amostras de metapiroxênio (Anexo II) foram configurados na Tabela 5.22. O espectro de raio-X detectou nas amostras de metapiroxênio fases de lizardita, talco, magnetita, clorita, tremolita e quartzo validando a maioria dos resultados prévios das análises químicas caso seja feita uma convergência com os elementos obtidos. Elementos presentes na análise química, como Mn e Al, cujas respectivas fases minerais não foram detectadas, podem ser esclarecidos pelos baixos teores. A presença de quartzo na amostra *in natura* pode ser explicada por uma possível contaminação da amostra.

TABELA 5.24 - Fases minerais das amostras de metapiroxênio
Fonte: Dados da pesquisa, 2022

| Metapiroxênio | | | | | | |
|----------------------|---|----------------------------|--|--|---------------------------------------|---|
| Análise DRX | | | | | | |
| Fase mineral | Fórmula Química | Teor (%) amostra in natura | Teor (%) amostra retida em baixo campo | Teor (%) amostra passante em baixo campo | Teor (%) amostra retida em alto campo | Teor (%) amostra passante em alto campo |
| Lizardita | $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ | 31.5 | 35.6 | - | 70.8 | 71.1 |
| Clorita | $\text{Mg}_{3,75}\text{Fe}^{2+}_{1,25}\text{Si}_3\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | 18.7 | 0 | 72.6 | - | - |
| Magnetita | $\text{Fe}^{3+}_2\text{Fe}^{2+}\text{O}_4$ | - | 63.6 | - | 12.5 | - |
| Talco | $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ | 36.6 | 0 | - | - | - |
| Tremolita | $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ | 13.5 | 0 | 27.4 | 16.7 | 28.9 |
| Quartzo | SiO_2 | - | 0.8 | - | - | - |

É importante compreender que os teores de ferro detectados nas análises químicas não dizem respeito exclusivamente a presença de magnetita, cromita ou outra fase ferrífera na amostra analisada. A presença do elemento Fe em outras fases minerais também é acusado como na clorita ($\text{Mg}_{3,75}\text{Fe}^{2+}_{1,25}\text{Si}_3\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), ou ainda, quando substitui o magnésio encontrado na tremolita ($\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) formando uma série intermediária chamada actinolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg}_{4,5-2,5}\text{Fe}^{2+}_{0,5-2,5})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), o componente também é acusado na análise.

6 CONCLUSÕES

Apesar de partilharem uma gênese geológica similar, às duas litologias estudadas possuem características mineralógicas e químicas distintas o suficiente para que cada uma delas apresentasse suas particularidades, em relação às concentrações de Fe_2O_3 , após serem submetidas aos ensaios de separação magnética.

A litologia conhecida como dunito serpentizado apresentou um comportamento notadamente magnético e, além disso, teve um resultado promissor na separação magnética. As reduções nos teores de Fe_2O_3 quando submetido a campos magnéticos de baixa e alta intensidade foram de 36 e 51%, respectivamente. Apesar do descaimento, houve um grande arraste de partículas, evidenciando uma baixa seletividade de separação nos ensaios que decorrem principalmente de um grau de liberação insuficiente das fases ferrífera presentes na amostra estudada. A fase ferrífera detectada pelo difratômetro na rocha foi a magnetita, além de outros minerais como lizardita e talco.

A rocha Metapiroxênio exibe pouco comportamento magnético, os resultados das separações magnéticas foram inexpressivos, com reduções nos teores de Fe_2O_3 de 1 e 5% em ambos os campos, revelando baixos teores de fases ferríferas na litologia. Apesar do desfecho, a seletividade na separação magnética foi alta ao se perceber o pouco arraste de partículas no experimento, mostrando que a amostra está em uma granulometria aceitável. O difratômetro detectou magnetita como fase ferrífera principal, no entanto, há a presença de minerais que possuem o elemento Fe na sua composição como no caso da clorita e de séries intermediárias da tremolita. Nas amostras foram também detectados os minerais lizardita e talco.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios de separação magnéticas com as litologias estudadas em variadas granulometrias, visando determinar a eficiência e a seletividade do teste além de investigar um grau de liberação, com o auxílio do método MEV (microscopia eletrônica de varredura), ótimo e economicamente viável.

Determinar as fases minerais de elementos acessórios presentes nas análises químicas das litologias estudadas como manganês, níquel, tântalo e cromo.

Estudar e indicar teorias de gênese geológica para a formação e configuração das fases ferríferas encontradas no silicato de magnésio.

REFERÊNCIAS

CARMIGNANO, Ottavio Raul Romenico Riberti. 2015. **Avaliação do comportamento do serpentinito na cultura da soja**. 2015. 71 f. Dissertação [Mestrado] Sustentabilidade. Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

CARMIGNANO, Ottavio Raul D. R. et al. **Serpentinities: Mineral Structure, Properties and Technological Applications**. Journal of the Brazilian Chemical Society [online]. 2020, v. 31, n. 1 [Acesso: 19 de julho de 2022], pp. 2-14. Disponível em: <<https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190215>>. Epub 10 Jan 2020. ISSN 1678-4790. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190215>.

CIMINELLI, R. R. **Critério para formulação de cargas e reforços minerais em termoplásticos**. Congresso Brasileiro do Plástico Reforçado, 5. 1988, São Paulo. Anais. São Paulo: Associação Brasileira de Plástico Reforçado, 1988, pp. 71 - 73.

COSTA, Gilberto Antônio; CAMPELLO, Marcos Santos. **Rochas Industriais**. Belo Horizonte: CODEMGE, 2017.

DIAS, J.A. **A Análise Sedimentar e o Conhecimento dos Sistemas Marinhos**. Ed. preliminar. Algarve, 2004.

FERREIRA, Leandro. 2017. **Caracterização de serpentinito e esteatito ocorrentes em Nova Lima/MG, antes e após processo de moagem, calcinação e separação magnética**. Dissertação [Mestrado] Tecnologia Mineral. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017

CARMIGNANO, Ottavio Raul Romenico Riberti. **Serpentinito como acelerador e ativador do processo de vulcanização de borrachas naturais (NR) e copolímeros aleatórios estireno-butadienos (SBR) e como agente de reforço das borrachas vulcanizadas**. Depositante: Ottavio Raul Romenico Riberti Carmignano. Procurador: Ottavio Raul Romenico Riberti Carmignano. BR n. PI 0804675-1 B1. Depósito: 30 out. 2008. Concessão: 02 mar. 2021.

KONDORFER, G.H., PEREIRA, H.S., CAMERGO, M.S. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. Boletim técnico 01, 2ª Ed., **Instituto de ciências agrárias**, Universidade Federal de Uberlândia 2002.

LUZ, Adão Benvindo; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Tratamento de Minérios**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

LUZ, A. B. *et al.* **Tratamento de Minérios**. 5ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

ORÉFICE R. L., CARMIGNANO, O. R., TRIBST, P. H. **Polímeros contendo serpentinito**. Relatório Interno, Pedras Congonhas Extração Arte e Ind. Ltda. 2012.

PEREZ, B. C. **As rochas e os minerais industriais como elementos de desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

PINTO, P., YOSHIDA, M. I., CARMIGNANO, O. R. **Caracterização química da rocha serpentinito de Nova Lima/MG. In: 33ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química.** Sociedade Brasileira de Química (SBQ). 2009.

SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SANTINATO, R.; SILVA, R. O.; MOSCA, E.; SANTINATO, F. **Doses de óxido de magnésio e doses de serpentinito na correção da deficiência de magnésio em solos com teores adequados de cálcio.** In: 38º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, Caxambu, Minas Gerais, 2012.

SEARS, F.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY, M.W. **Física IV.** 12. ed., São Paulo: PEARSON, 2008, v. 4.

SCHUMANN, Walter. **Rochas e Minerais.** Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1982.

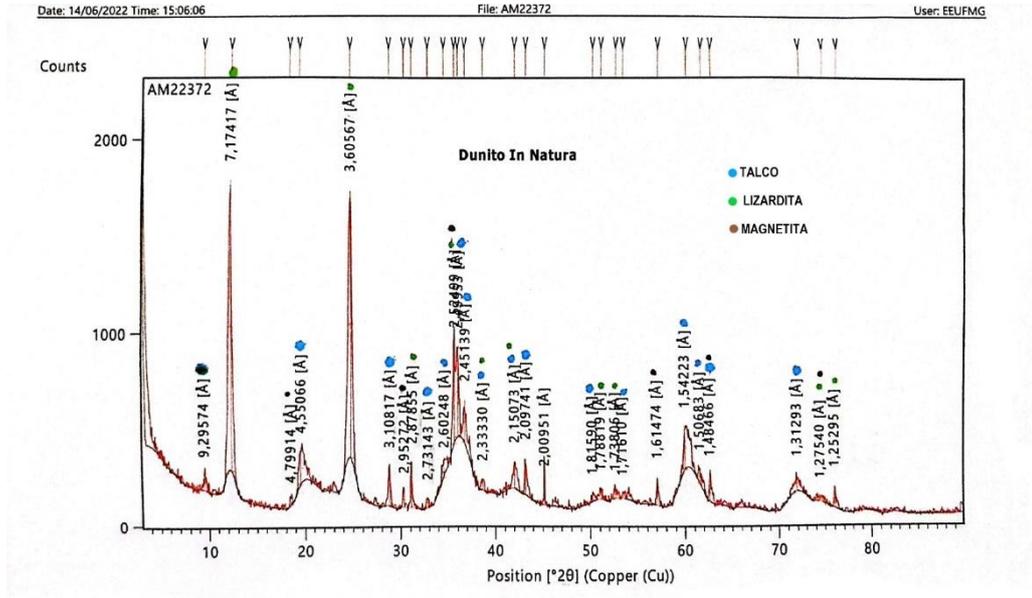
TEIXEIRA, A. M. S. **Caracterização e avaliação da rocha serpentinito do município de Andorinha/Bahia para aplicação como corretivo de acidez do solo.** Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010, 106 pg. (Dissertação de mestrado Instituto de Química)

VALADÃO, G.E.S.; ARAÚJO, A.C.; ORGANIZADORES. **Introdução ao tratamento de minérios.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

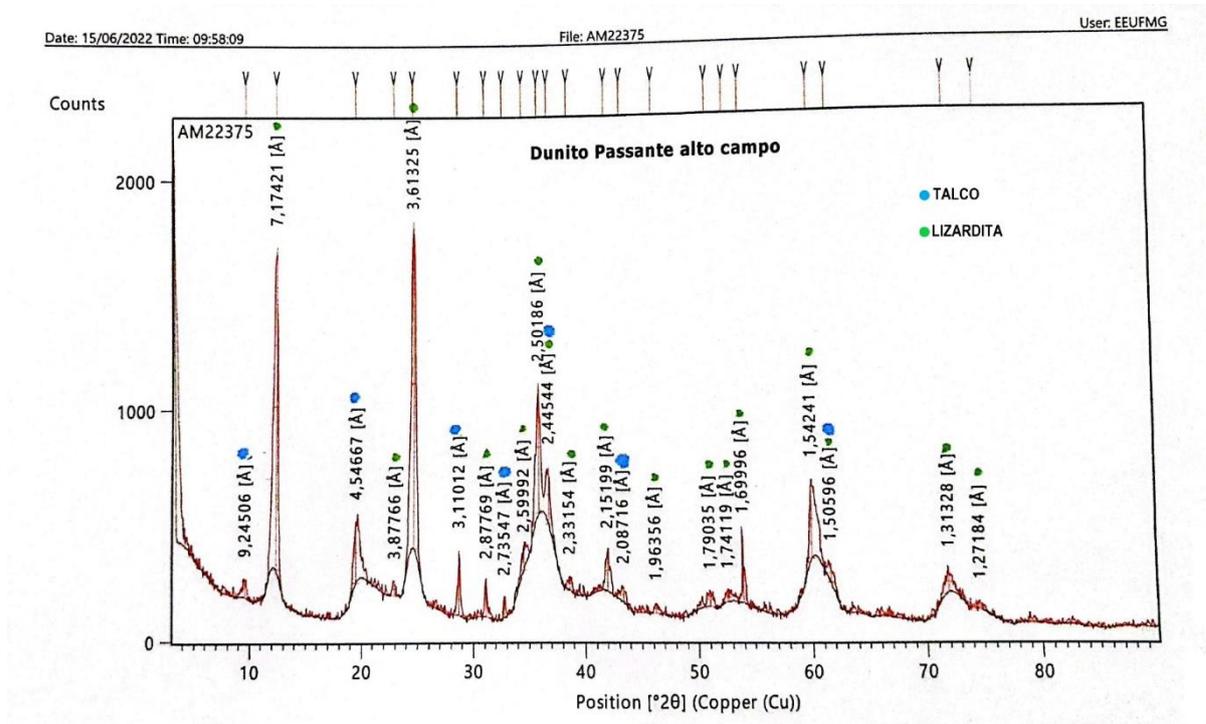
ZAIDAN, S. **Aproveitamento do rejeito da rocha serpentinito da mina de Cana- Brava.** Dissertação [Mestrado] Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.

ANEXOS

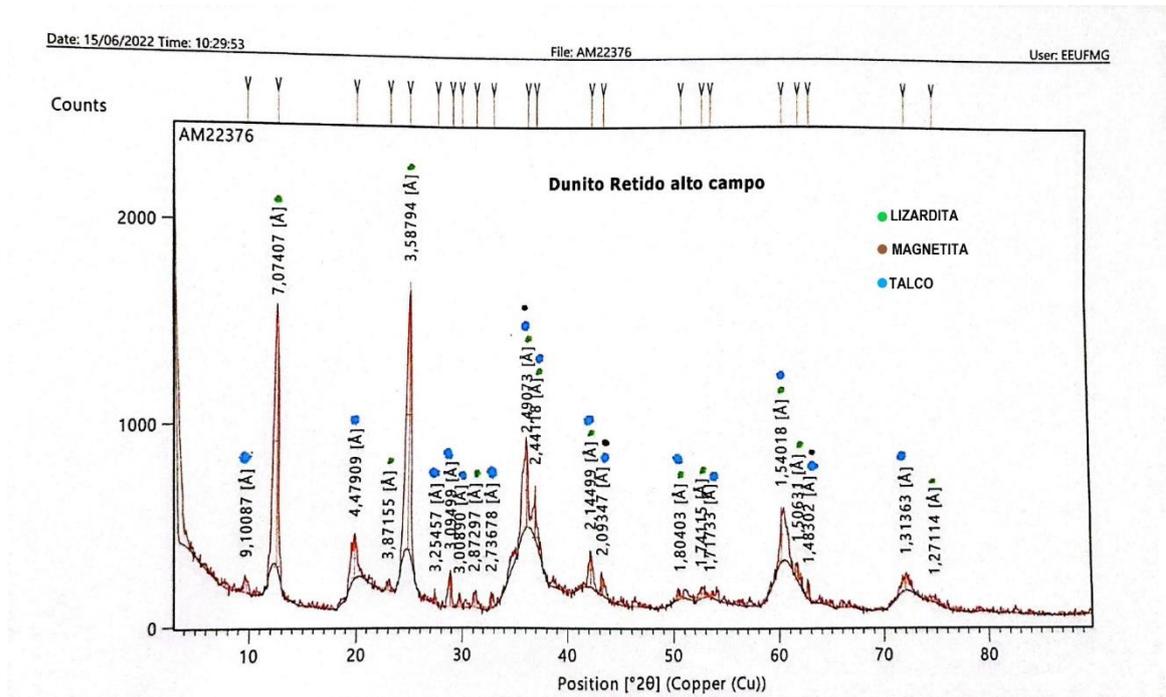
ANEXO A – Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de dunito serpentinizado in natura



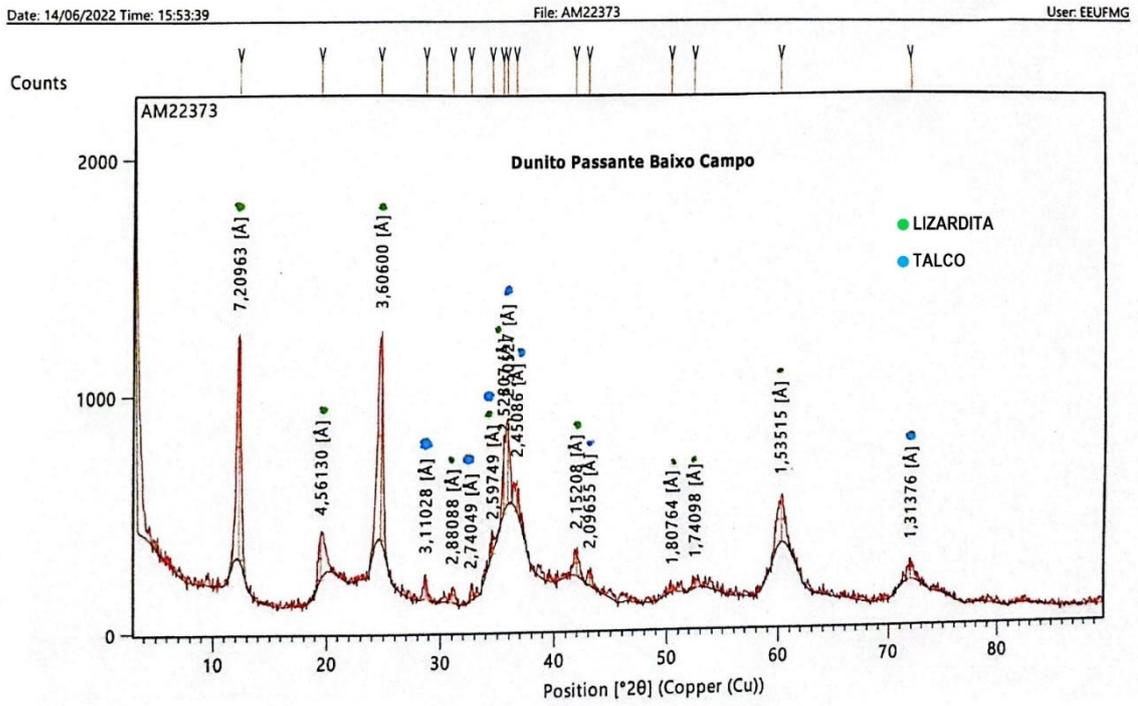
ANEXO B – Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de dunito serpentinizado passante em alto campo



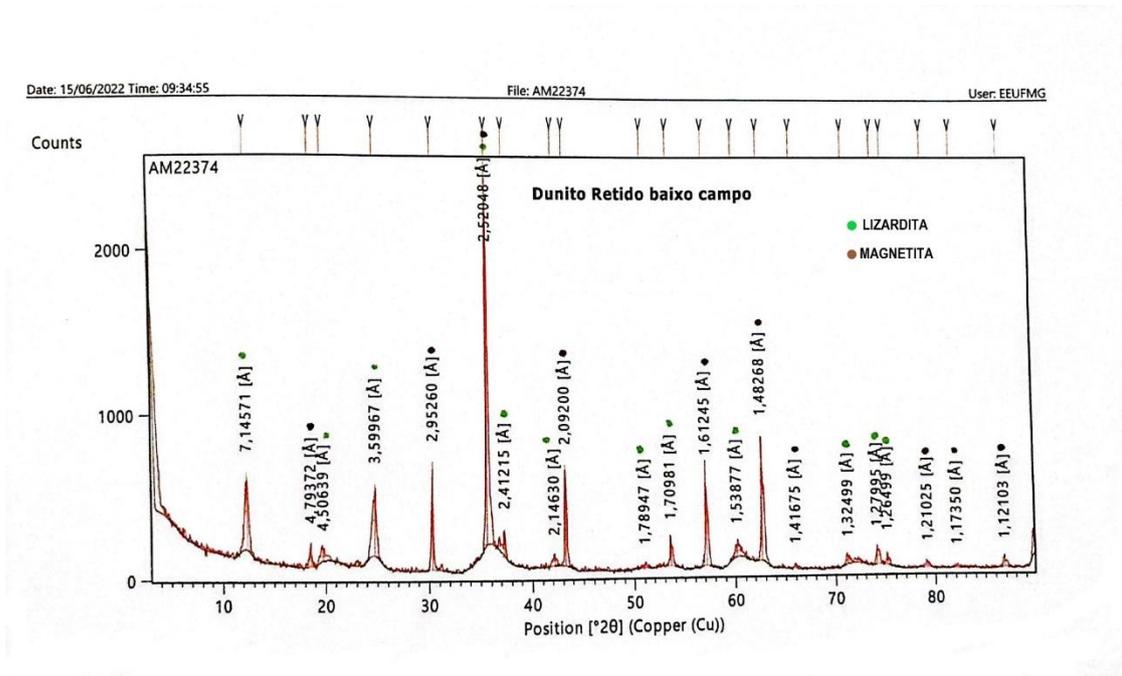
ANEXO C – Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de dunito serpentinizado retido em alto campo



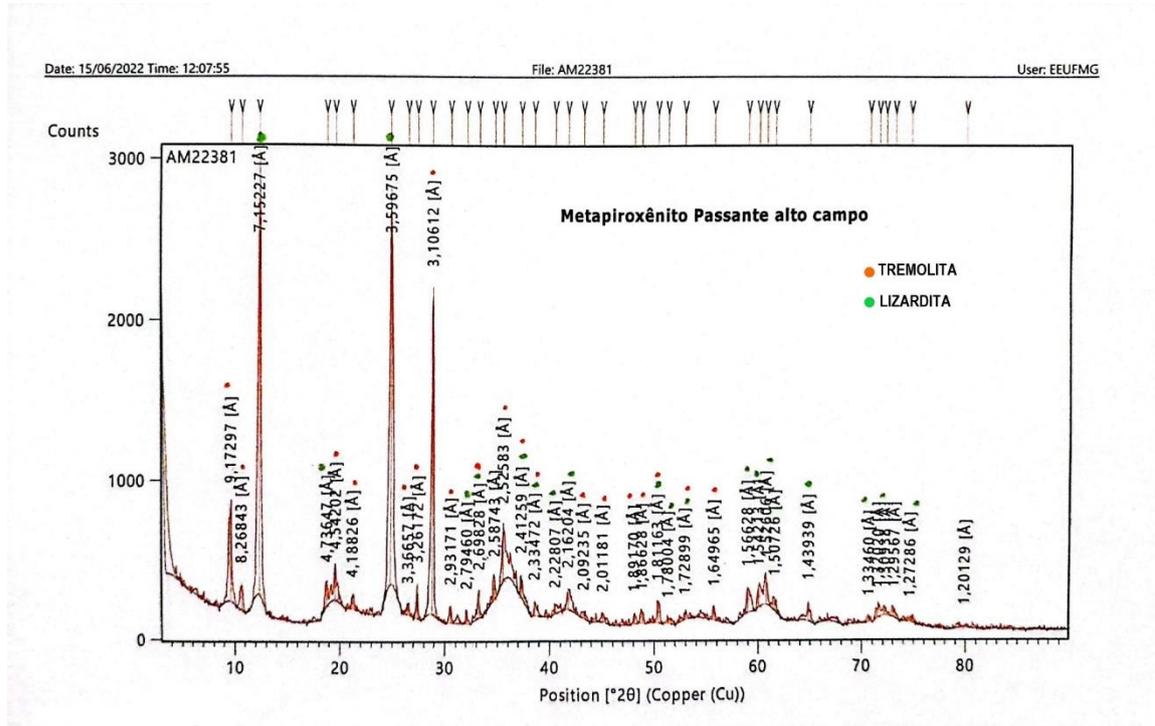
ANEXO D – Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de dunito serpentinizado passante em baixo campo



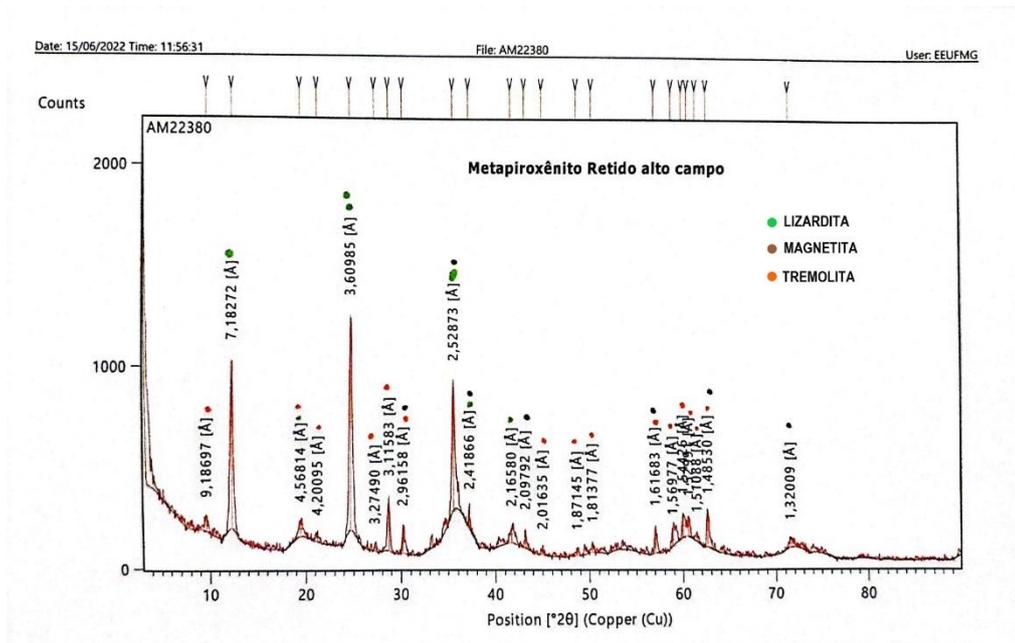
ANEXO E – Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de dunito serpentinizado retido em baixo campo



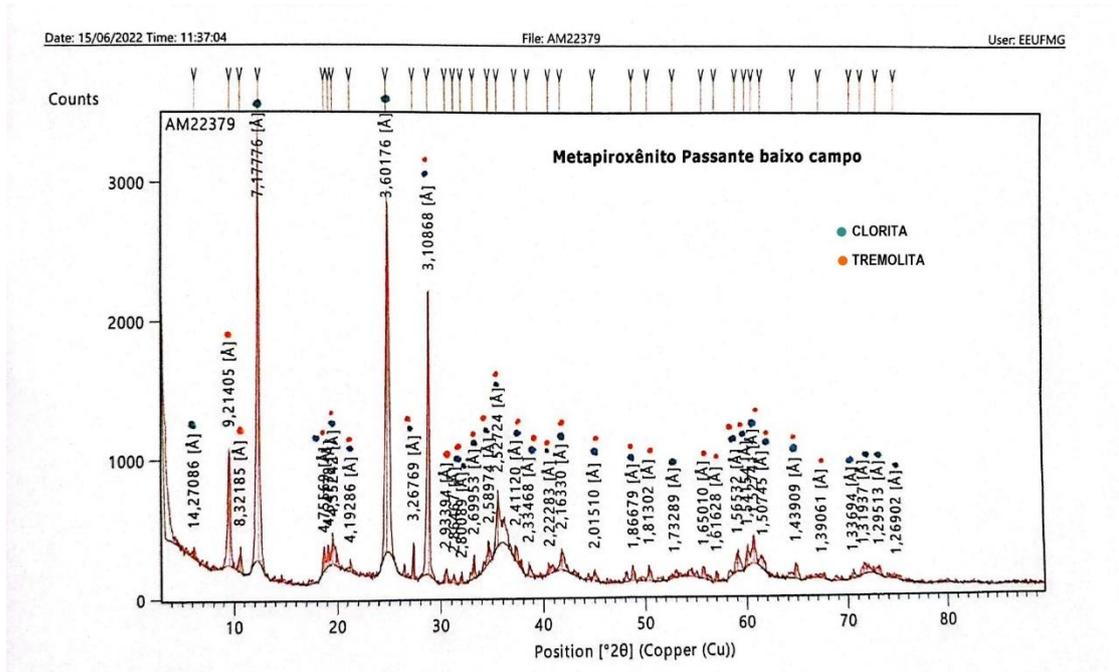
ANEXO G – Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de metapiroxênio passante em alto campo



ANEXO H - Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de metapiroxênio retido em alto campo



ANEXO I - Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de metapiroxênio passante em baixo campo



ANEXO K - Resultado qualitativo da análise por difratometria de raio-X da amostra de metapiroxênio retido em baixo campo

