

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LARISSA DE MELO PAIVA

DESENVOLVIMENTO DE ROTA DE PROCESSO PARA O BENEFICIAMENTO DO  
RESÍDUO DO MINÉRIO DE MAGNESITA DA TURQUIA

BELO HORIZONTE

2020

LARISSA DE MELO PAIVA

DESENVOLVIMENTO DE ROTA DE PROCESSO PARA O BENEFICIAMENTO DO  
RESÍDUO DO MINÉRIO DE MAGNESITA DA TURQUIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2020

LARISSA DE MELO PAIVA

**DESENVOLVIMENTO DE ROTA DE PROCESSO PARA O BENEFICIAMENTO  
DO RESÍDUO DO MINÉRIO DE MAGNESITA DA TURQUIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva - Orientador

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

---

MSc. Matheus Naves Moraes

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me sustentou e me deu as graças necessárias para superar todos os desafios. Aos meus pais, Jose Eustáquio e Joaquina Aparecida, que sempre estiveram presentes, com o olhar confiante e acreditando em minha caminhada. Quero agradecer também a todas as pessoas que se dispuseram a ajudar-me, minha família, meus amigos, meu namorado André Rodrigues e a Comunidade Católica Shalom.

Ao Professor Paulo Renato pela orientação, dedicação e recomendações objetivas que muito contribuíram para a elaboração e conclusão deste trabalho, bem como para meu crescimento acadêmico.

À RHI Magnesita, na pessoa do engenheiro Matheus Naves pela orientação, acesso às informações, amostras e recursos laboratoriais. Aos técnicos do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da RHI Magnesita (CPqD) que ajudaram na execução prática deste trabalho.

## RESUMO

O beneficiamento do minério de magnesita é muito importante comercialmente devido a extração do magnésio, suas principais utilizações, normalmente sob a forma de óxido, são como material refratário em revestimentos de fornos para a produção de ferro e aço, metais não ferrosos, vidro e cimento. Além do produto desejado no beneficiamento mineral, nesse caso o concentrado de magnesita, tem-se a formação de volumes significativos de resíduo ao longo das etapas de processamento. Assim, este trabalho teve como interesse o aproveitamento do resíduo proveniente da planta de processamento mineral da RHI Magnesita em Eskisehir na Turquia, com o objetivo de desenvolver uma rota de beneficiamento para a recuperação do carbonato de magnésio. Foram avaliadas duas técnicas de separação magnética, a seco e a úmido, para a remoção de minerais contendo ferro, analisando três faixas granulométricas distintas, e dois métodos de flotação, direta e reversa, para a remoção de minerais contendo sílica. A técnica de separação magnética a úmido obteve melhores resultados em relação a técnica de separação a seco, principalmente quando comparado a granulometria mais fina entre 300 a 150  $\mu\text{m}$ , com recuperação metalúrgica do óxido de magnésio (MgO) de 69 % utilizando o campo magnético de 6000 Gauss. Porém, deve ser levado em consideração que os silicatos também possuem MgO na composição, por isso não é possível afirmar que o óxido de magnésio recuperado está presente somente no carbonato de magnésio. O método de flotação reversa foi mais eficiente na remoção da sílica, obtendo concentração de MgO de 90,98% e sílica de 4,13% no teste 4. Entretanto o coletor utilizado não é o melhor reagente para flotar minerais do grupo da serpentina, sendo necessário o desenvolvimento de coletores mais adequados, assim como depressores mais eficientes para o minério de magnesita. Portanto, foi definido um conceito de uma rota de processamento utilizando granulometria inferior a 200  $\mu\text{m}$ , seguido pela deslamagem para retirada de partículas inferiores a 38  $\mu\text{m}$ , pelas técnicas de separação magnética a úmido, flotação reversa, filtração e aglomeração, para a formação dos briquetes, utilizado na alimentação dos fornos rotativos.

Palavras-chave: Minério de magnesita, Beneficiamento, Separação Magnética, Flotação, Rota de processamento.

## ABSTRACT

The processing of magnesite ore is very important commercially due to the extraction of magnesium, its main uses, usually in the form of oxide, are as refractory material in ovens coatings for the production of iron and steel, non-ferrous metals, glass and cement. . In addition to the desired product in the beneficiation mineral, in this case the magnesite concentrate, there is the formation of volumes obtained from waste throughout the processing steps. Thus, this work was interested in the use of the tailings from the mineral processing plant of RHI Magnesita in Eskisehir, Turkey, in order to develop a processing route to recover the magnesium carbonate. Two magnetic separation techniques were used, dry and wet, for the removal of minerals containing iron, analyzing three different size ranges, and two flotation methods, direct and reverse, for the removal of minerals containing silica. The wet magnetic separation technique obtained better results than the dry separation technique, especially when compared to finer particle sizes between 300 to 150  $\mu\text{m}$ , with 69% metallurgical recovery of magnesium oxide (MgO) using the magnetic field. 6000 Gauss. However, it must be considered that silicates also have MgO in their composition, so it is not possible to state that the recovered magnesium oxide is present only in magnesium carbonate. The reverse flotation method was more efficient in removing silica, obtaining MgO concentration of 90.98% and silica of 4.13% in test 4. However, the collector used is not the best reagent for minerals to float from the serpentine group, requiring the development of more adequate collectors, as well as more efficient depressants for magnesite ore. Therefore, a concept of a processing route was defined using granulometry less than 200  $\mu\text{m}$ , followed by desliming to remove particles smaller than 38  $\mu\text{m}$ , by the techniques of wet magnetic separation, reverse flotation, filtration and agglomeration, for the formation of the briquettes, used in the feeding of rotary kilns.

Keywords: Magnesite ore, Beneficiation, Magnetic Separation, Flotation, Processing Route.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo do deposito de magnesita criptocristalina .....	17
Figura 2 - Rede de veias finas de magnesita criptocristalina .....	17
Figura 3 - Polia magnética para separação de materiais fortemente magnéticos .....	20
Figura 4 - Funcionamento do separador magnético de tambor .....	21
Figura 5 - Configuração dos polos em separadores magnéticos de tambores .....	21
Figura 6 - Tambor Magnético da Steinert .....	22
Figura 7 - Separador de rolo magnético permanente.....	23
Figura 8 - Separador magnético a úmido de alta intensidade para uso em laboratório.....	24
Figura 9 - Representação da estrutura heteropolar e iônica do coletor (a) e o recobrimento do coletor na superfície mineral (b).....	25
Figura 10 - Representação esquemática da flotação em uma célula mecânica .....	26
Figura 11 - Tubo de Hallimond modificado.....	27
Figura 12 - Geometria de excitação-deteccção da EDFRX, com linhas contínuas representado os raios X e as espalhadas coloridas, os raios x característicos.....	29
Figura 13 - Representação da Lei de Bragg em duas dimensões .....	30
Figura 14 - Fotomicrografia do rejeito de flotação do itabirito.....	31
Figura 15 - Fluxograma das rotas de processo .....	33
Figura 16 - Fluxograma do processamento do minério de magnesita em Eskisehir na Turquia .....	34
Figura 17 - Produtos selecionados da amostra 5 / 2mm.....	36
Figura 18 - Amostra preparada pela técnica de ceramografia.....	38
Figura 19 - Difratoograma da amostra de resíduo.....	40
Figura 20 - Microscopia da amostra de resíduo Rota de processamento conceitual para a recuperação do resíduo do minério de magnesita.....	41
Figura 21 - Recheios secundários (sf) ou camadas de relíquias (rc) de estrutura serpentina ligados a magnesita natural.....	42
Figura 22 - Rota de processamento conceitual para a recuperação do resíduo do minério de magnesita.....	48

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1	Parâmetros para o teste de microflotação .....	36
Tabela 2	Parâmetros dos testes de flotação em bancada .....	37
Tabela 3	Teor dos principais constituintes do resíduo do beneficiamento da magnesita.....	39
Tabela 4	Teor dos principais constituintes da amostra de resíduo referente a cada granulometria.....	42
Tabela 5	Influência da granulometria na separação magnética a seco .....	43
Tabela 6	Influência da granulometria e do campo magnético na separação magnética a úmido .....	44
Tabela 7	Análise química das amostras do teste de microflotação em tubo de Hallimond ....	45
Tabela 8	Resultados de alguns testes de microflotação utilizando partículas escuras .....	45
Tabela 9	Resultado dos testes de flotação em bancada .....	46

**LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 1 – Relação entre a intensidade dos raios X característicos com a concentração de um determinado elemento na amostra .....	28
Equação 2 - Diferença de caminho percorrido pelo feixe de raios X.....	29
Equação 3 - Lei de Bragg .....	30
Equação 4 - Recuperação metalúrgica.....	35
Equação 5 - Recuperação mássica.....	35

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

DRX = Difração de raio X

FRX = Fluorescência de raio X

$\mu\text{m}$  = Micrometro

mm = Milímetro

m = Metro

Kg = Quilograma

G = Gauss

T = Tesla

ml = Mililitro

min = Minuto

RPM = Rotação por minuto

m/v = Massa / Volume

$^{\circ}\text{C}$  = Graus celsius

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
	<b>2.1 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>14</b>
	<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>14</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
	<b>3.1 MAGNESITA .....</b>	<b>15</b>
	<b>3.1.1 Magnesita Criptocristalina .....</b>	<b>16</b>
	<b>3.2 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO .....</b>	<b>18</b>
	<b>3.2.1 Separação Magnética.....</b>	<b>19</b>
	3.2.1.1 Separador magnético a seco de baixa intensidade.....	20
	3.2.1.2 Separador magnético a úmido de baixa intensidade.....	20
	3.2.1.3 Separador magnético a seco de alta intensidade.....	22
	3.2.1.4 Separador magnético a úmido de alta intensidade.....	23
	<b>3.2.2 Flotação .....</b>	<b>24</b>
	3.2.2.1 Microflotação em tubo de Hallimond.....	27
	<b>3.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO.....</b>	<b>28</b>
	<b>3.3.1 Fluorescência de raios x.....</b>	<b>28</b>
	<b>3.3.2 Difração de raios x .....</b>	<b>29</b>
	<b>3.3.3 Microscopia óptica .....</b>	<b>30</b>
	3.3.3.1 Ceramografia .....	31
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
	<b>4.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....</b>	<b>33</b>
	<b>4.2 CONCENTRAÇÃO DO MINÉRIO DE MAGNESITA .....</b>	<b>35</b>
	<b>4.2.1 Separação magnética .....</b>	<b>35</b>
	<b>4.2.2 Flotação .....</b>	<b>35</b>
	4.2.2.1 Microflotação.....	35
	4.2.2.2 Flotação em bancada .....	37
	<b>4.3 CARACTERIZAÇÕES .....</b>	<b>38</b>
	<b>4.3.1 Análises químicas .....</b>	<b>38</b>
	<b>4.3.2 Análise microestrutural.....</b>	<b>38</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCURSÕES.....</b>	<b>39</b>
	<b>5.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DO RESÍDUO DO MINÉRIO DE MAGNESITA .....</b>	<b>39</b>

<b>5.2 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA .....</b>	<b>42</b>
<b>5.3 FLOTAÇÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3.1 Microflotação.....</b>	<b>44</b>
<b>5.3.2 Flotação em bancada .....</b>	<b>46</b>
<b>5.4 CONCEITO PARA NOVA ROTA DE PROCESSO .....</b>	<b>47</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O minério de magnesita ( $MgCO_3$ ) é um recurso mineral muito importante comercialmente devido a extração do magnésio. O magnésio é utilizado principalmente como material refratário para revestimentos de fornos na produção de ferro e aço, metais não ferrosos, vidro e cimento (PERES et al., 2013).

O magnésio pode ser extraído através de depósitos naturais e a partir da água do mar e salmouras de poços e lagos. O magnésio encontrado em depósitos naturais está presente em mais de 60 minerais, entretanto somente dolomita, magnesita, brucita, periclásio ( $MgO$ ), carnalita e olivina (forsterita) apresentam importância comercial. A produção comercial a partir de magnesita, no entanto, é a mais econômica (GARCIA, 2004). A magnesita natural ( $MgCO_3$ ) distingue-se por natureza em duas formas físicas distintas, cristalina e criptocristalina, também denominada amorfa. Os dois tipos diferem na estrutura, no tamanho dos depósitos, modos de formação e método de processamento (BENTLI et al., 2017).

Em geral, para a extração da magnesita, a rocha passa pelos processos de britagem, peneiramento e seleção manual. Em seguida, o minério passa pelas etapas de separação magnética e flotação para a remoção de impurezas, principalmente minerais portadores de ferro e silicatos. A elevada pureza do minério de magnesita, normalmente acima de 90% de  $MgO$ , tem fundamental importância devido à produção do sinter magnésiano, principal matéria prima para a fabricação de refratários básicos de alta qualidade para aplicações em indústrias a altas temperaturas.

Além do produto desejado no beneficiamento mineral, nesse caso o concentrado de magnesita, tem-se a formação de volumes significativos de resíduo ao longo das etapas de processamento, causando preocupação quanto ao passivo ambiental, custos para gerenciamento das barragens, além da perda econômica devido a uma porcentagem do mineral desejado estar presente no resíduo. Portanto, aumentar a recuperação do minério de magnesita não só reduziria o volume de resíduo, mas também diminuiria significativamente o custo de extração e aumentaria a vida útil da mina (MORAES, 2019). Atualmente, o resíduo do minério de magnesita gerado na planta de processamento mineral da RHI Magnesita em Eskisehir-Turquia é descartado e depositado em pilhas. A crescente demanda mundial por bens minerais, aliada ao desenvolvimento econômico e tecnológico, condiciona, de forma sustentável e economicamente viável, o aproveitamento de minérios de baixo teor ou mesmo aqueles de difícil beneficiamento (LUZ, 2010).

Assim, este trabalho teve como interesse o aproveitamento do resíduo proveniente da planta de processamento mineral da RHI Magnesita em Eskisehir na Turquia, com o objetivo de desenvolver uma rota de beneficiamento para a recuperação do óxido de magnésio presente nesse material. Esse resíduo tem como principal característica a baixa granulometria, entre 2 mm a 5 mm, tendo seu processamento limitado na rota atual devido a esse aspecto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma rota de beneficiamento do resíduo do minério de magnesita criptocristalina proveniente de Eskisehir-Turquia, para a recuperação do carbonato de magnésio.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar o resíduo e realizar ensaios exploratórios de separação magnética e flotação, para a concentração do minério de magnesita
- Definir o melhor método de separação magnética, considerando a eficiência na remoção do ferro.
- Definir os parâmetros da flotação em bancada, em função dos reagentes e pH do meio, considerando a eficiência na separação da sílica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O resíduo utilizado nesse trabalho é proveniente do minério de magnesita criptocristalina, portanto será abordado primeiramente nessa revisão bibliográfica referente ao mineral magnesita, sua composição, importância comercial e formas físicas distintas, com ênfase na magnesita criptocristalina. Assim, tendo como objetivo desse trabalho a concentração do carbonato de magnésio, será abordado dois processos de beneficiamento, sendo eles separação magnética e flotação. E por fim, as três técnicas utilizadas para a caracterização das amostras serão apresentadas.

#### 3.1 Magnesita

O nome magnesita é uma alusão à sua composição. Contém 47,81% de óxido de magnésio (MgO) e 52,19% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Ferro pode substituir o magnésio em grande extensão, porém magnesitas naturais, como regra, apresentam baixos teores desse elemento. Pequenas quantidades de cálcio e manganês são também encontradas, porém, a miscibilidade com carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e carbonato de manganês (MnCO<sub>3</sub>) é limitada (GARCIA, 2004).

O minério de magnesita (MgCO<sub>3</sub>), extraído de depósitos naturais, é um recurso mineral muito importante comercialmente devido a extração do magnésio, podendo ser encontrado, por exemplo, na Áustria, Grécia, Turquia, Rússia, Espanha, China e Brasil. O magnésio é utilizado principalmente como material refratário para revestimentos de fornos na produção de ferro e aço, metais não ferrosos, vidro e cimento (PERES et al., 2013). Com o objetivo de atender as especificações industriais, os minerais de ganga do minério bruto de magnesita devem ser reduzidos a níveis aceitáveis. As impurezas críticas são dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Além dos depósitos naturais, o magnésio pode ser extraído através da água do mar, sendo esse por um processo de precipitação no qual o hidróxido de magnésio (Mg(OH)<sub>2</sub>) é precipitado pela adição de álcalis como dolomita calcinada ou como calcário calcinado. O hidróxido é lavado, filtrado e queimado a temperaturas entre 1700-2000°C para produzir grãos refratários (SPENCER, 1971).

A criação dos depósitos naturais de magnesita (MgCO<sub>3</sub>) diferencia-se em duas formas físicas distintas, sendo elas macrocristalina e criptocristalina, também referida como amorfa. Os depósitos de magnesita macrocristalina são caracteristicamente formados por grandes, porém curtas, lentes de magnesita em sedimentos marinhos clásticos de plataforma, de idade Proterozóica-Paleozóica, consistindo em dolomitos, calcários, folhelhos, arenitos, conglomerados e, não raramente, rochas meta-vulcânicas básicas (GARCIA, 2004).

O  $\text{MgCO}_3$  criptocristalino de grão fino é um produto de alterações, através de reações de hidratação e carbonatização, das rochas de serpentinas, que foram submetidas a soluções aquosas de temperatura moderada e baixa salinidade, ricas em  $\text{CO}_2$ . A serpentina é em si um produto de alteração das rochas ultrabásicas e fica perto ou em torno do  $\text{MgCO}_3$  (BENTLI et al., 2017; HONORATO, 2019). Assim, Zachmann (1989) apresenta algumas características relacionada a magnesita criptocristalina.

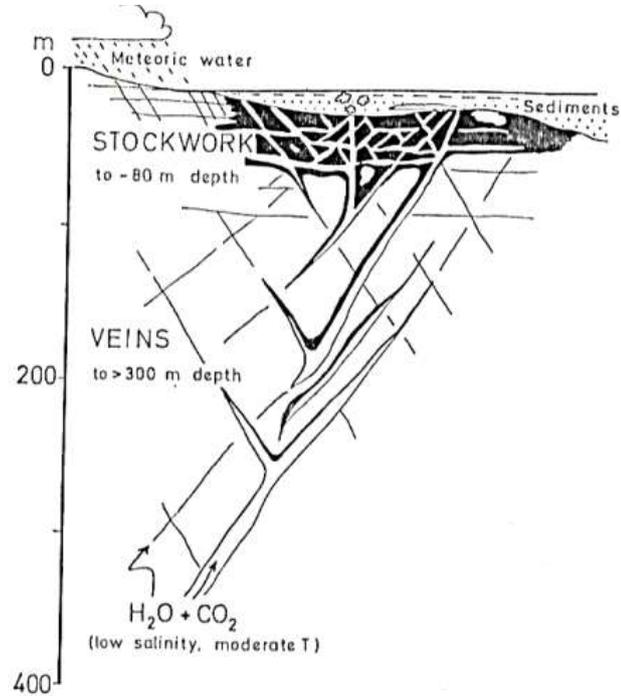
### 3.1.1 *Magnesita criptocristalina*

A ocorrência da magnesita criptocristalina está confinada a zonas tectônicas em corpos ultrabásicos ricos em Mg. Conforme a profundidade da mineralização, as ocorrências desse tipo de magnesita podem ser divididas em três subtipos, sendo em Eskisehir na Turquia encontrada em *stockwork* e veios, (ZACHMANN et al., 1989):

- **Magnesita epigenética:** Ocorre nos sedimentos sobrejacentes ou adjacentes às rochas ultrabásicas, geralmente na forma de concreções nodulares. Em sedimentos mais grossos, a magnesita epigenética impregna os interstícios. O número de concreções pode aumentar resultando em costuras de magnesita pura. Elas são de pura qualidade, ocasionalmente com pequenas misturas de calcita e dolomita.
- **Magnesita *stockwork*:** Ocorre nas zonas de intemperismo das superfícies terrestres antigas, observado na Figura 1. As zonas podem atingir espessuras de até 80 m. Nessa profundidade, essa magnesita desaparece ou uma zona de transição se desenvolve, na qual a magnesita *stockwork* é substituída pela magnesita em veios. A magnesita de *stockwork* é caracterizada pela textura semelhante a uma rede de veios finas, observado na Figura 2. A rocha hospedeira ultrabásica é geralmente decomposta em filossilicatos e quartzo com misturas de carbonatos de Ca-Mg, e o grau de mineralização da magnesita correlaciona-se positivamente com o grau de decomposição da rocha hospedeira. Devido às impurezas da rocha hospedeira, a magnesita *stockwork* é geralmente de baixa qualidade. O teor de magnesita nos minérios pode chegar a 40%.
- **Magnesita em veios:** Em áreas com magnesita *stockwork*, a magnesita em veios é geralmente restrita às partes inferiores dos corpos ultramáficos de carbonato de Mg. No entanto, em algumas áreas, a magnesita em veios começa imediatamente na crosta do intemperismo. Preenche sistemas de fissuras e fraturas que seguem as direções tectônicas. Os veios de magnesita atingem comprimentos de mais de 1 km, uma espessura de até 20 m e profundidades de 350 m. Devido às misturas de carbonatos de

Ca-Mg e filossilicatos, a qualidade da magnesita em veios diminui geralmente da região central para as regiões marginais de uma veios.

**Figura 1 – Modelo do depósito de magnesita criptocristalina**



Fonte: (HONORATO, 2019)

**Figura 2 – Rede de veias finas de magnesita criptocristalina**



Fonte: (SALA, 2016)

Para a extração e concentração da magnesita criptocristalina, o minério precisa passar por processos de beneficiamento, que envolve etapas de cominuição e remoção de impurezas.

### 3.2 Processos de Beneficiamento

Inicialmente, é relevante que seja definido os conceitos e que seja estabelecida a definição entre mineral e minério. Assim, mineral é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrados na crosta terrestre. Minério é toda rocha composta de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possíveis de serem aproveitados economicamente. O mineral ou conjunto de minerais não aproveitados é denominado ganga (SOUZA, 2010).

O aproveitamento de matérias-primas minerais requer invariavelmente algumas formas de beneficiamento (tratamento). A intensidade do tratamento necessário do minério depende do teor de minério da jazida, assim como da especificação desejada do produto. Com o objetivo de atingir essa especificação do produto, a qual é normalmente dada em termos de um teor mínimo do mineral de interesse, ou de um teor máximo de algum tipo de contaminante, torna-se necessária a concentração do minério (SOUZA, 2010).

Assim, o beneficiamento de minérios é operações visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais. Existe um conceito mais amplo para o tratamento de minérios, como sendo um processamento no qual os minerais podem sofrer até alterações de ordem química, resultantes de simples decomposição térmica ou mesmo de reações típicas geradas pela presença do calor. A aglomeração de finos de minérios (briquetagem, sinterização e pelotização), a ustulação e a calcinação são consideradas, dentro desse conceito mais abrangente, como tratamento de minérios (LUZ, 2010).

O minério de magnesita pode ser beneficiado por diversos processos, tais como, classificação manual ou óptica, separação magnética, separação por gravidade, flotação, calcinação. Esses processos são selecionados conforme as características do minério de uma determinada região, aspectos econômicos e práticos da empresa, entre outros. Na região da Turquia, a seleção manual e separação magnéticas são os métodos mais preferidos nas plantas de beneficiamento de  $MgCO_3$ , o minério de magnesita é beneficiado pela classificação manual e separação magnética a seco nos locais da mina para pré-concentração. Em seguida, é sujeito ao beneficiamento final através do separador magnético a seco de alta intensidade, com ímãs constantes (BENTLI, 2017).

Bentli (2017) estudou a concentração do minério de magnesita de qualidade intermediária, contendo as impurezas de sílica e ferro, proveniente da Kütahya - Turquia, pelos processos de calcinação e separação magnética a seco. O produto final de  $MgCO_3$  calcinado apresentou

89,57% de MgO, 0,96% de SiO<sub>2</sub>, 0,43% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2,35% de CaO e 6,64% de perda ao fogo. Assim, a magnésia calcinada obtida pelo processo sugerido pelo autor foi classificada como adequada para os requisitos de uso industrial.

### ***3.2.1 Separação magnética***

A separação magnética é um método empregado na concentração de minerais, no beneficiamento de minério e na remoção de sucata. A susceptibilidade magnética é a propriedade de um mineral que determina sua resposta a um campo. Com base nessa propriedade, os materiais ou minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele (SAMPAIO et al., 2002).

Minerais ferromagnéticos compreendem aqueles que são fortemente atraídos pelo ímã comum. O exemplo mais conhecido é a magnetita. Os paramagnéticos são fracamente atraídos e o exemplo clássico é a hematita. Os minerais diamagnéticos possuem susceptibilidade magnética negativa e, portanto, são repelidos quando submetidos a um campo magnético. Entre outros, se destacam: quartzo, cerussita, magnesita, calcita, barita, fluorita, esfalerita, etc (SAMPAIO et al., 2002).

Na separação magnética, as distinções de susceptibilidade dos minerais são empregadas para separação desses. Através do controle do campo magnético é possível ter uma seletividade das partículas., minerais com alta susceptibilidade são separados usando baixas intensidades de campo magnético, e minerais com baixa susceptibilidade exige campos magnéticos mais elevados (GONZAGA, 2014).

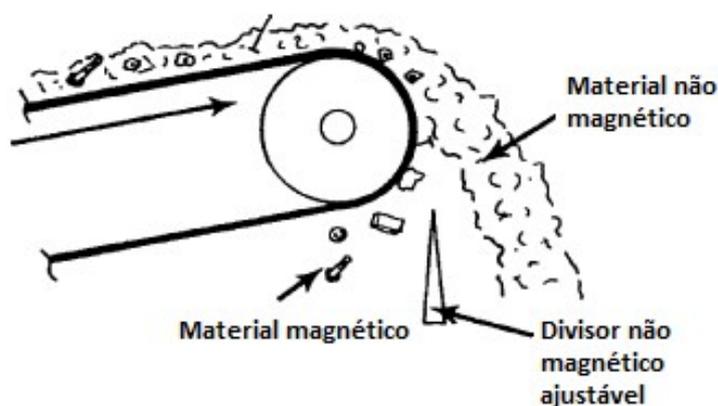
Os separadores magnéticos podem ser classificados como separadores a seco e a úmido, podendo operar com campo magnético de alta e baixa intensidade. A escolha da classe de um separador depende de várias considerações, sendo as mais importantes a distribuição do tamanho de partícula, a distribuição das propriedades magnéticas das partículas que serão separadas entre si e pelo rendimento necessário da máquina (SVOBODA et al., 2003).

O separador magnético funciona aplicando uma força sobre as partículas de alta susceptibilidade com o objetivo de separá-las das partículas com baixa susceptibilidade magnética. A separação magnética a úmido de alta intensidade é mais empregada para a concentração de minérios. (GONZAGA, 2014).

### 3.2.1.1 Separador magnético a seco de baixa intensidade

A principal aplicação de separadores magnéticos secos de baixa intensidade é a remoção de ferro residual e de impurezas fortemente magnéticas ou a concentração de um componente valioso fortemente magnético. Ímãs suspensos, polias magnéticas e ímãs de placa e grade são normalmente empregados para executar a tarefa anterior, enquanto os tambores magnéticos são usados principalmente para a última aplicação. A Figura 3 representa uma polia magnética (SVOBODA et al., 2003).

**Figura 3 - Polia magnética para separação de materiais fortemente magnéticos**



Fonte: (SVOBODA et al., 2003)

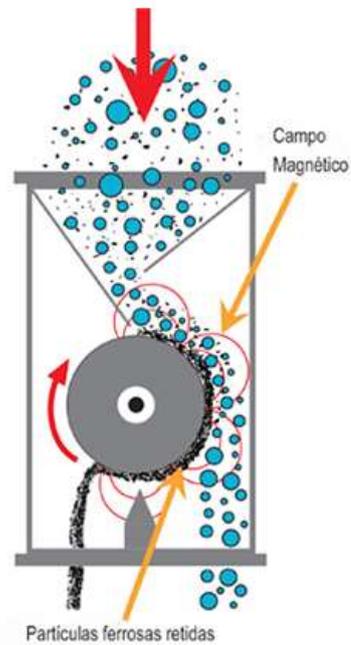
Os separadores magnéticos de baixa intensidade (LIMS) recuperam minérios ferromagnéticos na produção de pré-concentrados ou concentrados. O sistema magnético permite maior carregamento e seletividade, comparado a outros separadores magnéticos, o que reduz o número de unidades necessárias. Menos máquinas implicam menos manutenção, menos capital e menores custos operacionais (PIMENTA, 2014).

### 3.2.1.2 Separador magnético a úmido de baixa intensidade

Os separadores magnéticos úmidos de baixa intensidade mais usados são os separadores de tambor. Esses separadores são utilizados principalmente para a recuperação da magnetita e ferrosilício, minerais empregados na separação por meio denso. O princípio de funcionamento destes separadores, visualizado na Figura 4, é baseado em magnetos permanentes, os quais podem ser orientados de forma radial ou axial ao tambor, demonstrado na Figura 5. Na configuração radial a polaridade dos magnetos é alternada ao longo do eixo do tambor, enquanto na configuração axial, os polos são alternados no decorrer da circunferência do tambor. O movimento e a agitação das partículas sobre os magnetos com polaridades alternadas

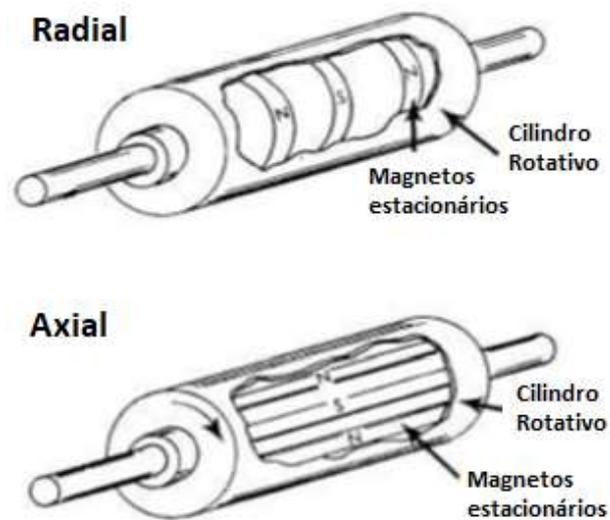
facilitam a remoção das partículas não magnéticas incrustadas gerando um aumento no teor do concentrado (SVOBODA et al., 2003).

**Figura 4 – Funcionamento do separador magnético de tambor**



Fonte: (Italindustria)

**Figura 5 - Configuração dos polos em separadores magnéticos de tambores**



Fonte: (PIMENTA, 2014)

A Figura 6 apresenta o separador magnético de tambores, do fabricante Steinert, esse equipamento destaca-se por operarem nos principais centros de mineração espalhados pelo mundo e na América do Sul já estão sendo utilizados pelas principais mineradoras presentes no Brasil. O campo magnético dos tambores varia, podendo atingir em torno de 1500 a 7000 Gauss. Os tambores de média intensidade são fornecidos, tipicamente, com um tambor de diâmetro de 24”, já os de baixa intensidade podem ter até 48” de diâmetro (PIMENTA, 2014).

**Figura 6 - Tambor Magnético da Steinert**



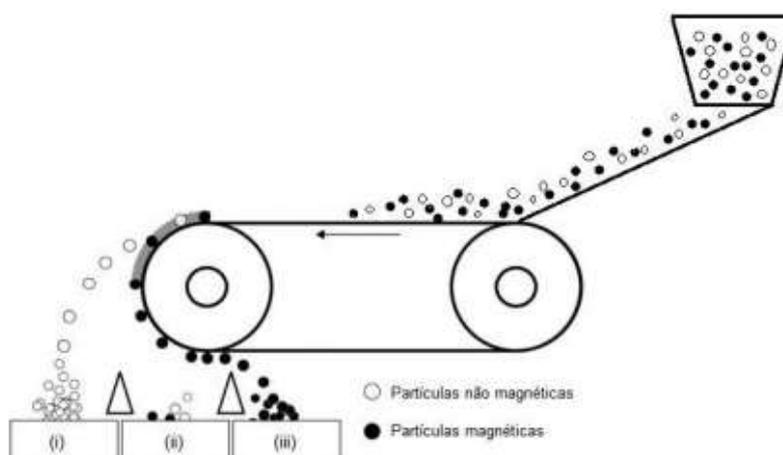
Fonte: (PIMENTA, 2014)

### *3.2.1.3 Separador magnético a seco de alta intensidade*

Com o advento dos materiais magnéticos permanentes de terras raras, tornou-se possível construir separadores de rolos magnéticos que geram uma força magnética maior que os separadores eletromagnéticos de alta intensidade (SVOBODA et al., 2003). Esse separador, exemplificado na Figura 7, opera a seco, consistindo basicamente em um silo de alimentação, uma correia transportadora e um rolo com um ímã permanente de terras raras, que produz um campo com intensidade superior a 1 T. Os parâmetros que podem ser alterados são a espessura da correia, a velocidade de rotação dos rolos, o número de estágios utilizados e a faixa granulométrica da alimentação (PEREIRA, 2016).

Embora o campo magnético não possa ser facilmente variado, por uma seleção criteriosa do material magnético permanente e pela otimização da configuração geométrica de tal rolo, é possível projetar rolos para tratamento de materiais de diferentes faixas de tamanho e distribuições de susceptibilidade magnética (SVOBODA et al., 2003).

**Figura 7 - Separador de rolo magnético permanente**



Fonte: (PEREIRA, 2016)

Durante a operação, o material alimentado é distribuído igualmente na correia de modo que todas as partículas sofram a ação do campo magnético e, conforme a susceptibilidade magnética da partícula, ela pode (i) ter seu caminho alterado por apresentar baixa susceptibilidade magnética, ou seja, não permanecendo no rolo e sendo depositada no campo de material não magnético, (ii) ser depositada no campo de material misto, pois sua susceptibilidade não foi alta o suficiente para permanecer aderida na correia, como não foi baixa o suficiente para ir para o depósito de materiais não magnéticos ou (iii) permanecer aderida à superfície do rolo e ser depositada no campo de material magnético (PEREIRA, 2016).

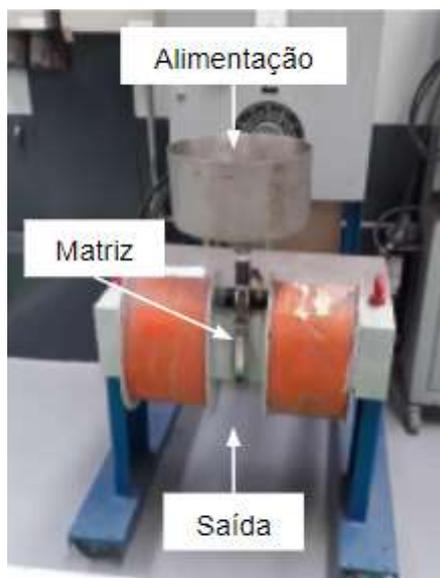
As vantagens do uso desse tipo de equipamento são: não necessidade de corrente elétrica e nem dos dispositivos para resfriamento de bobinas; os campos magnéticos obtidos através desses equipamentos são estáveis e situam-se na faixa acima de 1 T e os equipamentos são compactos e de fácil operação. Porém, pode-se citar como desvantagem a inflexibilidade para a variação da intensidade do campo magnético e o uso do equipamento em materiais com partículas muito finas, pois estas se aderem na superfície da correia, diminuindo a eficiência do processo e podendo levar a situações de desgaste, aumentando o custo da operação (PEREIRA, 2016).

#### *3.2.1.4 Separador magnético a úmido de alta intensidade*

Com o surgimento das matrizes ferromagnéticas, a separação magnética tomou grandes proporções em seu desenvolvimento. Desse modo, o sistema de matrizes e a elevada eficiência da separação nas faixas granulométricas finas, proporcionou vantagens significativas comparados aos demais (SAMPAIO, 2002).

O campo magnético do separador é gerado por eletroímãs, entre os quais situam-se as matrizes ferromagnéticas. Estas possuem, entre outras, a responsabilidade de proporcionar um alto campo magnético por onde passa o minério, no qual as partículas paramagnéticas são capturadas nas próprias matrizes, por ação do campo magnético (JOÃO ALVES et al., 2007). A Figura 8 exemplifica um modelo de separador magnético a úmido.

**Figura 8 – Separador magnético a úmido de alta intensidade para uso em laboratório**



Fonte: (Próprio Autor)

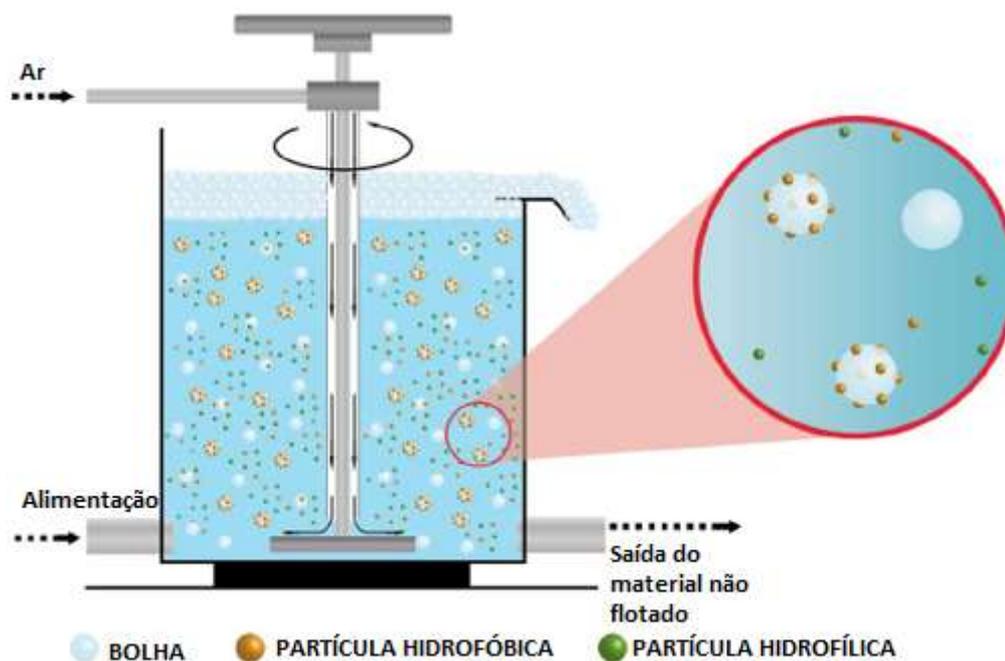
### 3.2.2 Flotação

A flotação é um processo de separação aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície entre as várias espécies presentes. O método trata misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa. A seletividade se baseia no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade. O conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associado à sua umectabilidade ou “molhabilidade” pela água (PERES et al., 2013).

A flotação é usada para separar minerais através de adesão seletiva em bolhas de ar. A técnica consiste na dispersão de um fluxo de ar (na forma de bolhas) em uma polpa, formada por minerais, água e reagentes, em equipamentos denominados células de flotação, representada pela Figura 9. A concentração ocorre porque alguns minerais possuem características de superfícies afins à fase gasosa e podem se aderir às bolhas de ar; o conjunto bolha-partícula apresenta uma densidade aparente menor que a do meio aquoso e ascende até a

superfície, onde é recolhido sob a forma de espuma. As espécies minerais que não têm afinidade pelo ar permanecem em suspensão envolvidas por moléculas de água (OLIVEIRA, 2016).

**Figura 9 - Representação esquemática da flotação em uma célula mecânica**

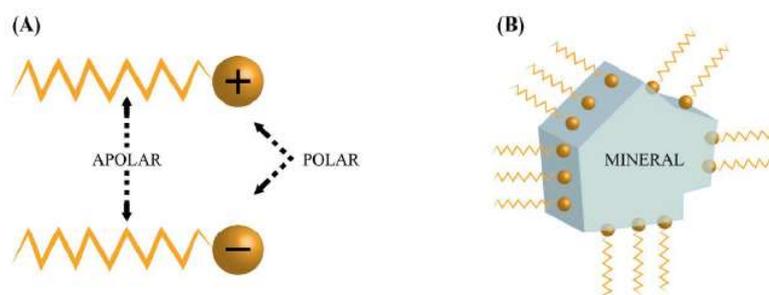


Fonte: (OLIVEIRA, 2016)

Vários reagentes químicos são empregados na flotação, sendo esses divididos em três classes: coletores, espumantes e modificadores. Os coletores alteram a superfície mineral passando de hidrofílico para hidrofóbico, contribuindo para a adesão entre partículas e bolhas; os espumantes proporcionam um aumento na estabilidade das bolhas de ar, atuam na redução da tensão superficial e os modificadores atuam melhorando a seletividade e/ou recuperação. Dentre os modificadores evidencia-se os depressores, capazes de inibir a ação do coletor e hidrofilar a superfície dos minerais.

Os coletores são agentes que atuam na interface sólido-líquido devido à configuração heteropolar apresentada em sua molécula, formada por uma parte inorgânica (polar) e outra orgânica (apolar), tendo a parte polar interagindo com a superfície do sólido e a porção apolar direcionada para a fase líquida, esquematizado pela Figura 10. A região polar pode ser ionizada através da interação com a água, desse modo os coletores iônicos são divididos em catiônicos e aniônicos, sendo as aminas e os ácidos carboxílicos exemplos, respectivamente.

**Figura 10- Representação da estrutura heteropolar e iônica do coletor (a) e o recobrimento do coletor na superfície mineral (b)**



Fonte: (OLIVEIRA, 2016)

O processo de flotação pode ser realizado através da flotação direta ou reversa. Quando os minerais de interesse são flotados e separados nas espumas, denomina-se flotação direta, e quando os minerais de ganga são flotados e os minerais de interesse permanecem na polpa mineral, denomina-se flotação reversa.

Nos últimos anos, a flotação tornou-se uma técnica cada vez mais importante para o tratamento de minérios de magnesita. Para minérios que tenham, essencialmente, ganga de silicato, a flotação catiônica é frequentemente a técnica mais adequada, os silicatos são flotados e a fração deprimida se torna o concentrado de magnesita. Quando dolomita e / ou calcita é o maior componente da ganga, os reagentes aniônicos parecem ser os únicos capazes de atingir a seletividade. Ácidos graxos com 12 a 18 átomos de carbono são os coletores mais frequentemente usados. A magnesita é flotada, tornando-se o concentrado de magnesita, enquanto a dolomita é deprimida por uma variedade de agentes modificadores orgânicos e / ou inorgânicos (BRANDÃO, 2013).

Brandão (2013) avaliou o comportamento no processo de flotação da magnesita macrocristalina pura proveniente de Brumado-Brasil, em uma ampla faixa de pH, com diferentes coletores aniônicos, utilizando o *tall oil* refinado para fins comparativos. O ácido oleico provou ser o coletor ideal para a magnesita pura, visto que preenche os requisitos de eficácia e disponibilidade, embora ligeiramente inferior ao ácido elaídico que obteve a melhor eficiência. Sob condições comparativas, o *tall oil* refinado comportou-se como um coletor intermediário, em comparação com os ácidos linoleico e oleico, seus dois componentes principais. A magnesita flotou melhor em pH moderadamente ácido, no entanto, testes de flotação laboratorial em larga escala e até aplicações industriais, são frequentemente realizados em condições básicas, geralmente entre pH 9 e 10. Os principais motivos são:

(a) pH 9 e 10 é o pH natural da maioria desses minérios,

(b) boa seletividade é encontrada com o uso de modificadores.

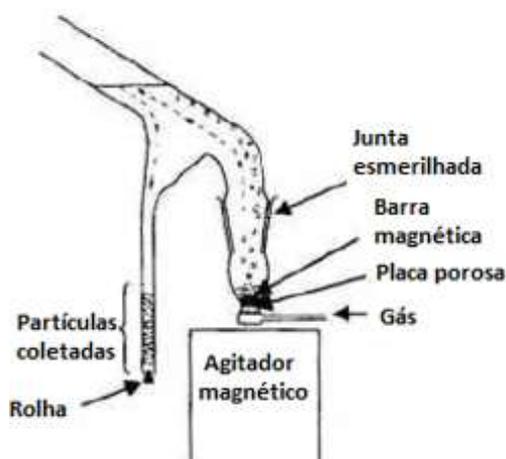
### 3.2.2.1 Microflotação em tubo de Hallimond

Para avaliar as interações entre reagentes e minerais no processo de flotação é necessário o emprego de técnicas que são conhecidas como critérios de flotabilidade. Essas técnicas fornecem indicativos da flotabilidade ou hidrofobicidade de um dado mineral, podendo ajudar na elucidação de fenômenos físico-químicos que ocorrem em uma célula de flotação. O teste de microflotação em tubo de Hallimond é uma técnica utilizada como critério de flotabilidade (RODRIGUES, 2011).

O tubo de Hallimond original foi criado por Hallimond. A. F. em 1944. Para melhorar o desempenho do método, foram realizadas algumas modificações no tubo original. Desse modo, o tubo de Hallimond modificado, representado na Figura 11, consiste em um tubo de vidro com suave inclinação, logo após a curvatura, há uma região para sedimentação e coleta das partículas flotadas. No fundo do dispositivo localiza-se uma placa porosa onde ocorre a passagem do ar e logo acima é posicionado a barra magnética para agitação.

Os testes de microflotação são realizados com amostras minerais puras, o fluxo de ar é injetado no tubo de Hallimond por um orifício abaixo do fundo de vidro sinterizado e percorre todo o tubo arrastando consigo as partículas hidrofóbicas (propriedade natural ou induzida pela adição de reagentes). No entanto, se o fluxo de gás ou a agitação forem excessivos, as partículas podem se dirigir ao flotado por arraste hidrodinâmico, independentemente de seu caráter hidrofóbico ou hidrofílico (RODRIGUES, 2011).

**Figura 11 – Tubo de Hallimond modificado**



Fonte: (ARAUJO et al., 2005)

### 3.3 Técnicas de Caracterização

#### 3.3.1 *Fluorescência de raios x*

A análise de amostras por fluorescência de raios X (FRX), tem como base a medidas das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos presentes na amostra, após uma excitação em geometria adequada. A medida das intensidades pode ser através do uso de detectores de raios X e, posteriormente, equações fundamentais para quantificar os elementos contidos (MASSONI, 2009).

Cada elemento, ao ser excitado na amostra, ejeta elétrons do nível de energia mais interno, provocando vacância a qual deverá ser preenchida pelo elétron da camada posterior. Esse elétron, que realizou salto quântico para preencher a vacância, sofre perda de energia na forma de um fóton de raios X, de energia característica, específica para cada elemento (MASSONI, 2009).

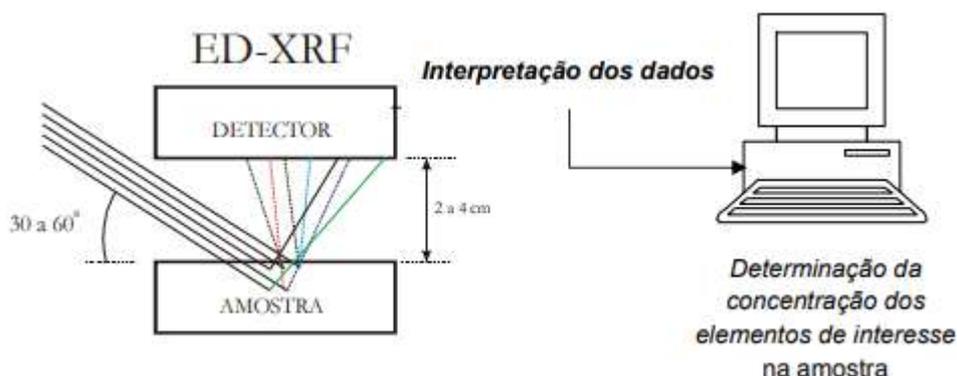
Em resumo, as etapas da análise por fluorescência de raios X por dispersão de energia constam em: (a) excitação dos elementos da amostra os quais sofrem a fluorescência, (b) detecção e medida da intensidade dos raios X característicos e (c) determinação da concentração dos elementos na amostra através das intensidades dos raios X, fazendo uso de equações apropriadas, conforme pode ser visualizado na Figura 12(MASSONI, 2009).

Quando a excitação é monoenergética, utiliza-se de uma expressão matemática (Equação 1) que relaciona a intensidade dos raios X característicos com a concentração de um determinado elemento na amostra (MASSONI, 2009).

$$I = S \cdot c \cdot f \quad (1)$$

Onde **I** é a intensidade dos raios X característicos detectados, **S** a sensibilidade analítica do espectrômetro de raios X para o elemento de interesse, **c** a concentração do elemento de interesse na amostra e **f** o fator de absorção para os raios X do elemento de interesse na amostra (MASSONI, 2009).

**Figura 12 – Geometria de excitação-deteção da FRX, com linhas contínuas representado os raios X e as espalhadas coloridas, os raios x característicos**



Fonte: (MASSONI, 2009)

### 3.3.2 Difração de raios x

A difratometria de raios X (DRX) identifica as fases presente na amostra através do espectro gerado pela estrutura cristalina. Essa técnica permite identificar espécies minerais, é utilizado para caracterização e controle de qualidade dos materiais (GONZAGA, 2014).

As informações obtidas no estudo de materiais utilizando a técnica de DRX são possíveis por causa da união de dois fenômenos: o primeiro relacionado ao espalhamento do feixe de raios X incidente por cada um dos átomos que compõem o material analisado, e o segundo ligado a interferência das ondas espalhadas pelos diferentes elementos que formam os planos atômicos. A combinação desses fatores permite a determinação de informações cristalográficas sobre a estrutura dos cristais (LIMA, 2019).

Quando uma substância cristalina é submetida a um feixe de raios X incidindo a um ângulo específico, os distintos planos ou camadas de átomos ou íons dos cristais refletem parte da radiação, sendo o ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência (GONZAGA, 2014). Quando tais reflexões são geradas é possível observar que as ondas refletidas por dois ou mais planos entram em fase apresentando interferências construtivas. Nesta condição tem-se um feixe difratado (SILVA, 2013).

Se dois ou mais planos forem considerados, as condições para a formação de um feixe difratado vão depender da diferença de caminho percorrido pelo feixe de raios X. Na Figura 13, observa-se que a diferença de caminho equivale à Equação 2:

$$d \sin\theta \quad (2)$$

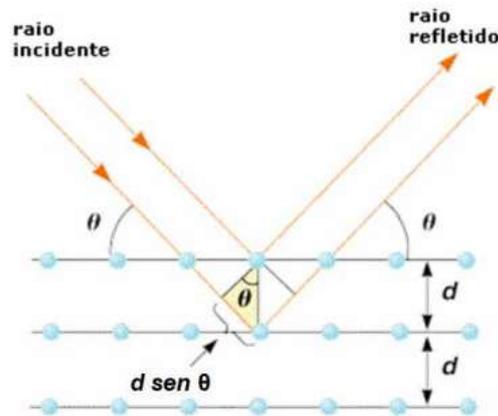
em que  $d$  é a distância interplanar e  $\theta$  é o ângulo de incidência, medido entre o feixe incidente e os planos atômicos. Se ambos os planos refletirem os raios X em fase, a diferença de caminho

percorrido pelo feixe de raios X deve ser um número inteiro de comprimentos de onda. Assim, a condição para que ocorra a difração se dá pela lei de Bragg (Equação 3):

$$n\lambda = 2 d \sin\theta \quad (3)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação X (monocromática) e  $n$  é um número inteiro (1, 2, 3...) correspondente à ordem de difração dos planos do cristal em questão (SILVA, 2013).

**Figura 13 – Representação da Lei de Bragg em duas dimensões**



Fonte: (SILVA, 2013)

A lei de Bragg dá origem a formação dos picos de difração, quando vista em nível de planos cristalinos. Após a análise de difração de raios X na amostra de interesse, são obtidos dados para a construção do gráfico da intensidade do feixe difratado pelo ângulo de difração  $2\theta$ , ou seja, um difratograma que permite a identificação dos compostos (GONZAGA, 2014).

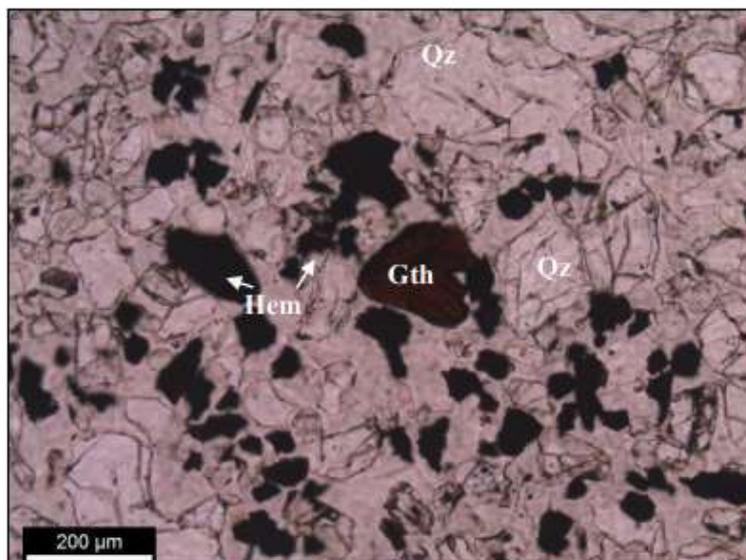
As distâncias interplanares de uma substância cristalina qualquer são características da mesma, assim como o são o índice de refração, a densidade, o ângulo óptico e outras constantes, de maneira que um conjunto de valores  $d$  num difratograma pode identificar a substância (SILVA, 2013).

### 3.3.3 Microscopia óptica

Esta técnica é extremamente útil para o estudo de problemas de beneficiamento, pois permite não só a identificação rápida dos constituintes de um minério, bem como dos parâmetros texturais, tais como abundância dos minerais, tamanhos, liberação, forma, associações etc. Estimativas semiquantitativas dos parâmetros mencionados podem ser obtidas através de vários procedimentos de contagem (GARCIA, 2004).

A Figura 14 apresenta um exemplo de fotomicrografia, obtida através da técnica de microscopia óptica. Pode-se observar grãos de quartzo (Qz) e ao centro grão de goethita (Gth). A fase mineral hematita (Hem) também está presente na amostra (MARTINS, 2016).

**Figura 14 - Fotomicrografia do rejeito de flotação do itabirito**



Fonte: (MARTINS, 2016)

A luz polarizada, ao atravessar uma lâmina delgada de um mineral transparente, ou ao ser refletida por um mineral opaco, sofre mudança no seu plano de vibração. Assim sendo, a observação das propriedades ópticas, apresentadas pelos minerais quando observados em luz polarizada, dá informações que permitem a sua identificação. As propriedades características dos minerais transparentes para a espessura padrão de 30µm são tabuladas, podendo ser consultadas em literatura clássica. Os minerais opacos, da mesma forma, possuem suas características e propriedades sob luz polarizada refletida tabuladas o que permite a um operador qualificado a identificação das fases sob estudo (GARCIA, 2004).

### 3.3.3.1 Ceramografia

Como na preparação de amostras metalográficas, a preparação de amostras de cerâmica requer as mesmas etapas: amostragem, montagem, identificação, retificação e polimento, limpeza e ataque químico. Entretanto, a fragilidade, a dureza, a porosidade e a resistência química dos materiais cerâmicos apresentam dificuldades específicas. Semelhante aos procedimentos de preparação para amostras de metal ou polímero, os métodos de preparação

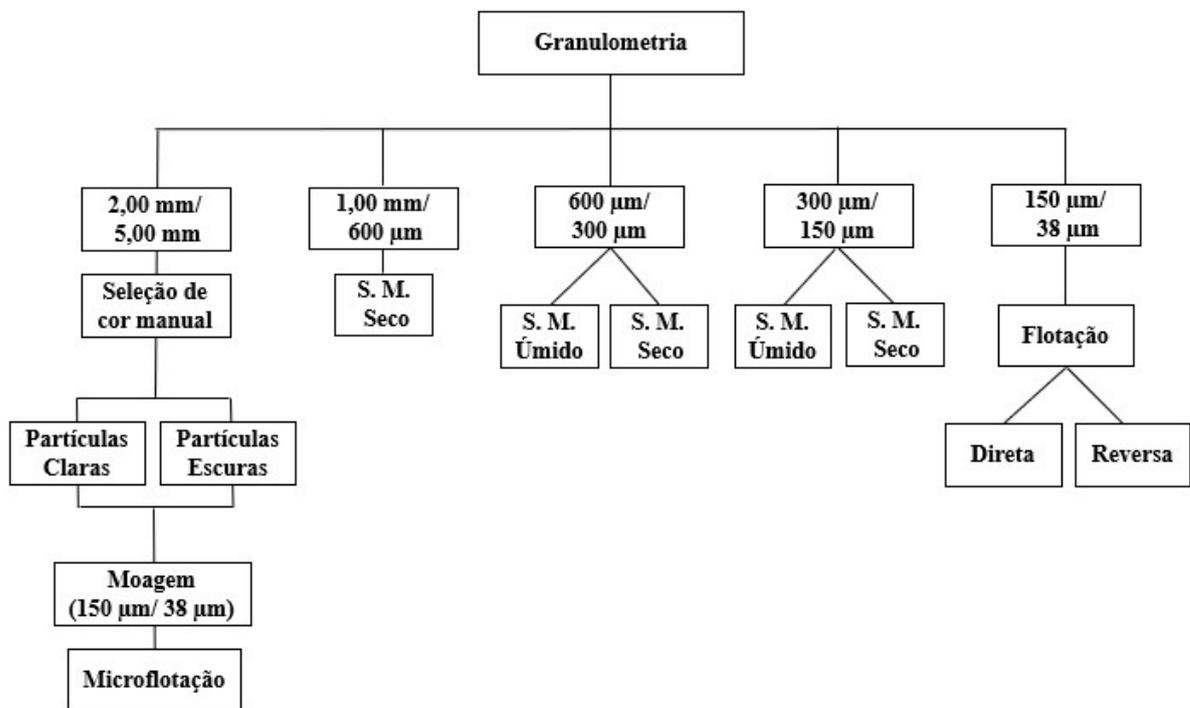
para cerâmica também são variados. Em qualquer caso, a amostra preparada deve revelar claramente a microestrutura para o exame macroscópico e microscópico e não deve conter quaisquer artefatos que foram gerados pela preparação da amostra (PETZOW, 1999).

Na etapa de montagem, tem-se a técnica de infiltração. A infiltração de qualquer material que tenha porosidade aberta ou fechada com uma resina de baixa viscosidade é recomendada para evitar interpretações errôneas causadas por rompimentos ou manchas de poros. A resina penetra nos poros interconectados, criando uma ligação sólida entre a amostra e o material de infiltração (PETZOW, 1999).

#### 4. METODOLOGIA

A Figura 15 apresenta um fluxograma com as rotas de processo pré-determinadas, as quais foram analisadas neste trabalho. Foram utilizadas 4 faixas granulométricas para avaliar a influência da granulometria na separação magnética. Para realizar a microflotação, a amostra passou por uma etapa de catação manual, resultando em dois tipos de partículas, claras (alto teor de MgO) e escuras (baixo teor de MgO). Esse método tem como objetivo explorar possíveis reagentes e pH do meio para serem utilizados na flotação em bancada. Dois métodos de flotação foram realizados com o objetivo de avaliar a eficiência na remoção da sílica, e consequentemente, concentração do óxido de magnésio.

**Figura 15 – Fluxograma das rotas de processo**



Fonte: (Próprio autor)

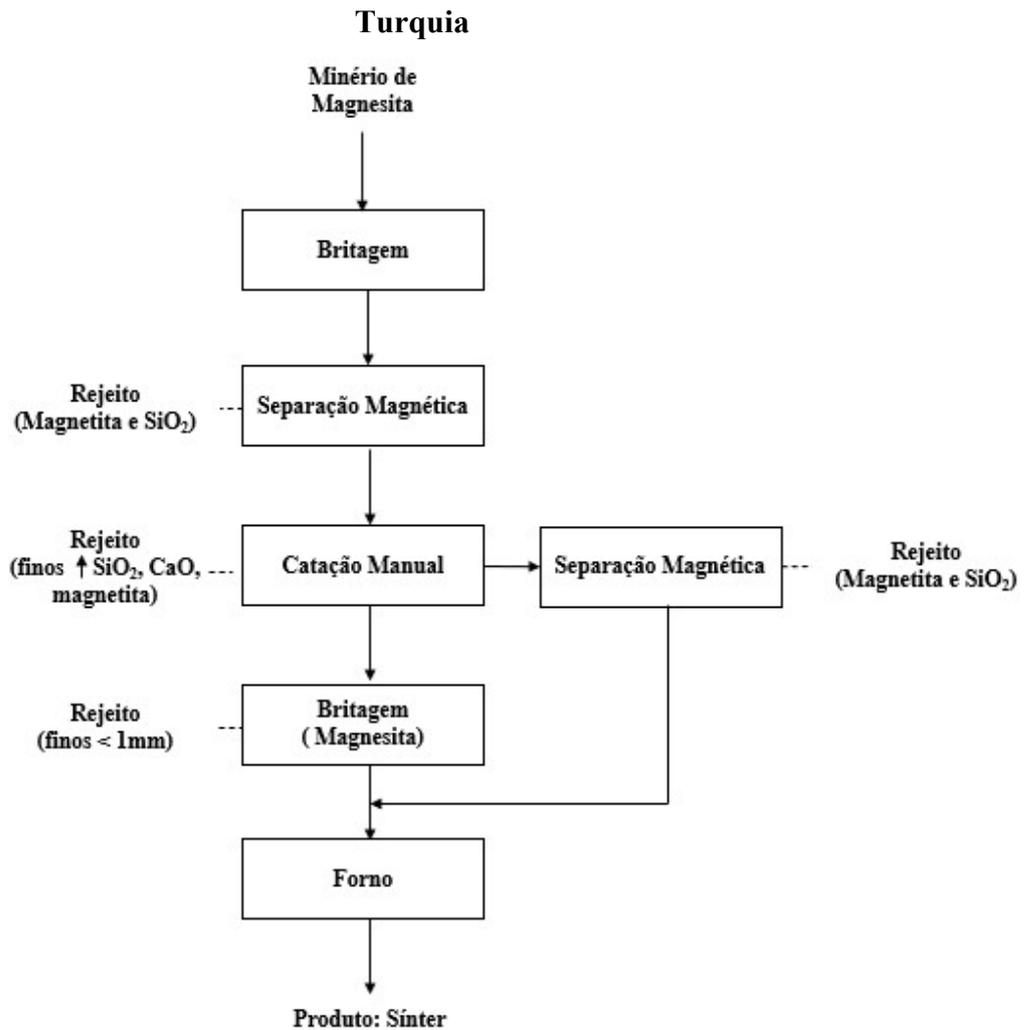
Legenda: S. M.= Separação Magnética

##### 4.1 Preparação da Amostra

As amostras para a realização desse trabalho foram fornecidas pela planta de processamento mineral da RHI Magnesita em Eskisehir na Turquia. O resíduo utilizado foi proveniente da etapa de catação manual, observado através do fluxograma da Figura 16, e enviado ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da RHI Magnesita, localizado em Contagem, Minas Gerais. Foram coletadas 403,5 kg de resíduo. Foi realizado o quarteamento em cone de todo o material,

em seguida esse foi quarteado em quarteador Jones sendo retirada alíquota de 40 Kg. Em seguida o material foi britado, obtendo frações com granulometria inferior a 4,75mm, quarteado em alíquotas menores e enviado para análise de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e microscopia óptica. Para realizar a última análise, a amostra foi preparada pela técnica de ceramografia.

**Figura 16- Fluxograma do processamento do minério de magnesita em Eskisehir na**



Posteriormente, o minério foi classificado em 4 frações, sendo elas: 1,00mm/600 $\mu$ m; 600 $\mu$ m/300 $\mu$ m; 300 $\mu$ m/150 $\mu$ m e 150 $\mu$ m/38 $\mu$ m. Essas frações foram preparadas no britador de mandíbulas Brastorno em circuito fechado, variando a abertura da mandíbula para gerar as frações mais finas, com o auxílio da peneira vibratória Donar. Para obter-se o produto da última fração, a amostra foi lavada utilizando a peneira de 38  $\mu$ m para a retirada dos finos. Foram

realizados quarteamentos das quatro frações granulométricas utilizando o quarteador Jones, retirando alíquotas para as etapas de concentração.

## 4.2 Concentração do Minério de Magnesita

### 4.2.1 Separação magnética

Foram empregadas duas técnicas de separação magnética, a seco, utilizando o separador magnético de alta intensidade, também denominado separador Re-roll, e a úmido, através do separador magnético de alta intensidade WHIMS. No primeiro método de separação foram utilizadas as frações granulométricas 1,00mm/600 $\mu$ m; 600 $\mu$ m/300 $\mu$ m; 300 $\mu$ m/150 $\mu$ m, tendo o campo magnético constante em 8000 Gauss. Na separação magnética a úmido, foram utilizadas somente as granulometrias 600 $\mu$ m/300 $\mu$ m; 300 $\mu$ m/150 $\mu$ m, além disso, foram testados três campos magnéticos para cada fração, sendo eles 6000, 8000 e 10000 Gauss.

O material da alimentação dos separadores magnéticos e os produtos, material magnético e não magnético, foram pesados, quarteados em quarteador Jones e encaminhados para análise de FRX. Para a análise dos resultados foram utilizadas dois cálculos, recuperação mássica e recuperação metalúrgica do MgO.

- Recuperação metalúrgica do MgO (Rec.) no concentrado, dada pela Equação 4:

$$Rec. = \frac{C}{A} * \frac{(A - E)}{(C - E)} \quad (4)$$

Onde, C é igual ao teor de MgO no concentrado; A é igual ao teor de MgO na alimentação e E é igual ao teor de MgO no resíduo.

- Recuperação mássica (R.M.) do concentrado e do rejeito, dado pela Equação 5

$$R. M. = \frac{B}{B + D} * 100 \quad (5)$$

Onde, B é igual a massa do produto em análise e D é igual a massa do produto subsequente.

### 4.2.2 Flotação

#### 4.2.2.1 Microflotação

Para a preparação das amostras, foi realizado uma seleção de cor manual, separando as partículas claras (alto teor de MgO) das escuras (baixo teor de MgO), observado na Figura 17. Posteriormente, essas partículas foram britadas, obtendo granulometria inferior a 150 $\mu$ m e

lavadas, utilizando a peneira de 38  $\mu\text{m}$  para a retirada dos finos. Em seguida, foram quarteadas em alíquotas menores e enviadas para análise de FRX.

**Figura 17 - Produtos selecionados da amostra 5/2mm**



Fonte: (MORAES, 2019)

A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros utilizados para os testes de microflotação, sendo esses realizados em um tubo de Hallimond modificado. Ao todo, foram feitos 84 testes, sendo 42 testes (21 com partículas claras e 21 com partículas escuras) de flotação direta, utilizando o coletor A e 42 testes (21 com partículas claras e 21 com partículas escuras) de flotação reversa utilizando o coletor B. A cada 21 testes, 3 foram feitos variando somente o pH, e os outros variando depressores, dosagem e pH.

**Tabela 1 – Parâmetros para o teste de microflotação**

Amostra	Coletor (dosagem)	Depressor (dosagem)	pH
Partículas claras	A (240 g/T)	C (300 g/T e 1000 g/T)	4
Partículas escuras	B (100 g/T)	D (300 g/T e 1000 g/T)	7
		E (300 g/T e 1000 g/T)	10

Fonte: (Próprio autor)

Cada teste foi realizado utilizando 1 grama de mineral em 125ml de água destilada, com rotação de 1,5 rpm e vazão de ar de 20 ml/min. O tempo de condicionamento do coletor e

depressor foi de 3 minutos para cada um, e o tempo de flotação estipulado foi de 3 minutos. Para ajuste de pH foram utilizadas as soluções a 1% de hidróxido de sódio e ácido sulfúrico. Todos os reagentes foram diluídos a 0,01% m/v.

#### 4.2.2.2 Flotação em bancada

Os testes de flotação foram realizados na célula de flotação em bancada, utilizando granulometria de 150 µm /38 µm. Foram efetuados 5 testes de flotação, tendo seus parâmetros apresentados na Tabela 2. Foram utilizados o coletor A, sendo esse um ácido carboxílico, e o depressor C na flotação direta. Para a flotação reversa foram utilizados o coletor B, uma amina, e o depressor D.

**Tabela 2 – Parâmetros dos testes de flotação em bancada**

Teste	Flotação direta			Flotação reversa	
	1	2	3	4	5
<b>Coletor (dosagem)</b>	A (300 g/T)	A (300 g/T)	A (300 g/T)	B (1000 g/T)	B (1000 g/T)
<b>Depressor (dosagem)</b>	-	-	C (300 g/T)	-	D (300 g/T)
<b>pH</b>	4	10	10	7	7

Fonte: (Próprio autor)

A flotação foi realizada utilizando 30% de sólidos em uma cuba de 2 litros com rotação de 1200 rpm. O tempo de condicionamento do coletor e depressor foi de 2 minutos cada um. Para correção do pH foram utilizadas soluções à 10% de hidróxido de sódio e ácido sulfúrico. A coleta da espuma foi encerrada após não conter mais minério na mesma, após isso, o afundado foi filtrado em um filtro a pressão e o flotado seco em estufa 110°C por 24 horas.

O material da alimentação da célula de flotação e os produtos, concentrado e rejeito, foram pesados, quarteados em quarteador Jones e encaminhados para análise de FRX. Para a análise dos resultados foram utilizados dois cálculos, recuperação metalúrgica do MgO no concentrado e rejeito para os dois tipos de flotação e recuperação mássica, dada pela equação 1 e 2 respectivamente.

### 4.3 Caracterizações

#### 4.3.1 Análises químicas

Para a análise de difração e raios X (DRX), foi utilizado radiação  $\text{CuK}\alpha$  com varredura no intervalo angular ( $2\theta$ ) de  $4^\circ$  a  $70^\circ$  com passo angular de  $0,03^\circ$  e 30 segundos de contagem. O equipamento de difratometria que foi utilizado é o X'Pert PRO da marca PANalytical. O programa X'Pert High Score foi utilizado para identificação das fases, a partir dos picos obtidos através da análise.

A análise de fluorescência de raios X (FRX) foi feita no equipamento MagiX PRO, da marca PHILIPS, com o objetivo de identificar a composição química quantitativa das amostras.

#### 4.3.2 Análise microestrutural

Para análise da microestrutura do minério de magnésita, a amostra foi preparada através da técnica de ceramografia. A amostra foi impregnada em uma resina, em seguida passou pelas etapas de retificação, utilizando disco de diamante, e de lixamento, utilizando lixa de carbeto de silício, para deixar a amostra plana. Posteriormente foi realizado o polimento utilizando pasta de diamante para que a face da amostra impregnada estivesse isenta de riscos. Na Figura 18 pode-se observar a amostra preparada para análise microestrutural.

As etapas de retificação, lixamento e polimento foram realizadas na politriz automática EcoMet™ 300 da marca Buehler. A microestrutura foi analisada no microscópio ótico AX10 Imager.A1m da marca Zeiss utilizando a câmera Axiocam 305.

**Figura 18 – Amostra preparada pela técnica de ceramografia**



Fonte: (Próprio autor)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização da amostra do resíduo do minério de magnesita

Os principais constituintes da amostra do resíduo de magnesita, na granulometria 2mm/5mm, e seus teores, estão apresentados na Tabela 3. A porcentagem de impurezas presente na amostra de resíduo é alta, principalmente  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com 4,5% e  $\text{SiO}_2$  com 22,5%. Para que o minério de magnesita seja utilizado como matéria-prima, especialmente na indústria refratária, deve-se cumprir algumas exigências relativas à sílica, ferro, cal e alumina que não devem exceder, em média, a faixa de 2,5% a 3,0% (COSTA, 2009).

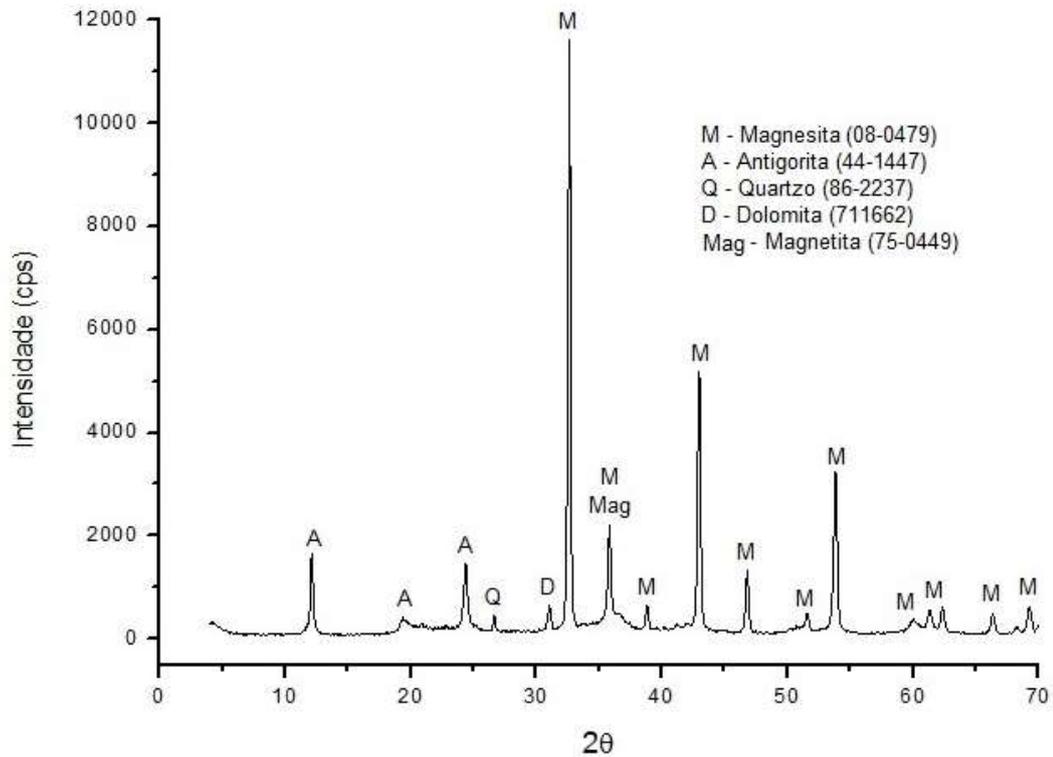
**Tabela 3 – Teor dos principais constituintes do resíduo do beneficiamento da magnesita**

Compostos	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO
Teor (%)	22,5	0,4	4,5	2,2	70,1

Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 19 estão apresentadas as fases minerais encontradas na amostra de resíduo. A magnesita [ $\text{MgCO}_3$ ] é a fase dominante, seguida pela antigorita [ $(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ], magnetita [ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ] dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$ ] e quartzo [ $\text{SiO}_2$ ]. O principal silicato da amostra é a antigorita, mineral do grupo da serpentina, composto principalmente por silicatos de magnésio e/ou ferro. Os silicatos de quartzo foram identificados, entretanto com menor significância. A fase correspondente aos minerais que contém ferro é a magnetita com o pico em torno de  $2\theta = 35,3^\circ$ , presente também no trabalho de Andrade (2009), sendo esse coincidente com o pico da magnesita. O trabalho de Garcia (2004) corrobora os resultados, em relação aos picos de magnesita e dolomita, encontrados na difração de raios x da amostra de resíduo do minério de magnesita,

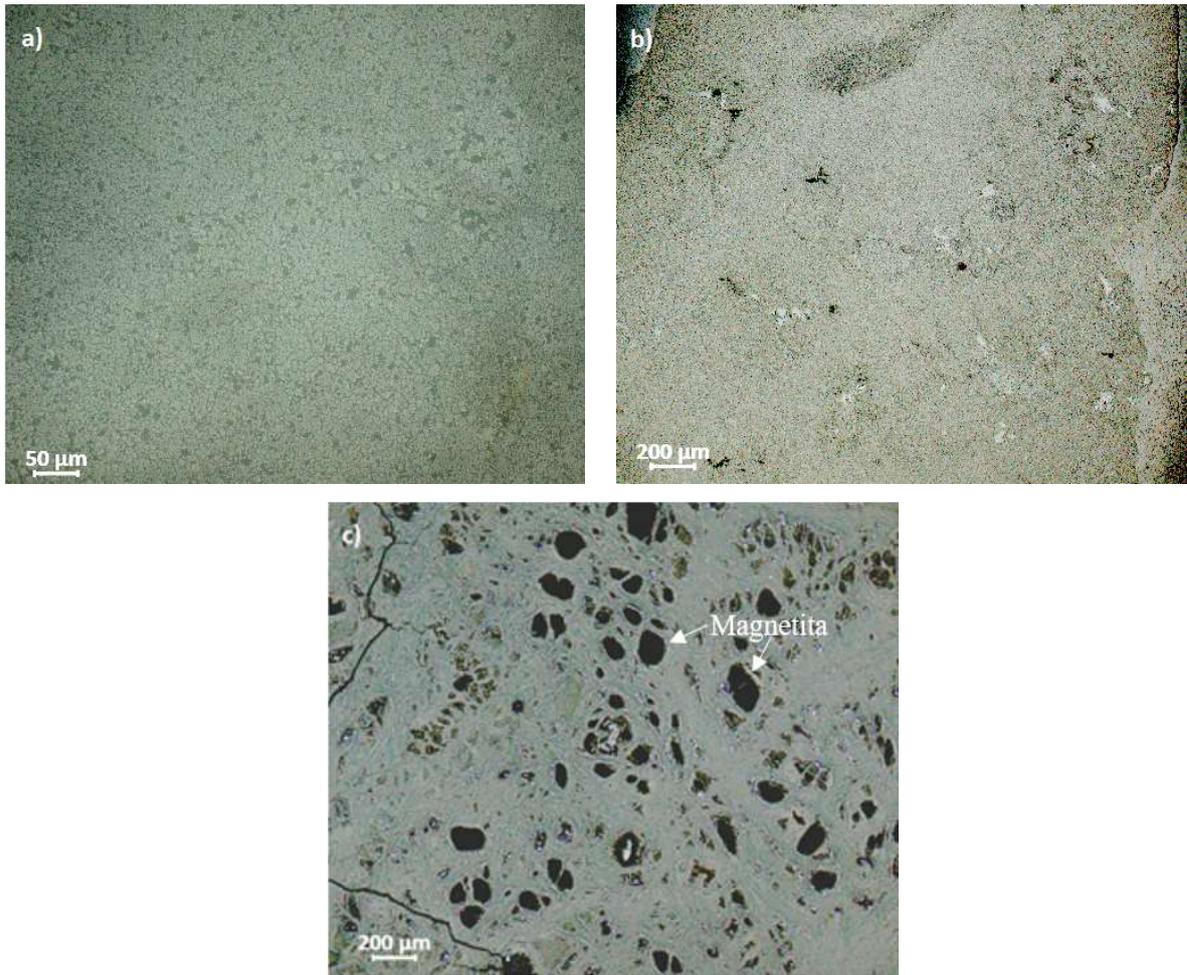
**Figura 19 – Difratoograma da amostra de resíduo**



Fonte: (Próprio autor)

A Figura 20 apresenta três imagens de microscopia óptica da amostra de resíduo. Nas duas primeiras imagens observa-se grãos de magnesita criptocristalina, às vezes referido como amorfo, em que o tamanho do cristal não é detectável a olho nu e varia-se entre 1 a 10  $\mu\text{m}$  (BENTLI, 2017). As impurezas presentes na amostra são observadas na terceira imagem, sendo as regiões mais escuras a magnetita e as demais regiões os silicatos.

**Figura 20 – Microscopia da amostra de resíduo**

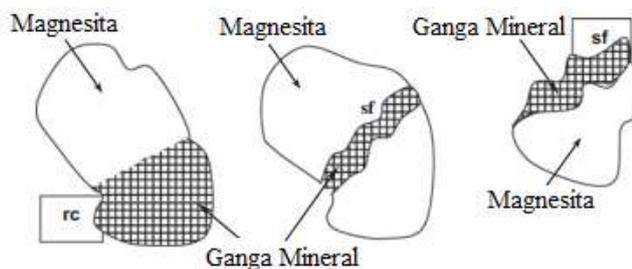


Fonte: (Próprio autor)

Legenda: a) Grãos de magnesita criptocristalina (aumento de 200 vezes); b) Grãos de magnesita criptocristalina (aumento de 50 vezes); c) Impurezas presente no minério (aumento de 50 vezes)

As estruturas comuns de grãos de serpentina ligados a magnesita natural ( $\text{MgCO}_3$ ) são mostradas na Figura 21. Em geral, os recheios de quartzo (sílica) foram epigeneticamente colocados dentro das fraturas dos minérios de  $\text{MgCO}_3$  como recheios secundários (sf) ou camadas de relíquias (rc) (BENTLI, 2017)

**Figura 21 – Recheios secundários (sf) ou camadas de relíquias (rc) de estrutura serpentina ligados a magnesita natural**



Fonte: (BENTLI, 2017)

## 5.2 Separação Magnética

A Tabela 4 apresenta os principais constituintes da amostra de resíduo do minério de magnesita referente as granulometrias 1,00mm/600µm; 600µm/300µm; 300µm/150µm. Cada fração representa o material da alimentação dos separadores magnéticos.

**Tabela 4 – Teor dos principais constituintes da amostra de resíduo referente a cada granulometria**

Compostos	Alimentação dos separadores magnéticos		
	MgO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %
<b>1,00 mm/ 600 µm</b>	70,01	4,50	22,48
<b>600 µm / 300 µm</b>	68,07	4,86	24,01
<b>300 µm/ 150 µm</b>	68,00	4,94	23,83

Fonte: (Próprio autor)

Devido ao alto teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e à alta susceptibilidade magnética da magnetita, a separação magnética foi analisada para o minério inferior a 1mm. Para separar o mineral não-magnético MgCO<sub>3</sub> dos minerais contendo ferro, foram utilizados os separadores magnéticos Re-roll e WHIMS, avaliando a influência da granulometria da amostra na eficiência dos métodos de separação.

Pode-se observar na Tabela 5 os resultados da separação magnética a seco. Esse teste foi capaz de concentrar o minério independentemente do tamanho da partícula, entretanto quanto menor a granulometria, menor é o desempenho, tendo menor recuperação mássica e

recuperação metalúrgica do MgO. Na separação magnética a seco realizada por Blentli (2017), a recuperação máxima de MgO, em torno de 60%, foi obtida na fração 3mm/500µm, com porcentagem de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> inferior a 1%.

**Tabela 5 – Influência da granulometria na separação magnética a seco**

	<b>1,00 mm/ 600 µm</b>	<b>600 µm / 300 µm</b>	<b>300 µm/ 150 µm</b>
<b>%</b>	<b>Concentrado</b>	<b>Concentrado</b>	<b>Concentrado</b>
<b>MgO</b>	91,24	90,22	89,86
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,52	0,62	0,63
<b>SiO<sub>2</sub></b>	5,00	5,64	5,67
<b>Rec. MgO</b>	70	64	61
<b>R. M.</b>	65	58	55

Fonte: (Próprio autor)

Legenda: Rec. = Recuperação Metalúrgica; R. M. = Recuperação Mássica

O separador magnético a seco, comparado ao separador a úmido, tem um circuito mais simples e não necessita da adição de água para compor uma polpa. Entretanto, a faixa granulometria a ser alimentada é restrita a partículas mais grossas, limitando o desempenho do método. Para trabalhar com partículas mais finas, o WHIMS é a melhor opção, com várias aplicações na indústria, especialmente para minério de ferro (MORAES, 2019)

Os resultados da separação magnética a úmido é apresentado na Tabela 6. A concentração do minério de magnesita foi um pouco inferior em relação a separação a seco, porém obteve maior recuperação mássica e recuperação metalúrgica de MgO, principalmente quando comparado a granulometria mais fina entre 300 a 150 µm, com recuperação metalúrgica do óxido de magnésio (MgO) de 69 % utilizando o campo magnético de 6000 Gauss. Entretanto, deve ser levado em consideração que os silicatos também possuem MgO na composição, por isso não é possível afirmar que o óxido de magnésio recuperado está presente somente no carbonato de magnésio. Praticamente nenhuma diferença foi observada entre os três campos magnéticos, assim a utilização do campo de 6000 Gauss é recomendada, reduzindo o consumo de energia.

A separação magnética a úmido de alta intensidade (WHIMS) realizada por Atasoy (2019) para a concentração de resíduos de minério de magnesita proveniente da Turquia obteve êxito utilizando campo magnético de 1,8 T (18000 Gauss). Após o processo WHIMS, o teor de

MgCO<sub>3</sub> foi de 91,03%, enquanto o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi de 0,38%, acompanhado de uma diminuição nos conteúdos de sílica e alumina.

Nos resultados dos dois métodos de separação magnética, o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no concentrado é muito baixo, assim podemos concluir que os silicatos restantes não são misturados nos grãos que contém ferro. Para remover os silicatos e aumentar o teor de MgO, será necessário outro método de concentração, e, considerando a granulometria fina, a flotação é a mais adequada.

**Tabela 6 – Influência da granulometria e do campo magnético na separação magnética a úmido**

<b>600 µm/300 µm</b>					
<b>Concentrado</b>					
<b>C. M</b>	<b>MgO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Rec. MgO</b>	<b>R. M.</b>
<b>Gauss</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>6.000</b>	86,55	1,09	8,44	68	64
<b>8.000</b>	88,38	0,84	6,98	61	57
<b>10.000</b>	88,57	0,77	6,78	63	59
<b>300 µm / 150 µm</b>					
<b>Concentrado</b>					
<b>C. M</b>	<b>MgO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Rec. MgO</b>	<b>R. M.</b>
<b>Gauss</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>6.000</b>	86,20	1,14	8,71	69	65
<b>8.000</b>	86,41	1,08	8,59	69	64
<b>10.000</b>	86,89	1,01	8,06	70	64

Fonte: (Próprio autor)

Legenda: C. M. = Campo Magnético; Rec.= Recuperação; R. M. = Recuperação Mássica

### 5.3 Flotação

#### 5.3.1 Microflotação

Os testes de microflotação tiveram caráter exploratório, visando analisar potenciais reagentes (coletor e depressor) para o resíduo do minério de magnesita, além de possíveis

potenciais hidrogeniônicos (pH) do meio, com o objetivo de serem utilizados na flotação em bancada.

Como o minério utilizado nesse trabalho possui alto teor de impurezas e o teste de microflotação deve ser feito com amostras minerais puras (RODRIGUES, 2011), a etapa de seleção de cor manual foi realizada, com objetivo de avaliar a flotabilidade em uma condição o mais próxima possível dos minerais puros. A Tabela 7 apresenta os resultados da análise química dos produtos dessa seleção. Pode-se observar que as partículas claras obtiveram 95,46 % de MgO, estando bem próxima ao mineral puro. Entretanto, não foi possível detectar nenhuma diferenciação na flotabilidade das partículas claras e escuras.

**Tabela 7 – Análise química das amostras do teste de microflotação em tubo de Hallimond**

<b>%</b>	<b>Partículas escuras</b>	<b>Partículas claras</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	45,98	1,02
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,66	0,15
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10,79	0,14
<b>MgO</b>	40,65	95,46
<b>CaO</b>	1,19	3,11

Fonte: (Próprio autor)

Assim, como direcionamento para os testes de flotação em bancada, alguns testes de microflotação foram selecionados, sendo seus resultados apresentados na Tabela 8. Esses testes foram selecionados, pois a porcentagem das massas dos concentrados está próxima a porcentagem de MgO presente nas partículas escuras, podendo inferir que esses testes obtiveram boa seletividade.

**Tabela 8 – Resultados de alguns testes de microflotação utilizando partículas escuras**

<b>Coletor (dosagem)</b>	<b>Depressor (dosagem)</b>	<b>pH</b>	<b>Massa concentrado (%)</b>	<b>Massa rejeito (%)</b>
A (240 g/T)	-	4	40	60
A (240 g/T)	C (300 g/T)	10	39	61
B (100 g/T)	D (1000 g/T)	4	41	59

Fonte: (Próprio autor)

### 5.3.2 Flotação em bancada

Os resultados dos testes de flotação em bancada estão apresentados na Tabela 9. A flotação direta não obteve bons resultados, pois a adsorção química do coletor A acontece com sítio  $Mg^{2+}$  (MORAES, 2019), que está presente tanto na magnesita quanto no silicato antigorita, portanto não foi observado nenhuma seletividade. Com o objetivo de aumentar a seletividade, foi utilizado o depressor C no teste 3 para deprimir os silicatos, entretanto esse fato não foi observado, uma vez que o sítio  $Mg^{2+}$  também tem preferência na adsorção com esse reagente (MORAES, 2019).

**Tabela 9 – Resultado dos testes de flotação em bancada**

	Al	Flotação direta						Flotação reversa			
		Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4		Teste 5	
		R	C	R	C	R	C	C	R	C	R
<b>MgO</b> %	89,19	89,23	86,54	89,48	88,48	89,57	88,63	90,98	34,34	89,99	59,90
<b>SiO<sub>2</sub></b> %	5,91	6,28	5,67	6,33	5,05	6,06	5,14	4,13	60,93	5,13	35,03
<b>T. C.</b> <b>Min</b>	-	18		4'30		11		8'10		5'30	
<b>Rec.</b> <b>MgO</b> %	100	99	1	71	29	60	40	99	1	98	2
<b>R.M.</b> %	100	94	6	71	29	73	27	98	2	98	2

Fonte: (Próprio autor)

Legenda: Al = Alimentação/ C = Concentrado/ R = Rejeito/ T.C.= Tempo de coleta/

Rec.= Recuperação Metalúrgica/ R. M. = Recuperação Mássica

Os resultados da flotação reversa, por sua vez, foram mais eficientes, obtendo concentração de MgO de 90,98% e sílica de 4,13% no teste 4. Além disso o tempo de coleta foi inferior em comparação a flotação direta. Apesar do coletor B ter apresentado ótima seletividade para a sílica, ele não é o melhor para flotar minerais do grupo da serpentina, sendo necessário o desenvolvimento de coletores mais adequados. O depressor D não se comportou de forma esperada, atuando como um floculante e prejudicando a seletividade da flotação.

No trabalho de Santana e Peres (2001), a flotação reversa do minério de magnesita obteve ótimos resultados, atingindo recuperação mássica de 92% e teor de SiO<sub>2</sub> inferior a 0,2% em base calcinada. Para isso, o amido de milho foi utilizado como depressor e a flotação realizada em pH neutro.

Além de ter sido mais eficiente, a flotação reversa é a mais indicada para o processo, como apresentado por Moraes (2017), pois a massa a ser flotada é menor, sendo que o minério alimentado tem em torno de 6% de silicatos. Portanto, é necessário o desenvolvimento de reagentes para obter um melhor coletor de silicatos do grupo da serpentina, tal como um depressor eficiente para o minério de magnesita, na flotação reversa. Com isso, o resíduo do minério de magnesita utilizado nesse trabalho poderá obter alto grau de concentração, retornando para a cadeia produtiva.

#### **5.4 Conceito para nova rota de processo**

Considerando os resultados, um conceito de uma rota de processamento para a recuperação do resíduo do minério de magnesita foi proposto, apresentado na Figura 22. O processamento é por via úmida, destinado a um material de granulometria fina. Essa rota consistiria em um estágio de peneiramento e moagem, reduzindo o tamanho das partículas menores que 200µm para as etapas de concentração, seguido pela deslamagem para retirada de partículas inferiores a 38 µm. A concentração seria realizada primeiramente em um separador magnético WHIMS, para a remoção do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e redução do teor de sílica, em seguida seria necessário um estágio de flotação reversa para a remoção do restante dos silicatos. O produto da flotação seria filtrado e aglomerado, para a formação dos briquetes, utilizado na alimentação dos fornos rotativos.

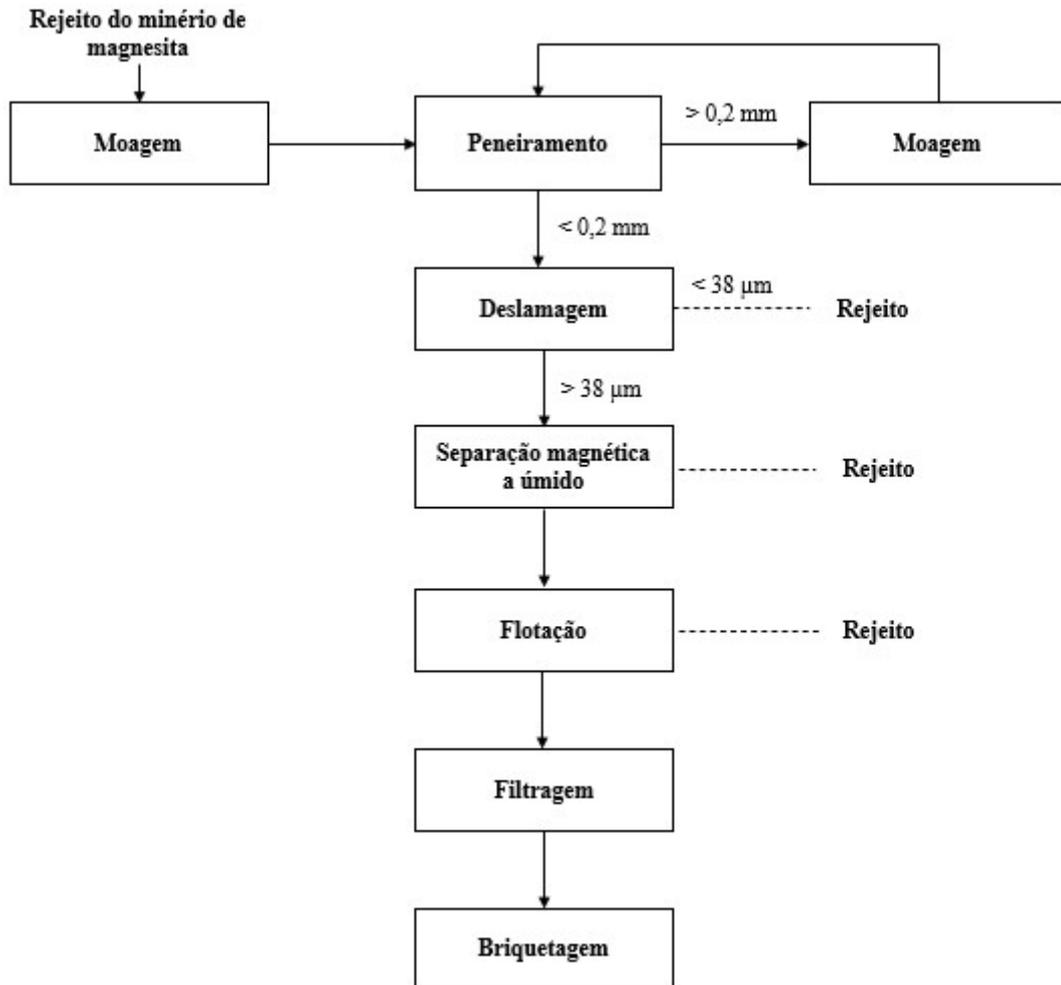
Hoje, o método de separação magnética de alta intensidade úmida (WHIMS) oferece potencial para maior pureza do produto e custo de operação e manutenção reduzidos em relação aos processos alternativos de seleção manual, seca, física, ou separação por gravidade. Introdução de separadores magnéticos na indústria de magnesita, para remover contaminantes paramagnéticos, melhorou a qualidade do produto e dobrou a porção útil do minério. O processo permite a extração de partículas superfinais (mesmo coloidais) que são apenas fracamente magnéticas de uma suspensão sólida / aquosa (ATASOY, 2019).

É necessário um estudo mais aprofundado e quantificado para avaliar os benefícios desse conceito proposto, testes adicionais devem ser realizados para validar a viabilidade técnica, estimar o custo do processo e dimensionar os equipamentos.

Essa rota tem como objetivo aumentar a recuperação do minério de magnesita, reduzindo o volume de resíduo e o custo de extração, uma vez que seria necessário menos minério para

produzir a mesma quantidade, prolongando a vida útil da mina. Além disso, esse novo processo proporcionaria maior flexibilidade para trabalhar com minérios mais pobres ou resíduo armazenados e obter um produto de alta qualidade (MORAES, 2019).

**Figura 22 – Rota de processamento conceitual para a recuperação do resíduo do minério de magnesita**



Fonte: (Próprio autor)

## 6. CONCLUSÃO

A amostra do resíduo do minério de magnesita criptocristalina estudada possui alto teor de impurezas, principalmente  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com 4,5 % e  $\text{SiO}_2$  com 22,5 %, além de uma granulometria fina entre 2 a 5mm. A magnesita foi a fase mineralógica dominante, seguida pelas fases antigorita e magnetita.

Dentre as duas técnicas analisadas de separação magnética, a separação a úmido utilizando o equipamento WHIMS obteve melhores resultados devido a maior recuperação mássica e recuperação metalúrgica de MgO em comparação a separação a seco, principalmente quando comparado a granulometria mais fina entre 300 a 150  $\mu\text{m}$ . Além disso, a técnica de separação a úmido é a melhor opção para trabalhar com partículas finas.

Com relação a técnica de flotação em bancada, a flotação reversa, utilizando o coletor aniônico B em pH 7, foi mais eficiente na remoção da sílica do que a flotação direta, com maior concentração de MgO em um tempo inferior. Entretanto, apesar do coletor B ter apresentado ótima seletividade para a sílica, ele não é o melhor para flotar minerais do grupo da serpentina, sendo necessário o desenvolvimento de coletores mais adequados, assim como depressores mais eficientes para o minério de magnesita, na flotação reversa. Tanto o depressor C, quanto o depressor D não foram eficientes.

Assim, foi definido um conceito de uma rota de processamento utilizando granulometria menores que 200 $\mu\text{m}$ , tamanho intermediário dentre a faixa mais fina utilizada nesse trabalho, seguido pela separação magnética a úmido, utilizando o equipamento WHIMS, para a remoção do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e redução do teor de sílica. Em seguida, o método de flotação reversa para a remoção do restante da sílica. O produto da flotação seria filtrado e briquetado, formando o sínter, utilizado na alimentação dos fornos rotativos.

Assim, o conceito de uma rota de processamento foi elaborado com o objetivo de obter alto grau de concentração da magnesita, tendo a possibilidade desse resíduo voltar a cadeia produtiva e ser utilizado como matéria-prima, especialmente na indústria refratária.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, P. Lima. **Síntese e caracterização da magnetita revestida por polímeros naturais (fucana e levana) para imobilização de enzimas.** Dissertação (Mestrado em Ciências de Materiais) - Pós-Graduação em Ciências de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

ARAÚJO, Armando Corrêa de et al. Revisitando as técnicas de avaliação de flotabilidade: Uma visão crítica. **XXI ENTMME**, Natal, novembro 2005.

ATASOY, Ahmet. **Hemijaska Industrija**, Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Applied Sciences of Sakarya, Sakarya, 2019. Disponível em: [http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0367-598X1900026A#.X6\\_WIs6SnIU](http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0367-598X1900026A#.X6_WIs6SnIU)

BENTLI, Ismail et al. Magnesite concentration technology and caustic– calcined product from Turkish magnesite middlings by calcination and magnetic separation. **Taylor e Francis Group: SEPARATION SCIENCE AND TECHNOLOGY**, Eskisehir, 19 jan. 2017.

BRANDÃO, Paulo R. G; POLING, George W. Anionic Flotation of Magnesite. **Canadian Metallurgical Quarterly**, Vol. 21, No. 3, p. 211-220. Canadá, 1982. DOI 10.1179/cmq.1982.21.3.211.

COSTA, Augusto C. M.; CORREIA, Danilo M. B. Magnesita. In: Rodrigues, A. F. da Silva. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009. p. 471 – 481.

GARCIA, Luís Rodrigues Armôa. **Caracterização mineralógica dos minérios de magnesita do conjunto mineiro Pedra Preta-Jatobá-Pomba (Serra das Éguas, Brumado, BA).** Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão. 2004. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

GONZAGA, Ligia Mara. **Separação Magnética a úmido de Minérios de Ferro Itabiríticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

HONORATO, Gustavo de Aguiar. Análise da mineralização de magnesita criptocristalina, em veios stockworks, hospedados em corpos ultramáficos da região de Brumado e Aracatuba-BA.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geologia) - Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

Italindústria. Separador magnético de tambor auto limpante. Disponível em: [www.ital.com.br/tambor-magnetico.html](http://www.ital.com.br/tambor-magnetico.html). Acesso em: 02 de dezembro. de 2020.

LIMA, Edilan Silva. **Nanopartículas de ferrita de zinco via modificação do método de coprecipitação: Estudo do glicerol como direcionador estrutural e morfológico**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais) Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

LUZ, Adão Benvindo. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: LUZ, Adão Benvindo et al (ed.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 1.

Magnesita S.A. - *Sínteres de periclásio de alta densidade produzidos a partir de magnesita brasileira*. Relatório interno, Contagem, 1992.

MARTINS, P. F. Fernandes. **Obtenção de sílica de elevada pureza a partir do rejeito de flotação de um minério itabirítico**. Tese (Doutorado - Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais. Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2016.

MASSONI, Paulo Rogério. **Determinação da concentração de elementos químicos potencialmente tóxicos em aerossóis presentes no interior de uma pequena indústria de fundição de metais, utilizando amostrador temporal e a técnica de fluorescência de raios X**. Tese (Doutorado – Programa de pós-graduação em Ciências. Área de concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear da Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MORAES, Matheus Naves. **Avaliação de Moagem em Circuito Aberto e com Peneira de Alta Frequência para Minério de Magnesita**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MORAES, Matheus Naves. *Process evaluation to recover Eskisehir tailings*. RHI Magnesita. Relatório interno, Contagem, 2019

OLIVEIRA, Amanda Carvalho de. **A importância da escolha racional do reagente regulador de pH em processos alcalinos de flotação**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Adolpho

Magalhães Baltar. 2016. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PEREIRA, H. M. T. Bastos. **Remoção de Biotita em Areias de Brita Utilizando Separador Magnético de Alta Intensidade a Seco**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PERES, Antônio Eduardo Clark *et al.* A Flotação como operação unitária no Tratamento de Minérios: Aspectos básicos da flotação. *In*: CHAVES, Arthur Pinto (org.). **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: A flotação no Brasil**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. v. 4. ISBN 9788579750717.

PETZOW, Gunter. **Metallographic Etching**: Techniques for metallography, ceramography, plastography. 2º edição. Noveltv: The Materials Information Society, 1999.

PIMENTA, Samuel Almeida. **Equipamentos de separação magnética – uma revisão**. Orientador: Professora Rísia Magriotis Papini. 2014. Monografia (Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RODRIGUES T. S. et al. Quantificação de arraste hidrodinâmico na microflotação. *In*: Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia, 24, 2011, Salvador.

SALA, Anna. Depósitos de magnesita do Ceará. Aula 9, Geologia Econômica, Universidade Federal do Ceará, 2016.

SAMPAIO, João Alves et al. Separação Magnética e Eletrostática. *In*: LUZ, Adão Benvindo da et al (ed.). **Tratamento de Minérios**. 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. cap. 8, p. 303-336. ISBN 8572271708.

SAMPAIO, J. A. et al. Ensaios de separação magnética e eletrostática. *In*: JOÃO ALVES, Sampaio et al (ed.). **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. cap. 18, ISBN 9788561121020.

SANTANA, A. N., PERES, A.E.C. Technical Reverse magnesite flotation. **Minerals Engineering**, volume 14, nº 1, p. 107-111, 2001.

SILVA, Amanda Luzia. **Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares. Área de concentração: Ciências das Radiações)

Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, Almeida Fernandes de Souza. **Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos**. Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares. 2010. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2010.

SPENCER, D.R.F. Basic Refractory Raw Materials. **Meeting of the Refractory Materials section**, London, 1971.

SVOBODA, J. et al. Recent developments in magnetic methods of material separation. **Minerals Engineering**, [S. l.], 2003.

ZACHMANN, D.W. et al. Cryptocrystalline magnesite. In: MÖLLER, Peter (ed.). **Monograph Series on Mineral Deposits**. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1989. v. 28, ISBN 978-3-443-12028-3.