



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**RAUL LIMA DA SILVA**

**ESTUDO DE FLOTAÇÃO DE GRAFITA EM ESCALA DE LABORATÓRIO**

**FORTALEZA**

**2019**

RAUL LIMA DA SILVA

ESTUDO DE FLOTAÇÃO DE GRAFITA EM ESCALA DE LABORATÓRIO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S583e Silva, Raul Lima da.  
Estudo de flotação de grafita em escala de laboratório / Raul Lima da Silva. – 2019.  
68 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.
1. Flotação. 2. Grafita. 3. Tratamento de minérios. I. Título.

CDD 669

---

RAUL LIMA DA SILVA

ESTUDO DE FLOTAÇÃO DE GRAFITA EM ESCALA DE LABORATÓRIO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

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

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Halisson de Souza Pinheiro  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

*À Gêrusa, Camila, Ana Paula e Eleonora.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ricardo Emílio, pela orientação, pelos ensinamentos, pela paciência e pela importante contribuição em minha vida acadêmica e profissional.

Aos membros da banca examinadora, professores Halisson Pinheiro e Jorge Luiz Cardoso, pela disponibilidade e pelas valiosas observações.

À empresa Mineração Lunar, por ter incentivado e possibilitado a realização deste estudo e por ter investido em minha formação profissional.

Ao Dinamérico Cavalcante, que foi crucial para o sucesso deste trabalho e por continuar trabalhando para o sucesso de futuros estudos na área.

Aos pesquisadores Rodrigo Oscar, José Aury de Aquino e Plínio Eduardo Praes pelos ensinamentos sobre o assunto e pela excelente orientação durante o treinamento em Belo Horizonte, possibilitando a realização deste estudo.

Ao Gildson da Silva, Diego Vilaça, Raíssa Gerken, Luiz Carlos, Antônio Furquim, Waldeyr e a todos os profissionais do Setor Mineral do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), pela ajuda, pela cordialidade e pelos valiosos ensinamentos.

À minha mãe, Maria Gerusa, pelo amor incondicional, pelo apoio, por ter me dado uma boa educação e por ser meu porto seguro.

À minha avó, Eleonora Cavalcante, por ser um exemplo de força, ternura e generosidade.

Às minhas irmãs, Ana Paula e Camila, pela grande contribuição que têm em minha personalidade, por acreditarem em mim e por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu pai, Paulo Roberto, pela vida.

Aos meus amigos Mateus Nogueira, Lorena França, Humberto Neto, Alice Araújo, Letícia Freires e Rayssa Ruiz, pelos momentos felizes, pelo apoio e pela amizade.

À minha amiga Ana Larissa, pelo apoio, pelas dicas na formatação deste trabalho, pelas caronas e pelos momentos compartilhados durante os anos da graduação.

Aos meus amigos Daniela Martins, Leonardo Herberts, Vanessa Nakasato, Jêniffer Arvelos e Paulo Diniz, pelos momentos compartilhados em um dos períodos mais especiais de nossas vidas.

A todos os meus familiares, amigos e conhecidos que, de uma forma ou de outra, me apoiaram nesta etapa tão importante da minha vida.

Muito obrigado!

*“...o que realmente importa no lápis não é a madeira ou sua forma exterior, mas o grafite que está dentro. Portanto, sempre cuide daquilo que acontece dentro de você.”*

*(Paulo Coelho)*

## RESUMO

A flotação é a técnica de concentração de minérios mais utilizada industrialmente. Ela se baseia em diferenças, naturais ou induzidas, nas propriedades de superfície das espécies minerais que se deseja separar. Um exemplo de mineral que responde muito bem à flotação, por ser um sólido naturalmente hidrofóbico, é a grafita, uma das formas alotrópicas do carbono, que possui propriedades refratárias, características lubrificantes e elevadas condutividades térmica e elétrica, sendo amplamente utilizada na fabricação de tijolos refratários, cadinhos, lubrificantes, lápis, etc. Neste trabalho, realizou-se um estudo de concentração, por flotação, em escala de laboratório, de uma amostra de minério de grafita. Primeiramente, britou-se a amostra, de aproximadamente 32,7 kg, abaixo de 3,35 mm e, após homogeneização em pilha longitudinal, separou-se amostras de 1,0 kg para realização dos testes. Em seguida, realizou-se as caracterizações granulométrica, mineralógica semiquantitativa e química de uma dessas amostras, indicando que o minério é composto majoritariamente pelos minerais grafita (C) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), com um teor de, aproximadamente, 17,8% de carbono grafítico e que 61,9% do minério e 71,3% da grafita encontram-se retidos em 80 malhas. Além disso, realizou-se testes para o estudo dos efeitos do tempo de moagem, da dosagem de querosene e da dosagem de espumante Flotanol D-25, sobre a flotação *rougher*. Com isso, determinou-se um tempo de moagem ideal de 7,5 minutos, uma dosagem de 200 g/t de querosene e de 100 g/t de espumante. Nessas condições, obteve-se um concentrado com um teor de 55,6% de carbono e uma recuperação de 95,3%, indicando a necessidade de etapas adicionais de remoagem e flotação *cleaner* com a finalidade de aumentar o teor de carbono grafítico no concentrado final. Assim, realizou-se três etapas sucessivas de remoagem e flotação *cleaner*, sendo as duas primeiras remoagens realizadas com uma carga moedora de bolas e a última com granalhas de aço. Finalmente, obteve-se um concentrado final com um teor de, aproximadamente, 91,6% de carbono e uma recuperação de 78,8%. Concluiu-se, portanto, que foi possível obter, em escala de laboratório, um concentrado final com um alto teor de carbono (acima de 90%), porém, uma baixa recuperação, indicando que, uma quantidade significativa de grafita não flotou, permanecendo nos rejeitos, juntamente com os minerais de ganga, dos testes de flotação.

**Palavras-chave:** Flotação. Grafita. Tratamento de minérios.

## ABSTRACT

Flotation is the most commonly used ore concentration technique in industry. It is based on natural or induced differences in the surface properties of mineral species to be separate. An example of mineral that responds very well to flotation, for being a naturally hydrophobic solid, is the graphite, one of the allotropic forms of carbon, which has good refractory properties, lubricant characteristics and high thermal and electrical conductivity, being widely used in the production of refractory bricks, crucibles, lubricants, pencils, etc. In the present work, a sample of graphite ore was analyzed in a concentration study, using a laboratory bench flotation test machine. Firstly, the 32.7 kg sample was crushed until the particle size was lower than 3.35 mm, homogenized in a longitudinal pile and divided into smaller samples of 1.0 kg for the tests. Then, the particle size distribution, semiquantitative mineralogical analysis and chemical characterization of one of these samples were performed, indicating that the ore is mostly composed by graphite (C) and quartz (SiO<sub>2</sub>), with a graphitic carbon content of approximately 17.8% and that 61.9% of the ore and 71.3% of the carbon content are retained on 80 mesh. Furthermore, tests to study the effects of grinding time and the kerosene and Flotanol D-25 frother dosages on *rougher* flotation were carried out. Therefore, it was observed an ideal grinding time of 7.5 minutes and a 200 g/t kerosene and 100 g/t frother dosages. Under these conditions, a concentrate with a 55.6% carbon content and a 95.3% recovery were obtained, indicating the need for additional steps of grinding and *cleaner* flotation in order to increase the graphitic carbon content in the final concentrate. Thus, three successive steps of grinding and *cleaner* flotation were carried out, being the first two grindings performed with ball charges and the last one with steel shots. Finally, a final concentrate was obtained presenting a carbon content of approximately 91.6% and 78.8% recovery. In conclusion, it was possible to obtain, in laboratory tests, a final concentrate with a high carbon content (above 90%) but a low recovery, which means that a significant amount of graphite has not floated, remaining in the flotation tailings, with the gangue minerals of the flotation tests.

**Keywords:** Flotation. Graphite. Mineral processing.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Britador de mandíbulas .....  | 15 |
| Figura 2 - Atração seletiva entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar .....                                       | 18 |
| Figura 3 - Célula de flotação por ar disperso.....   | 22 |
| Figura 4 - Coluna de flotação .....  | 23 |
| Figura 5 - Circuito de flotação.....   | 26 |
| Figura 6 - Ângulo de contato da grafita em função do pH.....   | 30 |
| Figura 7 - Recuperação da grafita em função do pH.....   | 30 |
| Figura 8 - Amostra recebida .....  | 31 |
| Figura 9 - Minério de grafita após ser reduzido abaixo de 3,35 mm.....   | 32 |
| Figura 10 - Pilha longitudinal homogeneizada disposta sobre bancada.....   | 32 |
| Figura 11 - Amostras de 1,0 kg após homogeneizadas e quarteadas.....   | 33 |
| Figura 12 - Vibrador de peneiras suspenso.....   | 34 |
| Figura 13 - Vibrador de peneiras utilizado na caracterização granulométrica .....                                    | 34 |
| Figura 14 - Balança analítica .....  | 35 |
| Figura 15 - Forno utilizado no teste de perda ao fogo (a) após queima a 600 °C e (b) após queima a 960 °C .....      | 36 |
| Figura 16 - Célula de flotação de bancada Brastorno.....   | 37 |
| Figura 17 - Moinho 8" x 12" .....  | 38 |
| Figura 18 - Concentrado <i>rougher</i> sendo introduzido no moinho de bolas para a remoagem ..                       | 41 |
| Figura 19 - Concentrado final.....   | 42 |
| Figura 20 - Distribuição de massa e de carbono em função do tamanho das partículas .....                             | 44 |
| Figura 21 – DRX da análise mineralógica semiquantitativa da amostra da alimentação.....                              | 45 |
| Figura 22 - Efeito do tempo de moagem sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado <i>rougher</i> .....      | 46 |
| Figura 23 - Efeito da dosagem de querosene sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado <i>rougher</i> ..... | 48 |
| Figura 24 - Efeito da dosagem de espumante sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado <i>rougher</i> ..... | 49 |
| Figura 25 - Balanço de massa da flotação de grafita em escala de laboratório.....                                    | 53 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Reserva e produção mundial de grafita .....  | 27 |
| Tabela 2 - Carga de barras utilizada nos testes de moagem .....   | 38 |
| Tabela 3 - Condições dos testes para o estudo do efeito do tempo de moagem.....                                     | 39 |
| Tabela 4 - Condições dos testes para o estudo do efeito da dosagem de querosene .....                               | 40 |
| Tabela 5 - Condições dos testes para o estudo do efeito da dosagem de espumante.....                                | 40 |
| Tabela 6 - Análise granulométrica com teor e distribuição de carbono da amostra .....                               | 43 |
| Tabela 7 - Efeito do tempo de moagem sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado <i>rougher</i> .....      | 46 |
| Tabela 8 - Efeito da dosagem de querosene sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado <i>rougher</i> ..... | 47 |
| Tabela 9 - Efeito da dosagem de espumante sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado <i>rougher</i> ..... | 48 |
| Tabela 10 - Condições para a flotação <i>rougher</i> do teste TR-10 .....   | 50 |
| Tabela 11 - Condições para a flotação <i>cleaner I</i> do teste TR-10.....  | 51 |
| Tabela 12 - Condições para a flotação <i>cleaner II</i> do teste TR-10 .....  | 51 |
| Tabela 13 - Condições para a flotação <i>cleaner III</i> do teste TR-10 .....                                       | 52 |

## SUMÁRIO

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                        | 12 |
| <b>1.1</b>   | <b>Objetivo geral</b> .....                    | 12 |
| <b>1.2</b>   | <b>Objetivos específicos</b> .....             | 12 |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....             | 14 |
| <b>2.1</b>   | <b>Tratamento de minérios</b> .....            | 14 |
| <b>2.1.1</b> | <b>Cominuição</b> .....                        | 14 |
| 2.1.1.1      | <i>Britagem</i> .....                          | 14 |
| 2.1.1.2      | <i>Moagem</i> .....                            | 15 |
| <b>2.1.2</b> | <b>Classificação por tamanho</b> .....         | 16 |
| <b>2.1.3</b> | <b>Concentração</b> .....                      | 16 |
| <b>2.2</b>   | <b>Flotação</b> .....                          | 17 |
| <b>2.2.1</b> | <b>Hidrofobicidade e hidrofiliçidade</b> ..... | 17 |
| <b>2.2.2</b> | <b>Princípios da Flotação</b> .....            | 19 |
| <b>2.2.3</b> | <b>Reagentes</b> .....                         | 20 |
| 2.2.3.1      | <i>Coletores</i> .....                         | 20 |
| 2.2.3.2      | <i>Espumantes</i> .....                        | 20 |
| 2.2.3.3      | <i>Depressores</i> .....                       | 21 |
| 2.2.3.4      | <i>Ativadores</i> .....                        | 21 |
| 2.2.3.5      | <i>Reguladores de pH</i> .....                 | 21 |
| 2.2.3.6      | <i>Dispersantes</i> .....                      | 21 |
| <b>2.2.4</b> | <b>Máquinas de Flotação</b> .....              | 22 |
| 2.2.4.1      | <i>Células mecânicas</i> .....                 | 22 |
| 2.2.4.2      | <i>Colunas de flotação</i> .....               | 23 |
| <b>2.2.5</b> | <b>Etapas da Flotação</b> .....                | 24 |
| 2.2.5.1      | <i>Condicionamento</i> .....                   | 24 |
| 2.2.5.2      | <i>Aeração</i> .....                           | 24 |
| 2.2.5.3      | <i>Transporte para a superfície</i> .....      | 25 |
| <b>2.2.6</b> | <b>Circuitos de Beneficiamento</b> .....       | 25 |
| <b>2.3</b>   | <b>Grafita</b> .....                           | 26 |
| <b>2.3.1</b> | <b>Mineralogia</b> .....                       | 27 |
| <b>2.3.2</b> | <b>Formas comerciais da grafita</b> .....      | 28 |
| 2.3.2.1      | <i>Grafita em flocos</i> .....                 | 28 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.3.2.2 | <i>Grafita em veios cristalinos</i> .....                               | 28 |
| 2.3.2.3 | <i>Grafita microcristalina</i> .....                                    | 28 |
| 2.3.3   | <i>Processamento do minério de grafita</i> .....                        | 29 |
| 2.3.4   | <i>Flotabilidade da grafita</i> .....                                   | 29 |
| 3       | <b>METODOLOGIA</b> .....  | 31 |
| 3.1     | <b>Preparação das amostras</b> .....                                    | 31 |
| 3.2     | <b>Caracterização das amostras</b> .....                                | 33 |
| 3.2.1   | <i>Caracterização granulométrica</i> .....                              | 33 |
| 3.2.2   | <i>Caracterização química</i> .....                                     | 35 |
| 3.2.3   | <i>Caracterização mineralógica semiquantitativa</i> .....               | 36 |
| 3.3     | <b>Testes de flotação rougher</b> .....                                 | 37 |
| 3.3.1   | <i>Efeito do tempo de moagem</i> .....                                  | 39 |
| 3.3.2   | <i>Efeito da dosagem de querosene</i> .....                             | 39 |
| 3.3.3   | <i>Efeito da dosagem de espumante Flotanol D-25</i> .....               | 40 |
| 3.4     | <b>Testes de flotação cleaner</b> .....                                 | 40 |
| 3.4.1   | <i>Flotação cleaner I</i> .....   | 40 |
| 3.4.2   | <i>Flotação cleaner II</i> .....  | 41 |
| 3.4.3   | <i>Flotação cleaner III</i> .....                                       | 42 |
| 4       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                     | 43 |
| 4.1     | <b>Caracterização química</b> .....                                     | 43 |
| 4.2     | <b>Caracterização granulométrica</b> .....                              | 43 |
| 4.3     | <b>Caracterização mineralógica semiquantitativa</b> .....               | 44 |
| 4.4     | <b>Efeito do tempo de moagem</b> .....                                  | 45 |
| 4.5     | <b>Efeito da dosagem de querosene</b> .....                             | 47 |
| 4.6     | <b>Efeito da dosagem de espumante Flotanol D-25</b> .....               | 48 |
| 4.7     | <b>Teste final</b> .....  | 49 |
| 4.7.1   | <i>Flotação rougher</i> .....   | 49 |
| 4.7.2   | <i>Flotação cleaner I</i> .....   | 50 |
| 4.7.3   | <i>Flotação cleaner II</i> .....  | 51 |
| 4.7.4   | <i>Flotação cleaner III</i> .....                                       | 51 |
| 5       | <b>CONCLUSÃO</b> .....  | 54 |
|         | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 55 |
|         | <b>APÊNDICE A – CONDIÇÕES E RESULTADOS DOS TESTES DE FLOTAÇÃO</b> ..... | 58 |

## 1 INTRODUÇÃO

No tratamento de minérios, a flotação é a técnica de concentração mais utilizada industrialmente. Ela é usada para separar os minerais de interesse (minerais minério) dos minerais de ganga (contaminantes), que compõem vários minérios encontrados na natureza. No caso da flotação, a separação ocorre por diferenças na molhabilidade das superfícies dos minerais quando em uma suspensão em água, chamada polpa, e aerada com bolhas de ar, que carregam as partículas dos minerais naturalmente hidrofóbicos ou hidrofobizados para a superfície da polpa, formando uma espuma, enquanto as partículas dos minerais hidrofílicos permanecem em suspensão (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

Um exemplo de mineral que responde muito bem à flotação é a grafita, uma das formas alotrópicas do carbono, por ser um mineral naturalmente hidrofóbico. Além disso, a grafita encontra muitas aplicações industriais por possuir boas propriedades refratárias, elevadas condutividades térmica e elétrica, características lubrificantes e inércia química. Ela é aplicada principalmente na indústria do aço, na produção de tijolos refratários para revestimento de fornos, na indústria de fundição, na produção de cadinhos, na produção de lubrificantes, na fabricação de lápis, etc. (SAMPAIO; BRAGA; DUTRA, 2008).

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2019), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de grafita, atrás apenas da China e da Índia. Os estados com maior ocorrência de grafita são Minas Gerais, Bahia e Ceará.

### 1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de um estudo de concentração da grafita, em escala de laboratório, por meio da flotação, de modo a fornecer informações a respeito do teor e recuperação de carbono grafítico em um circuito de beneficiamento com estágios de flotação *rougher* e *cleaner*.

### 1.2 Objetivos específicos

Além do estudo de concentração propriamente dito, objetiva-se:

- Realizar a caracterização granulométrica da amostra e determinar o teor de carbono grafítico para cada fração granulométrica.

- Realizar a análise química de amostra da alimentação, para a determinação do teor de carbono grafítico.
- Determinar, através de análise mineralógica semiquantitativa, os minerais que compõem a amostra em estudo.
- Estudar os efeitos do tempo de moagem, da dosagem de querosene e do espumante Flotanol D-25, sobre a flotação *rougher*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tratamento de minérios

O tratamento ou beneficiamento de minérios pode ser definido como um conjunto de operações a que são submetidos minérios, minerais e rochas, com o objetivo de separar os minerais de interesse (valiosos), em um produto denominado concentrado, dos minerais de ganga (contaminantes) (LUZ; LINS, 2018).

Os minerais valiosos, separados no concentrado, podem ter suas propriedades físicas e características químicas melhoradas até estarem adequados às exigências dos setores industriais que os empregam. Para isso, são submetidos a operações de cominuição (britagem e moagem), classificação por tamanho (peneiramento, classificação em meio fluido), concentração física (métodos gravíticos, métodos magnéticos e flotação) e separação sólido-líquido (espessamento, filtração e secagem) (MORAIS; ALBUQUERQUE; LADEIRA, 2014).

#### 2.1.1 Cominuição

A primeira etapa do beneficiamento de minérios é a cominuição. Nela, o minério lavrado, também chamado de ROM (*run-of-mine*), é submetido a operações de britagem e moagem, sendo a primeira para granulometrias maiores (do metro ao centímetro) e a segunda para granulometrias menores (do centímetro ao micrômetro). O objetivo dessas operações é gerar produtos que atendam a especificações para liberação de minerais, aumento de área específica, adequação para transporte ou mesmo comercialização direta (SAMPAIO; DELBONI JÚNIOR, 2018).

Os mecanismos de redução do tamanho das partículas são diferentes na britagem e na moagem. Na britagem a redução ocorre devido, principalmente, a forças de compressão e impacto, enquanto na moagem, as forças de atrito são muito maiores, além das forças de impacto (GUPTA; YAN, 2016).

##### 2.1.1.1 Britagem

A britagem é a etapa onde ocorre a fragmentação de blocos de minérios, em equipamentos mecânicos, com o objetivo de liberar os minerais úteis de sua ganga e adequar a

sua granulometria para a próxima etapa ou para a sua aplicação direta. Um exemplo muito comum de equipamento utilizado na etapa de britagem é o britador de mandíbulas (Figura 1). Nele, a fragmentação ocorre quando o minério alimentado na sua abertura, composta por uma mandíbula móvel e outra fixa, sofre esforços, principalmente compressivos, devido aos movimentos de aproximação e afastamento das mandíbulas (LUZ; ALMEIDA; BRAGA, 2018).

Figura 1 - Britador de mandíbulas



Fonte: elaborada pelo autor.

#### *2.1.1.2 Moagem*

A moagem é a última etapa da cominuição e onde ocorre maior gasto de energia. Seu principal objetivo é reduzir o tamanho das partículas de minério até a liberação completa do mineral de interesse de sua ganga. O tamanho ideal das partículas moídas depende do minério que está sendo processado, de como o mineral de interesse está distribuído na ganga, do processo de concentração que será utilizado posteriormente, entre outros fatores. Os principais equipamentos utilizados na moagem são moinhos de carga cadente: moinhos de barras, bolas e seixos. Também são utilizados moinhos de martelos, vibratórios, de discos, de impacto de partículas, entre outros (CHAVES; PERES, 2003).

Em alguns casos, o tamanho das partículas moídas é maior do que o tamanho ótimo que se deseja alcançar. Neste caso, diz-se que ocorreu uma submoagem. Ela se caracteriza pela liberação incompleta do mineral útil, podendo inviabilizar o processo de concentração. Por outro lado, um evento também indesejável é a sobremoagem. Quando ela ocorre, observa-se que o tamanho das partículas moídas é menor do que o tamanho ótimo à liberação do mineral de interesse. Uma consequência da sobremoagem é o desperdício de energia, já que uma parte dela foi utilizada para reduzir desnecessariamente a granulometria do minério (LUZ; ALMEIDA; BRAGA, 2018).

### **2.1.2 Classificação por tamanho**

De acordo com Correia e Couto (2018) as etapas de classificação por tamanho compreendem operações de peneiramento e classificação em meio fluido e têm o objetivo de ajustar a granulometria do minério para a etapa de concentração.

No caso do peneiramento, ocorre a separação de um material em duas partes: uma maior, denominada *oversize*, que fica retida na tela da peneira, e uma menor, passante, denominada *undersize*. As faixas de tamanhos das partículas são determinadas por um conjunto de peneiras com aberturas diferentes, mas relacionadas entre si de acordo com o tipo de escala adotada. Por exemplo: a abertura das peneiras, para as escalas Tyler e Richards, está relacionada ao número de malhas (*mesh*), que representa o número de aberturas com o mesmo tamanho que cabem no comprimento de uma polegada (25,4 mm) (CORREIA; COUTO, 2018).

### **2.1.3 Concentração**

Após as etapas de cominuição e classificação por tamanho, ocorre a concentração. Exemplos de operações de concentração utilizadas em tecnologia mineral são: a gravimetria, a separação magnética e a flotação, sendo esta última considerada o principal processo utilizado na indústria mineral, tanto em quantidade de minérios processados quanto em diversidade de aplicações (LUZ; LINS, 2018).

O objetivo principal desta etapa é separar os minerais de interesse (valiosos) dos minerais de ganga (contaminantes) que compõem o minério. Esta separação ocorre pela diferença em alguma propriedade dos minerais que se deseja separar, seja esta a cor, o brilho,

o tamanho, a forma, a densidade, a susceptibilidade magnética ou propriedades de superfície (MORAIS; ALBUQUERQUE; LADEIRA, 2014).

## **2.2 Flotação**

A flotação é o processo de concentração mais importante utilizado em tecnologia mineral e leva em conta diferenças nas propriedades superficiais das espécies minerais que se deseja separar. Essas diferenças se dão na capacidade de algumas espécies minerais se prenderem a bolhas de um gás (geralmente ar) quando em uma suspensão em água (polpa). Ao capturar essas bolhas, a densidade do conjunto bolhas-partícula, em um dado momento, se tornará menor que a do fluido e tomará uma direção ascendente, formando uma espuma sobre a polpa, onde pode ser removida (WILLS; FINCH, 2015).

Segundo Chaves, Leal Filho e Braga (2018), a flotação por espumas pode ser classificada como:

Direta: quando os minerais de interesse são coletados na espuma e os minerais de ganga (indesejados) permanecem na polpa. Exemplos: flotação de minérios de cobre, chumbo e zinco;

Reversa: quando os minerais de interesse permanecem na polpa e os minerais de ganga são coletados na espuma. Exemplo: flotação de minério de ferro;

Coletiva: quando um grupo de minerais com características comuns são flotados em conjunto.

Seletiva ou diferencial: quando uma única espécie mineral é flotada.

Instantânea: quando a flotação é realizada logo após a moagem, em intervalos de tempo curtos.

### ***2.2.1 Hidrofobicidade e hidrofiliabilidade***

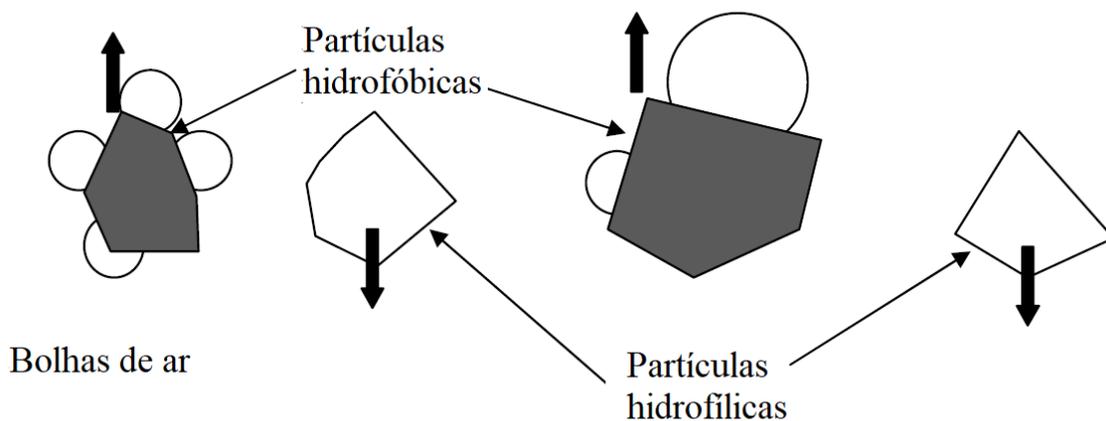
A hidrofobicidade de uma espécie mineral, exprime a tendência desta espécie ter mais afinidade com a fase gasosa que com a fase líquida. Quanto mais hidrofóbico for um mineral, maior a sua repelência por água e outras substâncias polares e maior a sua afinidade por substâncias apolares, como o ar, por exemplo. Poucas espécies minerais são naturalmente hidrofóbicas. É o caso da molibdenita, do talco, do carvão, do enxofre e da grafita (FUERSTENAU; MILLER; KUHN, 1985).

A hidrofiliçidade, no entanto, é o oposto da hidrofobicidade. Ela representa a tendência de uma espécie mineral ter mais afinidade com a fase líquida do que com a fase gasosa. Quanto mais hidrofílico for um mineral, maior será a sua atração pela água e maior a molhabilidade da sua superfície. Este é o caso da maioria dos minerais (FUERSTENAU; MILLER; KUHN, 1985).

O caráter hidrofóbico ou hidrofílico das espécies minerais pode ser alterado significativamente pela adição de algumas substâncias. Em uma polpa contendo duas espécies minerais, por exemplo, pode-se induzir, através da adição de um reagente, um caráter hidrofóbico em apenas uma delas, permanecendo a outra inalterada e possibilitando a separação (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

Na flotação por espumas, os minerais de interesse devidamente hidrofobizados, dispersos na polpa, são coletados pelas bolhas de ar e são carregados para a superfície da polpa enquanto as espécies minerais hidrofílicas permanecem na polpa seguindo o fluxo do fluido, como mostrado, esquematicamente, na Figura 2. O mineral coletado forma, portanto, uma camada de espuma sobre a polpa e é removido mecanicamente ou por transbordo (KAWATRA, 2011).

Figura 2 - Atração seletiva entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar



Fonte: Kawatra (2011, com adaptações).

### 2.2.2 Princípios da Flotação

A flotação explora diferenças na molhabilidade, característica relacionada à energia livre resultante de processos de quebra (principalmente da moagem), das superfícies dos minerais que se deseja separar, inclusive, modificando-a (BALTAR, 2018).

Segundo Baltar (2008) a quebra de ligações fortes, como as ligações covalentes, pode resultar na formação de uma superfície com energia livre alta e, portanto, de caráter polar. Por outro lado, superfícies geradas pela quebra de ligações moleculares, mais fracas, têm caráter apolar. Como as moléculas de água apresentam um dipolo permanente, minerais com superfícies polares em suspensão, possuem caráter hidrofílico e tendem a permanecer dispersos na fase líquida, enquanto as espécies minerais com superfícies apolares apresentam caráter hidrofóbico e tendem a interagir com as bolhas de ar, constituído majoritariamente por moléculas apolares (principalmente  $N_2$  e  $O_2$ ). Um exemplo de mineral com superfície polar é o quartzo ( $SiO_2$ ) e com superfície apolar, a grafita (C).

No processo de flotação, observa-se a presença das três fases: a sólida (mistura de minerais), a líquida (água) e a gasosa (bolhas de ar) e a interação de variáveis químicas e físicas. As variáveis químicas são responsáveis pelo controle do caráter hidrofóbico/hidrofílico das espécies minerais e as variáveis físicas resultam das características dos minérios (tamanho das partículas e composição) e de características de operação (tamanho das bolhas e taxa de alimentação) (WILLS; FINCH, 2015).

A interface sólido-líquido é representada pela superfície dos minerais em contato com a água. Nessa interface ocorre a adsorção de reagentes e a formação da dupla camada elétrica (DCE) (BALTAR, 2008).

A interface sólido-gás se forma com a interação das espécies minerais com as bolhas de gás. A flotação, portanto, deve ocorrer de modo a facilitar as colisões entre bolhas e partículas, que resultem na adesão de uma à outra, formando um conjunto partícula-bolha que irá tomar um rumo ascendente quando a sua densidade se tornar menor do que a do fluido (BALTAR, 2018).

Na interface líquido-gás, ou seja, entre a água e as bolhas de ar, tem-se uma tensão superficial que pode provocar a quebra das bolhas, impedindo o transporte das partículas dos minerais hidrofobizados e inviabilizando a separação dos minerais. Portanto, deve-se adicionar um reagente, denominado espumante, que possui a capacidade de formar filmes finos e bidimensionais nessa interface, reduzindo a tensão superficial e possibilitando a flotação (BALTAR, 2018).

### **2.2.3 Reagentes**

Como o número de minerais naturalmente hidrofóbicos e flotáveis é muito restrito, é necessária a aplicação de reagentes para modificar seletivamente as características das superfícies dos minerais que se deseja recuperar. Devido ao grande número de reagentes (e combinações destes) que podem ser utilizados, a flotação se torna uma técnica de vasta aplicação industrial (MATIS, 1994).

Segundo Matis (1994) os reagentes utilizados na flotação podem ser divididos em: coletores, espumantes e modificadores (ativadores, depressores, reguladores de pH e dispersantes).

#### **2.2.3.1 Coletores**

Coletores são reagentes utilizados na flotação para tornar hidrofóbica a superfície das espécies minerais que se deseja flotar. Para que isso ocorra, a molécula da substância coletora deve migrar do seio da solução e adsorver-se na superfície do mineral (SILVA, 2005).

O coletor possui, em sua estrutura, uma parte polar, ionizada em solução, e uma parte apolar, que possui mais afinidade com as bolhas de ar. Devido a presença da interface sólido-gás na flotação, a molécula do coletor tenderá a migrar para essa interface e irá se posicionar de modo que a parte apolar irá interagir com as bolhas de gás e a parte polar irá entrar em contato com a água. No caso da flotação de sólidos naturalmente hidrofóbicos, como a grafita, são utilizados reagentes reforçadores de coleta, que são constituídos, geralmente, por hidrocarbonetos líquidos, como o querosene (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

#### **2.2.3.2 Espumantes**

A qualidade da espuma é muito importante para o sucesso da flotação. Esta deve ser estável, consistente e adequada às finalidades do processo. Para isso, adiciona-se um reagente tensoativo denominado espumante (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

Espumantes são substâncias surfactantes, assim como os coletores, mas que se concentram na interface líquido-gás, diminuindo a tensão superficial e possibilitando a formação de bolhas estáveis com diâmetro pequeno. A redução no diâmetro das bolhas aumenta a área superficial das mesmas, aumentando a taxa de colisões, melhorando a

flotação. Além disso, a redução na velocidade de ascensão das bolhas causada pelo espumante, aumenta o tempo de residência destas na polpa e também melhora a cinética da flotação (WILLS; FINCH, 2015).

#### *2.2.3.3 Depressores*

Quando o coletor é muito energético, tende a recobrir indiferentemente a superfície de vários minerais presentes na polpa. Para isso, pode-se adicionar uma substância auxiliar denominada depressor. Depressores são substâncias que tornam a ação do coletor mais seletiva, ou seja, fazem com que ele recubra apenas a superfície do mineral que se deseja flotar, deixando inalteradas as superfícies das outras espécies minerais presentes na polpa (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

#### *2.2.3.4 Ativadores*

Quando o coletor não adsorve em nenhuma das espécies minerais presentes na polpa, pode-se adicionar uma substância denominada ativador. Ativadores são substâncias auxiliares que tornam a superfície do mineral que se deseja flotar mais atrativa para o coletor (KAWATRA, 2011).

#### *2.2.3.5 Reguladores de pH*

O pH da polpa é uma variável muito importante, pois afeta diretamente a coleta. Em geral, minerais desenvolvem uma carga superficial positiva quando em meio ácido e uma carga superficial negativa quando em meio básico. Quanto antes forem adicionados ao circuito de beneficiamento, melhor. Exemplos de reguladores de pH utilizados na flotação, são: barrilha, soda cáustica, cal, ácido sulfúrico, entre outros (WILLS; FINCH, 2015).

#### *2.2.3.6 Dispersantes*

Segundo Wills e Flinch (2015), a presença de partículas dispersas é melhor para a seletividade da flotação do que um sistema de partículas agregadas. Os dispersantes são substâncias capazes de individualizar as partículas minerais agregadas a serem separadas, ou seja, aumentam a repulsão entre as partículas.

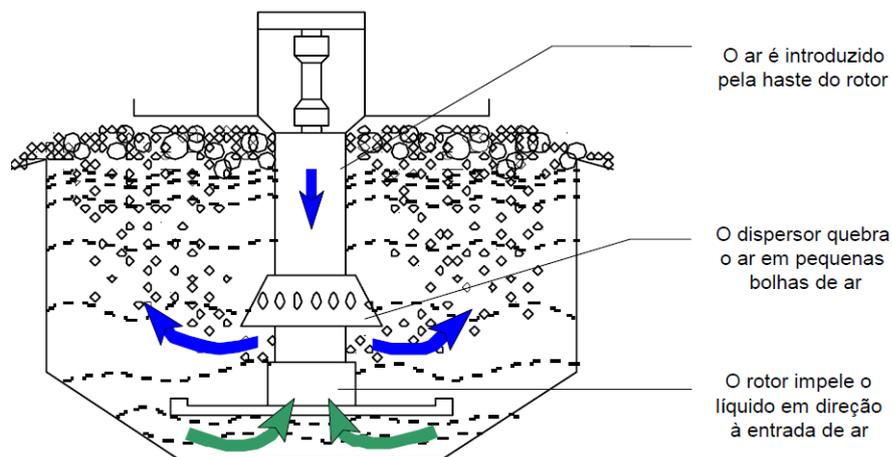
Os dispersantes são utilizados principalmente em circuitos com grandes quantidades de finos e lamas. São exemplos de dispersantes: metassilicato de sódio, metafosfato de sódio, poliacrilato de sódio e a carboxil metil celulose (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

## 2.2.4 Máquinas de Flotação

### 2.2.4.1 Células mecânicas

A flotação convencional é realizada nas chamadas máquinas de flotação que são constituídas de unidades denominadas células mecânicas de flotação, representadas esquematicamente na Figura 3. Nelas, é realizada a agitação da polpa, de modo a manter as espécies minerais em suspensão, e a introdução do ar (aeração), na forma de bolhas de pequenos diâmetros, necessárias para o transporte das partículas dos minerais de interesse (BALTAR, 2008).

Figura 3 - Célula de flotação por ar disperso



Fonte: Engenovo (2014, p. 3).

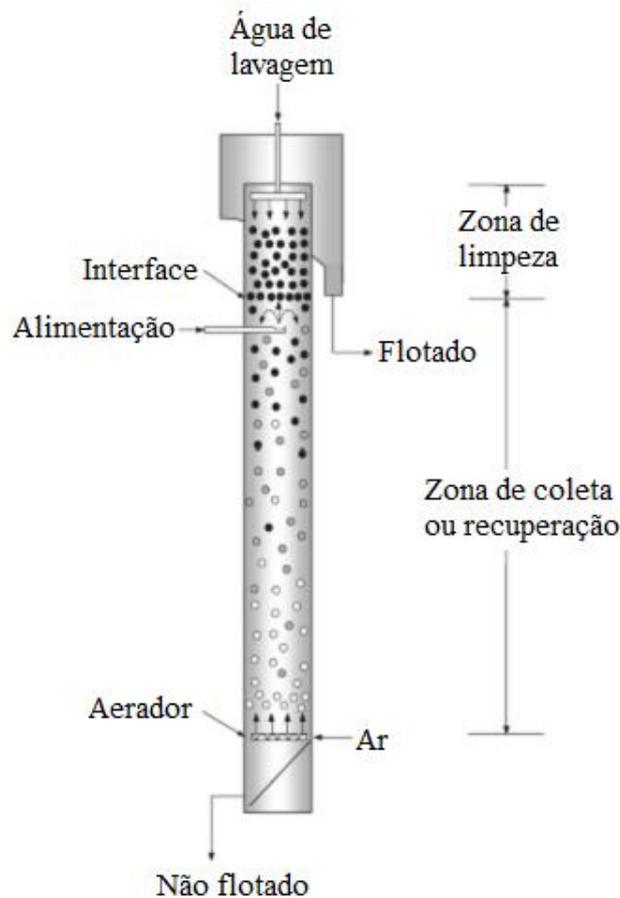
A célula de flotação mecânica é composta por um rotor que fica no fundo da célula e gira dentro de um tubo concêntrico e/ou estator. A função do rotor é manter a polpa agitada. O movimento do rotor gera uma região de pressão negativa que faz o ar ser aspirado através do tubo coaxial ao eixo do rotor. Em outros casos, o ar pode ser diretamente injetado para dentro da célula (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

Para que as bolhas tenham tamanhos suficientemente pequenos, ideais para a flotação, instala-se em torno do rotor um componente chamado dispersor, que tem a função de fragmentar as bolhas de ar (BALTAR, 2008).

#### 2.2.4.2 Colunas de flotação

As colunas de flotação foram desenvolvidas no início dos anos 1960 e começaram a ser utilizadas industrialmente nos anos 1980, para substituir as células mecânicas. Desde então, a flotação em colunas vem sendo utilizada na concentração de vários tipos de minérios, apresentando resultados superiores aos das células mecânicas, tanto na qualidade dos produtos quanto na diminuição de custos operacionais (AQUINO; OLIVEIRA; FERNANDES, 2018).

Figura 4 - Coluna de flotação



Fonte: Moraes, Albuquerque e Ladeira (2014, com adaptações).

As colunas têm de 9 a 15 metros de altura e diâmetros que variam entre 0,5 e 5,0 metros, com diferentes capacidades. Na Figura 4, tem-se a representação esquemática de uma

coluna de flotação. Pode-se observar duas zonas distintas. A primeira é a zona de coleta ou recuperação, localizada entre o aerador e a interface polpa-espuma, onde é realizado o contato entre as bolhas de ar e as partículas hidrofóbicas a serem coletadas. A segunda é a zona de limpeza, que está localizada entre a interface polpa-espuma e o transbordo do material flotado, onde a espuma mineralizada é lavada com água para a remoção de partículas hidrofílicas que foram arrastadas (MORAIS; ALBUQUERQUE; LADEIRA, 2014).

Em uma coluna, a polpa previamente condicionada é alimentada, juntamente com os reagentes necessários, a uma altura de, aproximadamente, dois terços da altura total da coluna de flotação. As bolhas de ar são geradas na parte de baixo da coluna e tomam um rumo ascendente, interagindo com as partículas das espécies minerais a serem separadas. As partículas dos minerais hidrofóbicos coletados pelas bolhas formam uma espuma na parte superior da coluna. Essa espuma é lavada com água, introduzida no topo da coluna, para a retirada de partículas de minerais hidrofílicos que podem ter sido arrastadas. Finalmente, a fração flotada é retirada por transbordo, na parte superior da coluna, enquanto a fração não flotada, formada pelas espécies hidrofílicas, saem pela base da coluna (AQUINO; OLIVEIRA; FERNANDES, 2018).

### ***2.2.5 Etapas da Flotação***

#### *2.2.5.1 Condicionamento*

O condicionamento é uma operação realizada antes da flotação propriamente dita e é a etapa onde os reagentes são colocados em contato com a polpa, com alto teor de sólidos, para que suas moléculas possam entrar em contato com as partículas das espécies minerais que se deseja coletar, deprimir ou ativar. É necessário um alto teor de sólidos pois isso aumenta a probabilidade do contato entre reagentes e partículas minerais (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018).

#### *2.2.5.2 Aeração*

Após a etapa de condicionamento, tem-se a aeração da polpa, ou seja, a introdução de microbolhas de ar. Nessa etapa, ocorre a interação entre as bolhas e as partículas dos minerais de interesse devidamente hidrofobizados pelo coletor. As colisões entre bolhas e partículas devem ser suficientes para formar um aglomerado partícula-bolhas com densidade menor que a do fluido para que possa ser separado dos minerais hidrofílicos.

No entanto, nem todas as colisões resultam em flotação, estando limitadas às partículas hidrofobizadas que, por sua vez, dependem da seletividade do processo e, conseqüentemente, do teor dos minerais de interesse (BALTAR, 2008).

### 2.2.5.3 Transporte para a superfície

Ainda segundo Baltar (2008), após a adesão das bolhas de ar às partículas hidrofóbicas, ocorre o transporte do conjunto partícula-bolhas para a superfície da polpa para a formação da espuma. Para isso, a densidade do conjunto deve ser menor que a densidade do fluido, ou seja, o empuxo do conjunto deve superar o peso da partícula. Além disso, o conjunto partícula-bolhas deve resistir à agitação da polpa, ou seja, a força de adesão entre as bolhas não pode ser superada, o que causaria a destruição do conjunto e, conseqüentemente, a não flotação da partícula.

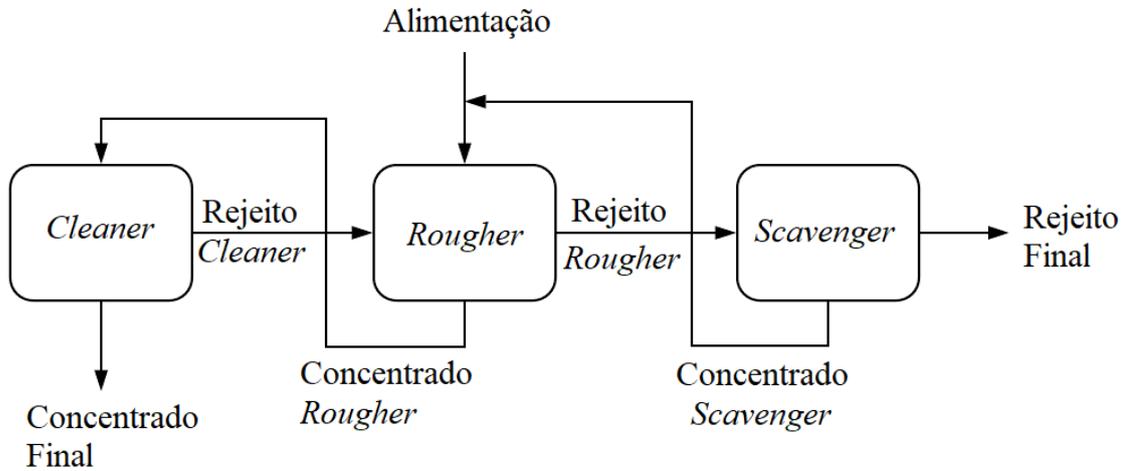
### 2.2.6 Circuitos de Beneficiamento

O primeiro estágio da flotação, onde ocorre a primeira etapa de concentração, é denominado *rougher*, ou etapa de desbaste. Nesta etapa, obtém-se um concentrado e um rejeito com teores não admissíveis para comercialização. Portanto, devem ser reprocessados em estágios *cleaner*, no caso dos concentrados, e *scavenger*, no caso dos rejeitos.

Caso o teor do concentrado *rougher* não viabilize o seu aproveitamento industrial, este deve ser reprocessado em um ou mais estágios, denominados *cleaner*, ou estágios de limpeza, até que se obtenha um concentrado final com teor aceitável pelo setor que vai empregá-lo.

O rejeito do estágio *rougher* é processado em um outro estágio denominado *scavenger*, que resulta em um rejeito final pobre em minerais de interesse e um concentrado que pode, junto com o rejeito *cleaner*, voltar ao estágio *rougher*, pois ainda podem possuir minerais valiosos (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018). Um exemplo de circuito de flotação, com os três estágios, está representado esquematicamente na Figura 5.

Figura 5 - Circuito de flotação



Fonte: Chaves, Leal Filho e Braga (2018, com adaptações).

### 2.3 Grafita

A grafita é uma forma mineral e, também, uma das três formas alotrópicas do carbono puro, juntamente com o diamante e o carbono amorfo. É um mineral com excelentes propriedades refratárias e lubrificantes, elevadas condutividades térmica e elétrica, baixa densidade e quimicamente inerte. Essa combinação de propriedades faz da grafita um mineral amplamente utilizado na indústria, principalmente na fabricação de tijolos refratários, lubrificantes, cadinhos e no grafite do lápis. Ela também pode ser empregada na manufatura de baterias, eletrodos, revestimentos de fricção, células a combustível, etc. (SAMPAIO; BRAGA; DUTRA, 2008).

Em 2016, foram produzidas mundialmente 1,2 milhões de toneladas de grafita natural, sendo a China responsável por 65,0% do total, seguida pela Índia (14,2%) e Brasil (5,2%). As reservas mundiais foram estimadas em 250 milhões de toneladas, como mostra a Tabela 1. No Brasil, as principais reservas estão localizadas nos estados de Minas Gerais, Ceará e Bahia (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2019).

Tabela 1 - Reserva e produção mundial de grafita

| Discriminação   | Reserva (10 <sup>3</sup> t) |              | Produção     |            |     |
|-----------------|-----------------------------|--------------|--------------|------------|-----|
|                 | Países                      | 2016         | 2015         | 2016       | (%) |
| Brasil          | 72.000                      | 75           | 62           | 5,2        |     |
| China           | 55.000                      | 780          | 780          | 65         |     |
| Índia           | 8.000                       | 170          | 170          | 14,2       |     |
| Coreia do Norte | -                           | 30           | 30           | 2,5        |     |
| Canadá          | -                           | 30           | 21           | 1,8        |     |
| Rússia          | -                           | 15           | 15           | 1,3        |     |
| Madagascar      | 1.600                       | 5            | 30           | 2,5        |     |
| México          | 3.100                       | 22           | 22           | 1,9        |     |
| Ucrânia         | -                           | 5            | 5            | 0,4        |     |
| Turquia         | 90.000                      | 32           | 32           | 2,7        |     |
| Outros países   | -                           | 19           | 33           | 2,5        |     |
| <b>TOTAL</b>    | <b>250.000</b>              | <b>1.183</b> | <b>1.200</b> | <b>100</b> |     |

Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral (2019, com adaptações).

### 2.3.1 Mineralogia

As três formas alotrópicas do carbono elementar são: a grafita, o diamante e o carbono amorfo. Elas podem possuir propriedades muito semelhantes ou substancialmente diferentes. Por exemplo: tanto a grafita quanto o diamante são resistentes à corrosão, mesmo a elevadas temperaturas. Por outro lado, a dureza da grafita (1 a 2,9 na escala Moh) é muito menor do que a do diamante (10 na escala Moh) (SAMPAIO; BRAGA; DUTRA, 2008).

Em termos de estrutura cristalina, observa-se, na grafita, um arranjo atômico em camadas, segundo uma rede de planos hexagonais. A estrutura do cristal é formada por cátions  $C^{4+}$  e ânions  $C^{4-}$ , formando uma rede planar, onde a distância entre os íons é da ordem de 1,42 Å. Por outro lado, a distância entre os planos (3,35 Å) é maior que o dobro da distância entre os íons e estão ligados por forças de van der Waals, mais fracas. Essa diferença na intensidade das ligações em diferentes direções justifica características anisotrópicas apresentadas pela grafita, como: condução térmica. densidade mais baixa que a do diamante, fácil obtenção de lâminas finas e anisotropia óptica (LOBATO, 2009).

### 2.3.2 Formas comerciais da grafita

Comercialmente, pode-se encontrar a grafita na forma de flocos cristalinos (*flakes*), veios cristalinos (*lump*) ou microcristalina (amorfa) (LOBATO, 2009).

#### 2.3.2.1 Grafita em flocos

A grafita em flocos é a forma mais lavrada do mundo. Comparada a outros tipos de grafita, apresenta melhores condutividades térmica e elétrica e melhor resistência à corrosão. Seus flocos podem estar distribuídos de forma homogênea por todo o minério ou concentrados em lentes na forma de pacotes. O teor de carbono no minério pode variar entre 5 e 40% (MITCHELL, 1993).

A grafita em flocos é intensamente utilizada na fabricação de cadinhos para a indústria de fundição, facilitando o manuseio do aço fundido e de outros metais. Além disso, é utilizada na manufatura de tijolos refratários, baterias, células a combustível, lubrificantes, dentre outras aplicações) (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2019).

A concentração da grafita em flocos ocorre, geralmente, por meio da flotação, onde se obtêm concentrados com teores entre 80 e 95% de carbono. Para obtenção de concentrados mais puros (acima de 98%) são realizadas operações adicionais de purificação (SAMPAIO; BRAGA; DUTRA, 2008).

#### 2.3.2.2 Grafita em veios cristalinos

A grafita em veios cristalinos, também chamada de *lump*, é uma forma relativamente rara (encontrada em quantidades significativas no Sri Lanka) e altamente cristalina. Ela possui morfologia acicular com cristais orientados perpendicularmente à rocha encaixante. É utilizada, principalmente, na fabricação de baterias e lubrificantes (MORAIS, 1997).

#### 2.3.2.3 Grafita microcristalina

A grafita microcristalina também pode ser chamada de grafita amorfa, devido ao baixo índice de cristalização em algumas partículas, muito pequenas, visíveis apenas ao

microscópio. No entanto, trata-se de uma grafita altamente cristalina. Ela se caracteriza pela maciez e cor preta terrosa. É utilizada na fabricação de aditivos de carbono, coberturas (tintas para proteger superfícies metálicas), materiais de fricção, lubrificantes, lápis e refratários (SAMPAIO; BRAGA; DUTRA, 2008).

### ***2.3.3 Processamento do minério de grafita***

Os minérios de grafita apresentam teores de carbono que variam de 5% até valores superiores a 15%. A sua rota de processamento e etapas de purificação são fortemente influenciadas pela granulometria de liberação e pelas impurezas presentes no minério. Dentre as principais impurezas, destacam-se: silicatos, silimanita, óxidos de ferro, pirrotita, biotita, granada, caolinita, alumina e minerais sulfetados (LOBATO, 2009).

O processamento de minérios de grafita começa com etapas de britagem e moagem, seguidas de etapas de concentração e purificação. O processo de concentração mais utilizado é a flotação, enquanto os métodos de concentração gravítica e separação magnética são utilizados como etapas auxiliares (AQUINO; SILVA, 2014).

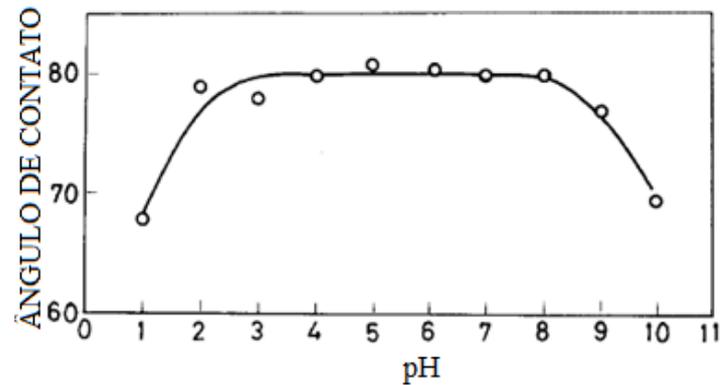
A moagem é feita em moinhos de barras e bolas até se atingir a granulometria de liberação da grafita. Em células convencionais de flotação, obtêm-se concentrados com teores de 98% de carbono. No entanto, para várias aplicações industriais, exige-se uma pureza maior que 98% e, portanto, métodos de purificação são empregados para obtenção de um produto final com teor de aproximadamente, 99,95% (SAMPAIO; BRAGA; DUTRA, 2008).

### ***2.3.4 Flotabilidade da grafita***

Por ser um sólido naturalmente hidrofóbico, a grafita responde muito bem ao processo de flotação. Óleos apolares, como querosene e óleo combustível, podem ser utilizados como coletores. Óleo de pinho ou algum álcool é utilizado como espumante.

O ângulo de contato para o sistema ar-água-mineral pode representar o nível de hidrofobicidade de um mineral. Na grafita, eles são relativamente grandes e variam com o pH da água e com o modo como foram processados nas etapas de cominuição (WAKAMATSU; NUMATA, 1991). A Figura 6 mostra a influência do pH no ângulo de contato da grafita.

Figura 6 - Ângulo de contato da grafita em função do pH

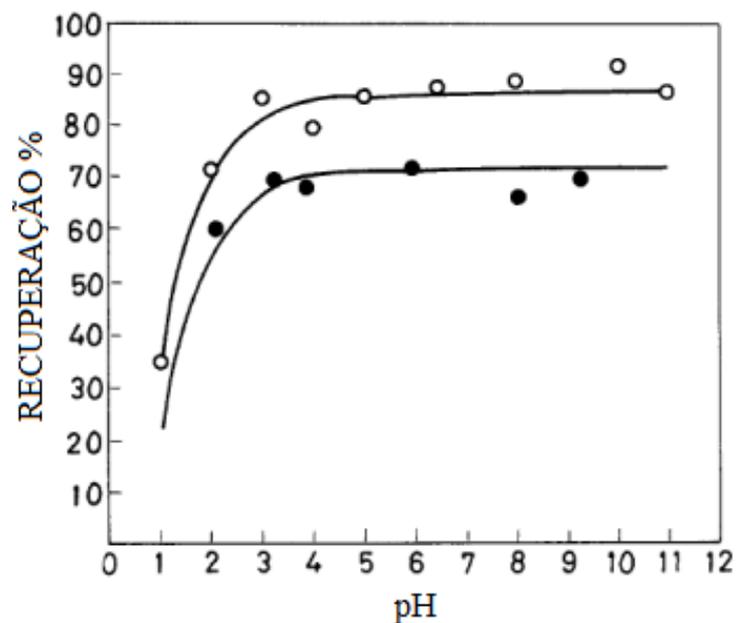


Fonte: Wakamatsu e Numata (1991, com adaptações).

Observa-se que para a região de pH entre 2 e 9, os ângulos de contato variam entre 77° e 81°. Fora dessa região, o ângulo de contato diminui.

Ainda segundo Wakamatsu e Numata (1991), o pH também influencia na recuperação da grafita. Como se pode observar na Figura 7, para valores de pH abaixo de 4, a recuperação de duas amostras de grafita processadas de formas diferentes, diminui, em concordância com a diminuição do ângulo de contato. No entanto, para regiões de pH básico, acima de 9, a recuperação não diminui, mesmo com a diminuição do ângulo de contato mostrado na Figura 6.

Figura 7 - Recuperação da grafita em função do pH



Fonte: Wakamatsu e Numata (1991, com adaptações).

### 3 METODOLOGIA

Todos os procedimentos experimentais deste estudo foram realizados no Setor Mineral do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte, Minas Gerais.

#### 3.1 Preparação das amostras

Inicialmente, pesou-se a amostra recebida, aparentemente seca, com partículas de granulometria variada (Figura 8), em uma balança de bancada Toledo com carga máxima de 50 kg. A massa calculada foi de, aproximadamente, 32,7 kg.

Figura 8 - Amostra recebida



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a pesagem, a amostra, antes composta por frações de tamanhos diferentes, foi toda reduzida abaixo de 3,35 mm (6 *mesh*) (Figura 9) em um britador de mandíbulas (Figura 1) e em um moinho de discos. Em seguida, ela foi homogeneizada em uma pilha longitudinal (Figura 10) sobre uma bancada de trabalho e, finalmente, quarteada em amostras de 1 kg (Figura 11).

Separou-se uma dessas amostras para as caracterizações granulométrica, mineralógica semiquantitativa e química (alimentação e frações granulométricas). Para os

testes de flotação foram utilizadas quatro amostras para o estudo do efeito do tempo de moagem, três para o efeito da dosagem de querosene, duas para o efeito da dosagem de espumante e uma para o teste final. O restante das amostras foi arquivado.

Figura 9 - Minério de grafita após ser reduzido abaixo de 3,35 mm



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 10 - Pilha longitudinal homogênea disposta sobre bancada



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 11 - Amostras de 1,0 kg após homogeneizadas e quarteadas



Fonte: elaborada pelo autor.

### **3.2 Caracterização da amostra**

A amostra de 1,0 kg, selecionada aleatoriamente para as caracterizações granulométrica, química e mineralógica semiquantitativa foi homogeneizada e dividida em duas amostras iguais de 500 g cada. Uma delas foi arquivada e a outra novamente homogeneizada e quarteada para a retirada de duas amostras menores (aproximadamente 20 g) e, finalmente, pulverizada para a caracterização mineralógica semiquantitativa e caracterização química. O restante da amostra foi caracterizado granulometricamente, com determinação do teor de carbono grafítico para as diferentes frações granulométricas.

#### ***3.2.1 Caracterização granulométrica***

A amostra caracterizada granulometricamente foi previamente deslamada, para a retirada de material com granulometria abaixo de 0,045 mm (peneira de 325 malhas), utilizando-se um vibrador de peneiras suspenso (Figura 12). O material retido foi secado, pesado e, então, introduzido no topo de um conjunto de peneiras com diferentes aberturas (10,

20, 28, 40, 80, 100, 200, 325 malhas, respectivamente), empilhadas e acopladas a um agitador de peneiras (Figura 13). O agitador foi ligado durante tempo suficiente para que todo o material fosse separado por fração (aproximadamente 20 minutos) e, após o término, as frações granulométricas retidas em cada peneira foram pesadas em uma balança de precisão.

Figura 12 - Vibrador de peneiras suspenso



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 13 - Vibrador de peneiras utilizado na caracterização granulométrica



Fonte: elaborada pelo autor.

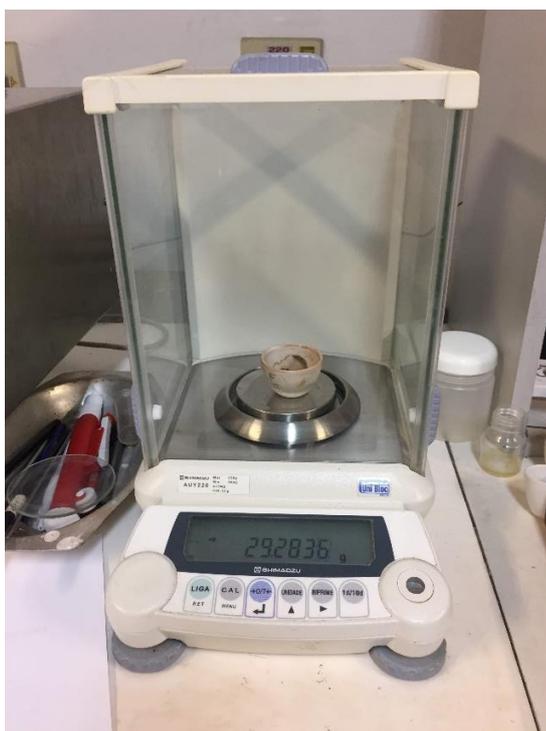
### 3.2.2 Caracterização química

A caracterização química da amostra foi feita com o objetivo de determinar o teor de carbono grafítico nas frações granulométricas, na amostra da alimentação (minério homogeneizado, composto de partículas de todos os tamanhos) e nos concentrados e rejeitos dos testes de flotação. As amostras caracterizadas quimicamente foram previamente homogeneizadas, quarteadas em frações de aproximadamente 20 g e pulverizadas. Após a preparação das amostras, o teor de carbono foi determinado pela calcinação da amostra (perda ao fogo).

#### 3.2.2.1 Determinação de Perda ao Fogo (PF)

Primeiramente, pesou-se os cadinhos utilizados para cada amostra em uma balança analítica (Figura 14) e anotou-se seus pesos. Em seguida, utilizando-se uma espátula, adicionou-se uma pequena quantidade (de 3 a 4 g para frações granulométricas e rejeitos dos testes de flotação *rougher* e 2 g para os concentrados dos testes de flotação) de cada amostra e anotou-se o seu peso (peso do cadinho vazio + peso da amostra úmida).

Figura 14 - Balança analítica



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a pesagem inicial, os cadinhos com as amostras foram levados ao forno durante 30 minutos a uma temperatura de 600 °C (Figura 15(a)), para a calcinação da matéria volátil (matéria orgânica). Após o tempo estipulado, os cadinhos foram retirados do forno e pesados novamente. Em seguida, as amostras foram levadas novamente ao forno, desta vez por 90 minutos, a uma temperatura de 960 °C (Figura 15(b)), para a queima do carbono grafítico da amostra. Finalmente, pesou-se o cadinho com o material seco e livre de carbono e calculou-se o teor de carbono grafítico das amostras em estudo.

Figura 15 - Forno utilizado no teste de perda ao fogo (a) após queima a 600 °C e (b) após queima a 960 °C



(a)

(b)

Fonte: elaboradas pelo autor.

### 3.2.3 Caracterização mineralógica semiquantitativa

A identificação das fases minerais da amostra foi realizada com a utilização de um difratômetro de raios-X. A análise foi feita pelo método de pó, em um difratômetro de fabricação Rigaku Geigerflex, com monocromador de cristal curvo de grafita e tubo de cobre, radiação Cu K $\alpha$ 1 ( $\lambda = 1,5405$  nm), com variação do ângulo  $2\theta$  de 0° a 80°.

### 3.3 Testes de flotação *rougher*

Primeiramente, todos os teste de flotação foram realizados em uma célula de flotação de bancada da Brastorno, que pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 - Célula de flotação de bancada Brastorno



Fonte: elaborada pelo autor.

Para os testes de flotação *rougher*, foram analisadas as variáveis tempo de moagem, dosagem de coletor (querosene) e dosagem de espumante (Flotanol D-25).

As moagens para os testes de flotação *rougher* foram feitas em um moinho de dimensões 8" x 12" (Figura 17). Utilizou-se uma rotação de 1200 rpm e corpos moedores em forma de barras com diâmetros de 1 ¼, 1, ¾ e ½". A quantidade de barras e a distribuição da carga estão mostradas na Tabela 2.

Figura 17 - Moinho 8" x 12"



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Carga de barras utilizada nos testes de moagem

| Diâmetro (pol.) | Quantidade | Peso (kg) | Peso (%) |
|-----------------|------------|-----------|----------|
| 1 1/4           | 3          | 5,2       | 29,0     |
| 1               | 4          | 4,1       | 23,0     |
| 3/4             | 9          | 5,3       | 29,0     |
| 1/2             | 14         | 3,5       | 20,0     |
| TOTAL           | 30         | 18,1      | 100,0    |

Fonte: elaborada pelo autor.

A porcentagem de sólidos em cada moagem foi de 65%. Isso significa que, para cada amostra de 1,0 kg de minério foram adicionados 550 ml de água.

Ao término de cada moagem, abriu-se o moinho de barras e retirou-se o material do jarro e dos corpos moedores com a utilização de água, controlando-se o seu volume para que a polpa não excedesse o volume da cuba de flotação.

Utilizou-se um tempo de 5 minutos para o condicionamento da polpa e de 8 minutos para a flotação *rougher*.

Durante cada teste, o concentrado foi sendo coletado em uma bandeja de aço inoxidável. Após o término da flotação, a polpa com o rejeito, foi despejada em outra bandeja de aço inoxidável devidamente identificada. As bandejas dos testes TR-1 ao TR-9 foram levadas a uma estufa para secar. Após a secagem, os concentrados e rejeitos foram pesados, para balanço de massa, e foram caracterizados quimicamente para determinação do teor de carbono grafitico.

### 3.3.1 Efeito do tempo de moagem

Para o estudo do efeito do tempo de moagem, foram realizados 4 testes de flotação *rougher*, denominados TR-1, 2, 3 e 4, variando-se o tempo de moagem, como mostra a Tabela 3. Utilizou-se uma dosagem de 200 g/t de querosene e de 75 g/t de espumante (Flotanol D-25), em cada teste. O tempo inicial de moagem (2,5 minutos para TR-1) foi escolhido aleatoriamente e o último tempo (10,0 minutos para TR-4) foi o último valor para o qual a moagem ocorreu sem problemas operacionais. Aumentando-se o tempo de moagem acima de 10,0 minutos, observou-se que as cargas moedoras pararam de cair, devido a formação de uma polpa muito moída, fazendo com que os corpos moedores (barras cilíndricas) permanecessem aderidos às paredes do jarro do moinho.

Tabela 3 - Condições dos testes para o estudo do efeito do tempo de moagem

| Teste | Tempo (min.) | Querosene (g/t) | Flotanol D-25 (g/t) |
|-------|--------------|-----------------|---------------------|
| TR-1  | 2,5          | 200,0           | 75,0                |
| TR-2  | 5,0          | 200,0           | 75,0                |
| TR-3  | 7,5          | 200,0           | 75,0                |
| TR-4  | 10,0         | 200,0           | 75,0                |

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.3.2 Efeito da dosagem de querosene

Para o estudo do efeito da dosagem do coletor (querosene), foram realizados 3 testes de flotação *rougher*, denominados TR-5, 6 e 7, variando-se a dosagem do coletor, como mostra a Tabela 4. O tempo de moagem foi de 7,5 minutos, determinados a partir da análise do estudo do tempo de moagem e a dosagem de espumante (Flotanol D-25) foi de 75 g/t. As dosagens de querosene, utilizadas, foram baseadas em estudos de flotação de grafita realizados anteriormente por Aquino e Silva (2014) e Praes, Aquino e Caldeira (2001).

Tabela 4 - Condições dos testes para o estudo do efeito da dosagem de querosene

| Teste | Tempo (min.) | Querosene (g/t) | Flotanol D-25 (g/t) |
|-------|--------------|-----------------|---------------------|
| TR-5  | 7,5          | 150,0           | 75,0                |
| TR-6  | 7,5          | 250,0           | 75,0                |
| TR-7  | 7,5          | 300,0           | 75,0                |

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.3.3 Efeito da dosagem de espumante Flotanol D-25

Para o estudo do efeito da dosagem do espumante Flotanol D-25, foram realizados mais dois testes de flotação *rougher*, denominados TR-8 e TR-9, com diferentes quantidades de espumante, como mostra a Tabela 5. O tempo de moagem foi de 7,5 minutos, determinados a partir da análise do estudo do tempo de moagem e a dosagem de querosene foi de 200 g/t, determinada a partir do estudo do efeito da dosagem de querosene, realizado anteriormente. Os resultados dos dois testes foram comparados ao do teste TR-3, que possui as mesmas condições destes, mas com dosagem de Flotanol D-25 de 75 g/t. As dosagens de espumante, utilizadas, foram baseadas em estudos de flotação de grafita realizados anteriormente por Aquino e Silva (2014).

Tabela 5 - Condições dos testes para o estudo do efeito da dosagem de espumante

| Teste | Tempo (min.) | Querosene (g/t) | Flotanol D-25 (g/t) |
|-------|--------------|-----------------|---------------------|
| TR-8  | 7,5          | 200,0           | 50,0                |
| TR-9  | 7,5          | 200,0           | 100,0               |

Fonte: elaborada pelo autor.

## 3.4 Testes de flotação *cleaner*

Após a escolha das melhores condições para a flotação *rougher*, realizou-se o teste final, denominado TR-10. Nele, realizou-se uma etapa de flotação *rougher*, seguida de três etapas sucessivas de remoagem e flotação *cleaner*.

### 3.4.1 Flotação *cleaner I*

O concentrado obtido na flotação *rougher* foi remoído em moinho de dimensões 8" x 8", durante 5,0 minutos. Utilizou-se uma carga moedora de aproximadamente 3,6 kg de

bolas de aço com diâmetros de 3,0, 2,5 e 2,0 cm com cargas de 862 g, 369 g e 2400 g, respectivamente. Na Figura 18, pode-se observar o concentrado *rougher* sendo introduzido no moinho de bolas 8" x 8", para a realização da remoagem.

Figura 18 - Concentrado *rougher* sendo introduzido no moinho de bolas para a remoagem



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a remoagem, realizou-se o teste de Flotação *cleaner I*. Utilizou-se uma dosagem de 50 g/t de Flotanol D-25 e não se adicionou querosene. O tempo de flotação foi de 6,0 minutos.

Após o fim desta etapa, o concentrado *cleaner I* foi remoído e o rejeito foi disposto em uma bandeja de aço inoxidável e levado à estufa para secar.

### **3.4.2 Flotação *cleaner II***

O concentrado da etapa anterior (*cleaner I*), foi remoído no mesmo moinho com a mesma carga de bolas e tempo de remoagem de 5,0 minutos.

Para a Flotação *cleaner II*, não foram adicionados reagentes e o tempo de flotação foi de 6,0 minutos. Da mesma forma, o concentrado da flotação *cleaner II* foi remoído e o rejeito levado em uma bandeja de aço inoxidável para secar na estufa.

### 3.4.3 Flotação cleaner III

A última remoagem foi realizada no mesmo moinho 8" x 8", mas desta vez, foi utilizada uma carga moedora composta por, aproximadamente, 3,65 kg de granalhas de aço. O tempo de remoagem foi de 5,0 minutos.

Para o teste de flotação *cleaner III*, não foram adicionados reagentes e o tempo de flotação foi de 6,0 minutos. Ao término do teste, o concentrado (Figura 19) e rejeito finais foram levados à estufa para secar. Finalmente, todos os rejeitos do teste final, TR-10, bem como o concentrado final, foram caracterizados quimicamente para a determinação do teor de carbono grafítico.

Figura 19 - Concentrado final



Fonte: elaborada pelo autor

Os resultados do teste final (TR-10) foram, então, dispostos em um fluxograma de balanço de massa que será discutido na próxima seção.

Finalmente, as condições e resultados de todos os testes de flotação realizados neste estudo estão disponíveis no APÊNDICE A, no final deste documento e tem como objetivo, fornecer as informações necessárias para a reprodução dos testes de flotação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização química

A caracterização química da amostra foi realizada com o objetivo de determinar o teor de carbono grafítico em amostras da alimentação, das frações granulométricas e de rejeitos e concentrados dos testes de flotação.

O resultado para a amostra da alimentação, ou seja, aquela com todas as granulometrias, teoricamente homogênea, representativa de toda a amostra de minério estudada, após a calcinação da matéria volátil a 600 °C e queima do carbono grafítico a 960 °C, por 90 minutos, indicou um teor de carbono grafítico de 17,7%.

Os teores de carbono das frações granulométricas serão analisados na seção seguinte, bem como a caracterização química dos concentrados e rejeitos, que será discutida juntamente com a análise dos testes de flotação.

### 4.2 Caracterização granulométrica

Os resultados da caracterização granulométrica estão apresentados na Tabela 6. Eles mostram que 61,9% do minério e 71,3 % do carbono grafítico encontram-se retidos em 80 malhas (180 µm).

Na Figura 20, pode-se observar, também, que a distribuição de massa segue a mesma linha de tendência da distribuição do carbono por fração granulométrica, mostrando que a maior parte do carbono grafítico se encontra retido em granulometrias mais grossas.

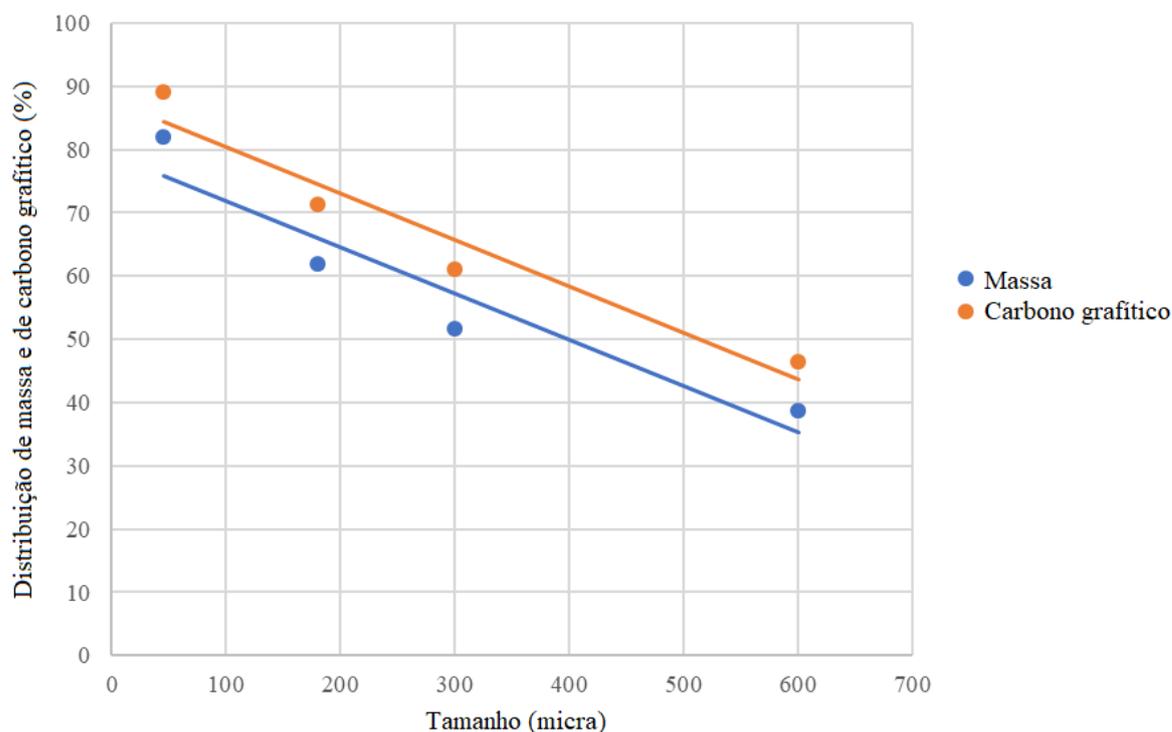
Tabela 6 - Análise granulométrica com teor e distribuição de carbono da amostra

| TAMANHO     |       | MASSA (%) |           | TEOR (%C) |           | DISTRIBUIÇÃO (%C) |           |
|-------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|-----------|
| Malhas      | Micra | Simples   | Acumulado | Simples   | Acumulado | Simples           | Acumulada |
| 28          | 600   | 38,8      | 38,8      | 21,7      | 21,7      | 46,5              | 46,5      |
| 48          | 300   | 12,8      | 51,6      | 20,8      | 21,5      | 14,7              | 61,2      |
| 80          | 180   | 10,3      | 61,9      | 17,9      | 20,9      | 10,2              | 71,3      |
| 325         | 45    | 20,0      | 81,9      | 16,2      | 19,8      | 17,8              | 89,2      |
| -325        | -45   | 18,1      | 100,0     | 10,9      | 18,1      | 10,8              | 100,0     |
| Alimentação |       | 100,0     | -         | 18,1      | -         | 100,0             |           |

Fonte: elaborada pelo autor.

Além disso, observa-se que o teor de carbono é maior para granulometrias mais grossas e que o teor calculado para a alimentação (18,1%) é bem próximo do teor determinado na caracterização química da alimentação (17,7%).

Figura 20 - Distribuição de massa e de carbono em função do tamanho das partículas



Fonte: elaborada pelo autor.

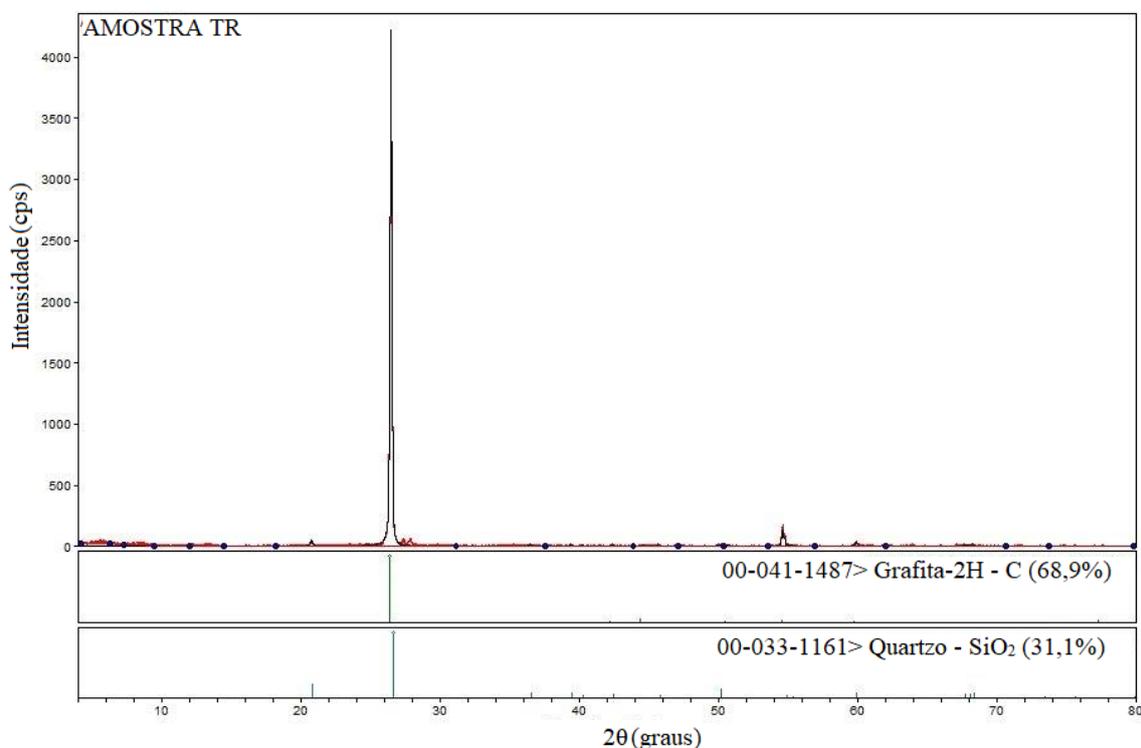
### 4.3 Caracterização mineralógica semiquantitativa

O resultado da caracterização mineralógica semiquantitativa da amostra, realizada a partir da difratometria de raios-X, pode ser visto na Figura 21.

É possível observar picos que indicam a presença de grafita (C) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), como principais espécies minerais que compõem a amostra. No entanto, observa-se uma sobreposição dos picos. Esse problema, juntamente com outros aspectos, segundo Ribeiro (2016), afeta na determinação das intensidades dos picos, tornando complexa a quantificação das fases minerais presentes na amostra.

A análise mineralógica semiquantitativa por difração de raios-X se mostra, portanto, uma técnica eficiente no que diz respeito à determinação das fases cristalinas minerais, mas se torna complexa, por diversos fatores, na quantificação das fases minerais.

Figura 21 – DRX da análise mineralógica semiquantitativa da amostra da alimentação



Fonte: elaborada pelo autor.

O quartzo é um mineral silicatado ( $\text{SiO}_2$ ) e, portanto, de fácil separação da grafita através do processo de flotação. Isso porque a sua superfície é formada pela ruptura de ligações covalentes Si – O, fortes, que resultam em uma superfície polar, isto é, bastante energética. Por outro lado, a superfície da grafita é caracteristicamente apolar, formada a partir da quebra de ligações moleculares C – C, fracas.

#### 4.4 Efeito do tempo de moagem

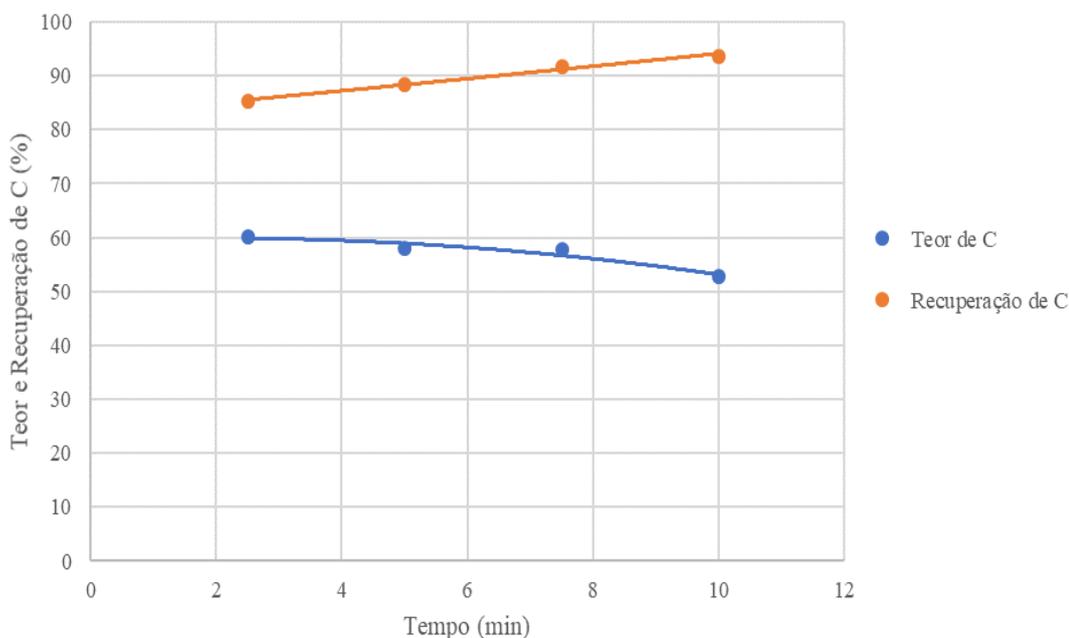
Os resultados para o estudo do efeito do tempo de moagem podem ser visualizados na Tabela 7 e Figura 22. Pode-se observar que o teor de carbono do concentrado decresce enquanto a recuperação cresce, com o aumento do tempo de moagem.

Tabela 7 - Efeito do tempo de moagem sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado *rougher*

| TESTE | TEMPO DE MOAGEM (min.) | TEOR DE C (%) |         | RECUPERAÇÃO (%) |         |
|-------|------------------------|---------------|---------|-----------------|---------|
|       |                        | Concentrado   | Rejeito | Massa           | Carbono |
| TR-1  | 2,5                    | 60,2          | 3,6     | 25,8            | 85,3    |
| TR-2  | 5,0                    | 57,9          | 2,8     | 27,2            | 88,5    |
| TR-3  | 7,5                    | 57,7          | 2,1     | 29,0            | 91,8    |
| TR-4  | 10                     | 52,8          | 1,6     | 30,8            | 93,7    |

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 22 - Efeito do tempo de moagem sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado *rougher*



Fonte: elaborada pelo autor.

Para o tempo de moagem de 10 minutos, obteve-se a maior recuperação de carbono grafítico (93,7%). No entanto, deve-se levar em conta que, na concentração da grafita, recomenda-se a preservação da granulometria mais grossa do material liberado. Além disso, quanto mais fina for a moagem da grafita, maior a probabilidade de redução da área do plano basal (hidrofóbico), que pode gerar uma perda de hidrofobicidade. Com base nisso, selecionou-se, para os testes de flotação *rougher*, o tempo de moagem de 7,5 minutos. Com esse tempo, foi obtido um teor de 57,7% e uma recuperação de 91,8% de carbono.

#### 4.5 Efeito da dosagem de querosene

Os resultados para os testes de dosagem de coletor (querosene), podem ser visualizados na Tabela 8 e na Figura 23.

Como o teste TR-3 possui o tempo de moagem escolhido para o restante dos testes (7,5 minutos) de flotação *rougher*, a mesma dosagem de Flotanol D-25 (75 g/t) e uma dosagem de querosene diferente (200 g/t), pode-se incluir o mesmo nesta análise. Considerando-se a necessidade de obtenção de um concentrado com elevado teor de carbono, definiu-se a dosagem de querosene de 200 g/t como sendo a ideal na etapa *rougher* da flotação.

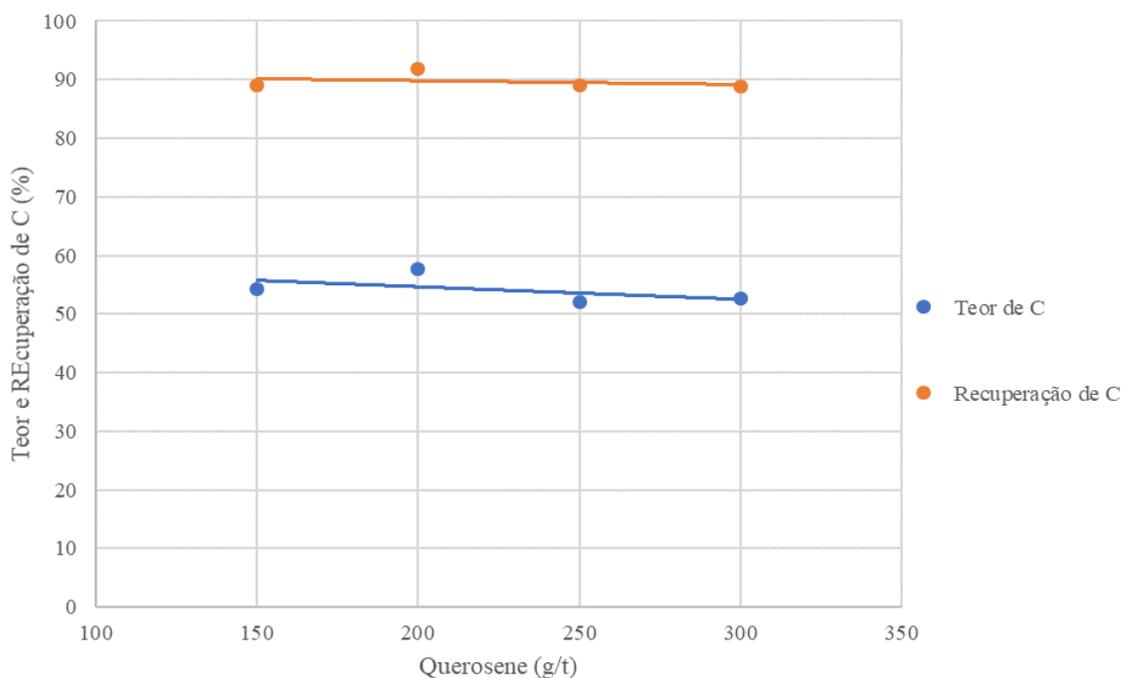
Pode-se observar, também, que o teor de carbono no concentrado foi levemente decrescente e a recuperação não variou significativamente, apresentando um melhor resultado para TR-3.

Tabela 8 - Efeito da dosagem de querosene sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado *rougher*

| TESTE       | QUEROSENE<br>(g/t) | TEOR DE C (%) |            | RECUPERAÇÃO (%) |             |
|-------------|--------------------|---------------|------------|-----------------|-------------|
|             |                    | Concentrado   | Rejeito    | Massa           | Carbono     |
| TR-5        | 150                | 54,3          | 2,2        | 29,7            | 89,0        |
| <b>TR-3</b> | <b>200</b>         | <b>57,7</b>   | <b>2,1</b> | <b>29,0</b>     | <b>91,8</b> |
| TR-6        | 250                | 52,0          | 2,6        | 30,5            | 89,1        |
| TR-7        | 300                | 52,6          | 2,7        | 30,0            | 88,8        |

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 23 - Efeito da dosagem de querosene sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado *rougher*



Fonte: elaborada pelo autor.

#### 4.6 Efeito da dosagem de espumante Flotanol D-25

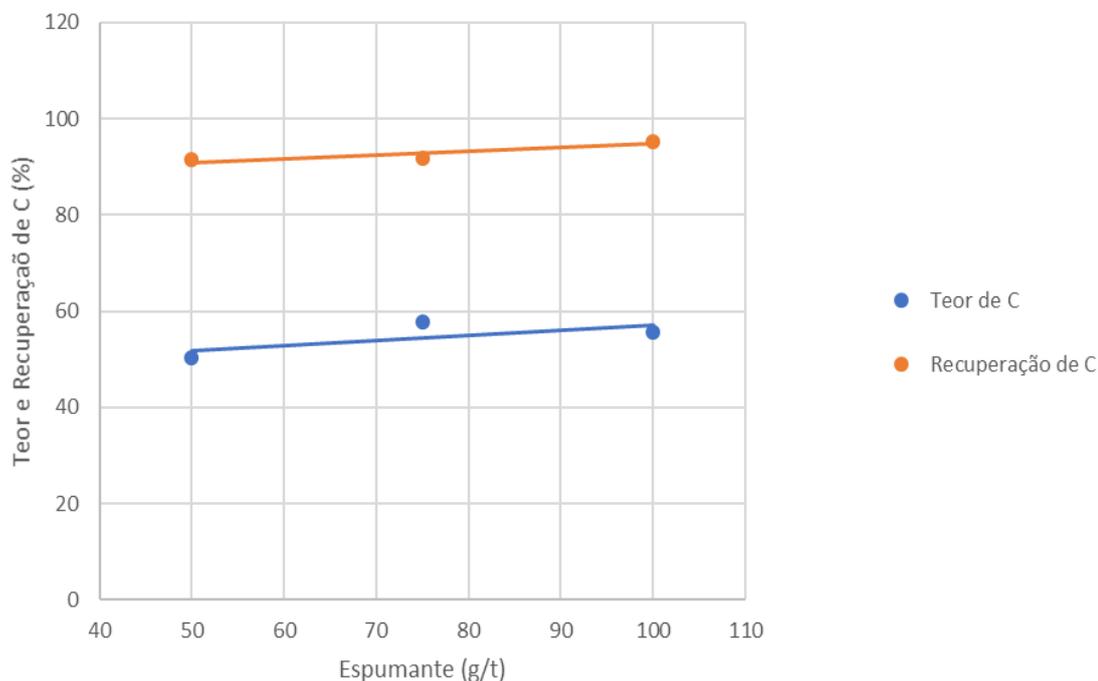
Os resultados do estudo do efeito da dosagem de espumante Flotanol D-25 estão apresentados na Tabela 9 e Figura 24. Até aqui, já foram definidos o tempo de moagem (7,5 minutos) e a dosagem de querosene (200 g/t).

Tabela 9 - Efeito da dosagem de espumante sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado *rougher*

| TESTE | ESPUMANTE<br>(g/t) | TEOR DE C (%) |         | RECUPERAÇÃO (%) |         |
|-------|--------------------|---------------|---------|-----------------|---------|
|       |                    | Concentrado   | Rejeito | Massa           | Carbono |
| TR-8  | 50                 | 50,3          | 2,0     | 32,5            | 91,4    |
| TR-3  | 75                 | 57,7          | 2,1     | 29,0            | 91,8    |
| TR-9  | 100                | 55,6          | 1,3     | 30,2            | 95,3    |

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 24 - Efeito da dosagem de espumante sobre o teor e recuperação de carbono no concentrado *rougher*



Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que a recuperação do carbono grafítico para a dosagem de 100 g/t utilizada no teste TR-9 é maior do que a dos demais. O rejeito do teste TR-9 também é significativamente mais pobre e o teor de carbono grafítico no concentrado não sofreu redução significativa em relação ao teor de TR-3. Com base nessas informações, determinou-se que a dosagem ideal de espumante Flotanol D-25 para a flotação *rougher* é de 100 g/t. Com isso, as condições da etapa *rougher* do teste final (TR-10) foram estabelecidas. São elas: tempo de moagem de 7,5 minutos, 200 g/t de querosene e 100 g/t de Flotanol D-25.

## 4.7 Teste final

### 4.7.1 Flotação *rougher*

A primeira etapa do teste final, TR-10, a flotação *rougher*, foi realizada aplicando-se as condições que indicaram melhores resultados nos testes de flotação *rougher* anteriores. A saber:

Tempo de moagem: 7,5 minutos

Dosagem de querosene: 200 g/t

Dosagem de Flotanol D-25: 100 g/t

Nestas condições, os resultados obtidos na flotação *rougher* de TR-10 foram (como mostra a Tabela 10) os seguintes:

Tabela 10 - Condições para a flotação *rougher* do teste TR-10

| TESTE | TEMPO<br>DE<br>MOAGEM<br>(min.) | QUEROSENE<br>(g/t) | FLOTANOL<br>D-25 (g/t) | TEOR DE C<br>(%) |         | RECUPERAÇÃO<br>(%) |         |
|-------|---------------------------------|--------------------|------------------------|------------------|---------|--------------------|---------|
|       |                                 |                    |                        | Conc.            | Rejeito | Massa              | Carbono |
| TR-10 | 7,5                             | 200,0              | 100,0                  | 57,9             | 2,0     | 27,2               | 91,4    |

Fonte: elaborada pelo autor.

Primeiramente, observa-se que o teor de carbono obtido foi de, aproximadamente, 57,9%. Esse resultado é muito próximo do teor obtido em TR-9 (55,6%), realizado sob as mesmas condições. Por outro lado, foi obtida uma recuperação de 91,4% de carbono. Em TR-9 a recuperação foi de 95,3%.

O teor de carbono obtido em TR-10, bem como os teores obtidos em todas as etapas *rougher*, realizadas com a amostra, foram muito inferiores àqueles exigidos para a comercialização da grafita, geralmente superiores a 90%. Portanto, com o objetivo de obter um concentrado com teores acima de 90%, foram realizadas as etapas adicionais de remoagem e flotação *cleaner*, cujos resultados serão apresentados a seguir.

Uma das explicações para o baixo teor de carbono na etapa *rougher* é a liberação apenas parcial da grafita dos minerais de ganga. Neste caso, a flotação ocorreu, pois, uma porcentagem significativa da superfície da partícula seria composta pelo mineral, hidrofóbico, que se deseja flotar (grafita) e a outra parte, formada por minerais de ganga (quartzo). A densidade do conjunto, em algum momento, se tornou menor que a densidade do fluido e flutou. A flotação, portanto, não foi completamente seletiva, sendo necessárias novas etapas de moagem e flotação para aumentar o teor de carbono no concentrado.

Além disso, a quebra das partículas de minerais naturalmente hidrofóbicos, como no caso da grafita, pode acarretar na formação de planos cristalográficos hidrofílicos, aumentando a sua afinidade com a fase líquida, diminuindo a recuperação do mineral de interesse.

#### 4.7.2 Flotação *cleaner I*

O concentrado *rougher*, remóido em moinho de bolas durante 5,0 minutos foi flotado por 6,0 minutos. Os resultados da flotação *cleaner I*, estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Condições para a flotação *cleaner I* do teste TR-10

| TESTE | TEMPO DE REMOAGEM (min.) | FLOTANOL D-25 (g/t) | TEMPO DO TESTE (min.) | TEOR DE C (%) |         | RECUPERAÇÃO (%) |         |
|-------|--------------------------|---------------------|-----------------------|---------------|---------|-----------------|---------|
|       |                          |                     |                       | Concentrado   | Rejeito | Massa           | Carbono |
| TR-10 | 5,0                      | 50,0                | 6,0                   | 79,2          | 7,0     | 19,2            | 88,1    |

Fonte: elaborada pelo autor.

Para a flotação *cleaner I*, foi obtido um concentrado com teor de 79,2% de carbono grafítico e uma recuperação de 88,1%. Observa-se que o teor aumentou de 57,9% na flotação *rougher*, para 79,2%, nesta. Além disso, a recuperação diminuiu de 91,4% para 88,1% de carbono.

#### 4.7.3 Flotação *cleaner II*

Na flotação *cleaner II*, não houve adição de reagentes, apenas a remoagem do concentrado *cleaner I*, no mesmo moinho de bolas, por mais 5,0 minutos, antes do teste de flotação, que teve duração de 6,0 minutos. Os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Condições para a flotação *cleaner II* do teste TR-10

| TESTE | TEMPO DE REMOAGEM (min.) | TEMPO DO TESTE (min.) | TEOR DE C (%) |         | RECUPERAÇÃO (%) |         |
|-------|--------------------------|-----------------------|---------------|---------|-----------------|---------|
|       |                          |                       | Conc.         | Rejeito | Massa           | Carbono |
| TR-10 | 5,0                      | 6,0                   | 86,2          | 27,1    | 16,9            | 84,5    |

Fonte: elaborada pelo autor.

Nesta etapa, foi obtido um concentrado com teor de 86,2% e uma recuperação de 84,5 % de carbono grafítico. Observa-se que o teor de carbono aumentou de 79,2%, na etapa anterior (*cleaner I*), para 86,2%, nesta etapa. Também é importante notar que a recuperação continua decrescendo, de 88,1%, anteriormente, para 84,5%, agora.

#### 4.7.4 Flotação *cleaner III*

Nesta última etapa *cleaner*, o concentrado obtido na flotação *cleaner II* foi remoído no mesmo moinho 8" x 8", mas desta vez utilizando-se granalhas como corpos moedores. Não foram adicionados reagentes. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 13.

Tabela 13 - Condições para a flotação *cleaner III* do teste TR-10

| TESTE | TEMPO DE REMOAGEM (min.) | TEMPO DO TESTE (min.) | TEOR DE C (%) |         | RECUPERAÇÃO (%) |         |
|-------|--------------------------|-----------------------|---------------|---------|-----------------|---------|
|       |                          |                       | Concentrado   | Rejeito | Massa           | Carbono |
| TR-10 | 5,0                      | 6,0                   | 91,6          | 47,5    | 14,8            | 78,8    |

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que o teor de carbono do concentrado aumentou de 86,2%, na etapa anterior, para 91,6%, nesta etapa. Por outro lado, a recuperação diminuiu de 84,5% para 78,8%.

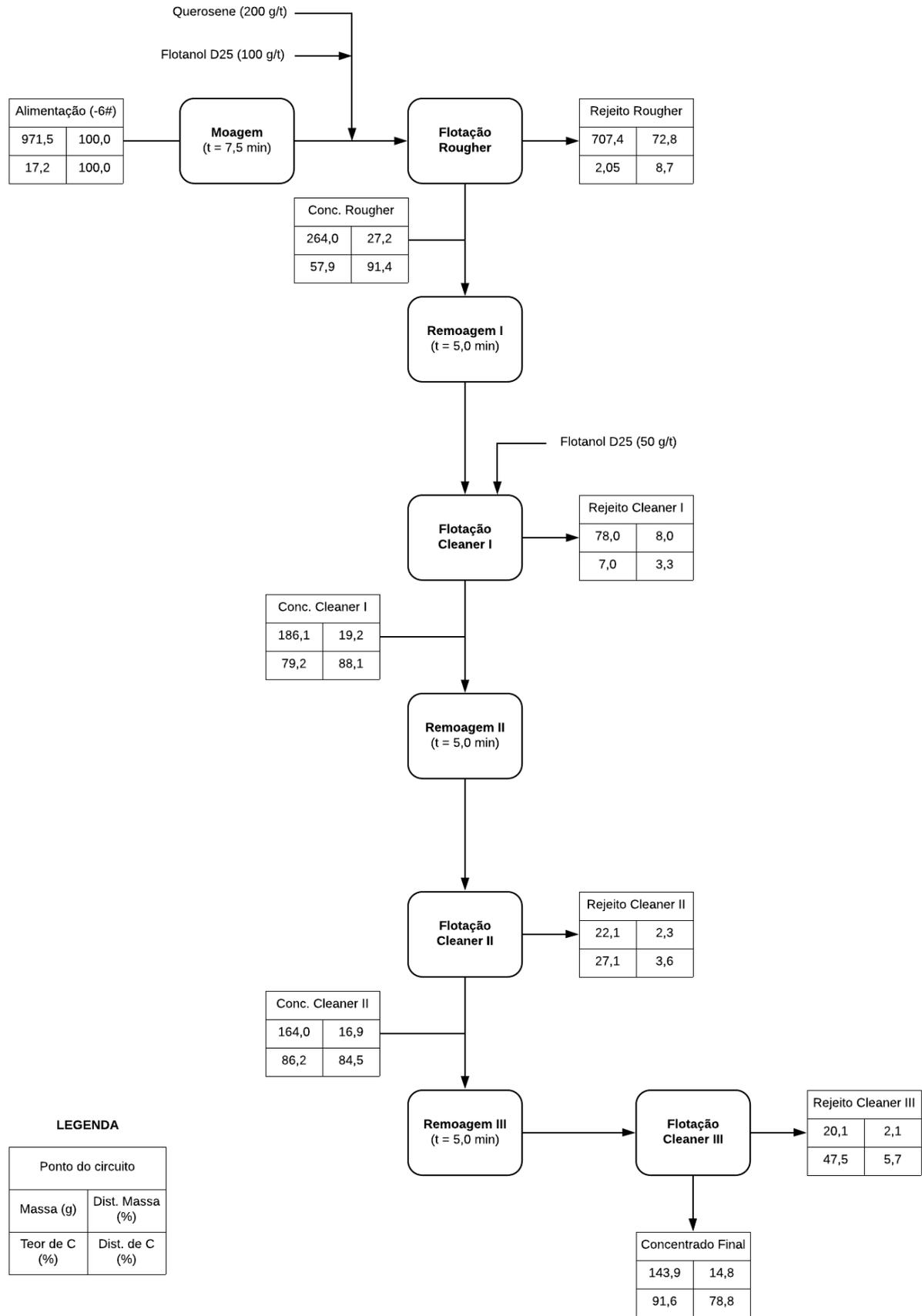
O teor de carbono do concentrado final (91,6%) é um resultado satisfatório, visto que os teores aceitáveis para a comercialização da grafita, para algumas aplicações, devem ser superiores a 90 %. Para outras, a pureza do concentrado deve ser maior ainda (> 98%) e o processo de flotação, sozinho, não é capaz de chegar a esse nível de concentração de carbono.

Outro ponto importante é o teor de carbono nos rejeitos, que aumentou, até atingir 47,5 % no rejeito final. Isso significa que, apesar de se obter um concentrado com teor de carbono superior a 90%, muito carbono não flutuou, permanecendo deprimido nos rejeitos. Por isso, a recuperação obtida foi baixa.

Para aumentar a recuperação, são necessários estudos para determinar as melhores condições para as etapas de flotação *cleaner*, como aqueles realizados para a flotação *rougher*.

O balanço de massa da flotação de grafita em escala de laboratório para o teste final (TR-10) está apresentado na Figura 25. Nele, pode-se observar todos os estágios de flotação do teste final, bem como as massas e teores dos concentrados e rejeitos e as suas respectivas distribuições.

Figura 25 - Balanço de massa da flotação de grafita em escala de laboratório



Fonte: elaborada pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

A análise química realizada mostrou que o teor de carbono grafítico da amostra da alimentação foi de 17,7%. A análise mineralógica semiquantitativa indicou um minério de grafita composto principalmente dos minerais grafita (C) e quartzo (SiO<sub>2</sub>). A caracterização granulométrica, com determinação do teor de carbono por fração granulométrica (granuloquímica), por sua vez, indicou que 61,9% do minério e 71,3% da grafita encontram-se retidos em 80 malhas, ou seja, com partículas de tamanhos superiores a 0,177 mm.

Os testes de flotação *rougher* avaliaram a influência do tempo de moagem, da dosagem de querosene (coletor) e da dosagem de Flotanol D-25 (espumante). Os resultados indicaram que o tempo de moagem ideal foi de 7,5 minutos, uma dosagem de 200 g/t de querosene e de 100 g/t de Flotanol D-25. Nestas condições, foi obtido um concentrado com 55,6% de carbono e uma recuperação de, aproximadamente 95%, indicando a necessidade de etapas adicionais e sucessivas de remoagem e flotação *cleaner*, para aumentar o teor de carbono no concentrado.

No estágio *rougher* do teste final, obteve-se um concentrado com 57,9% de carbono e uma recuperação de 91,4%, confirmando-se a necessidade de etapas *cleaner*, para o aumento do teor de carbono no concentrado.

No estágio *cleaner I*, foi obtido um concentrado com teor de 79,2% de carbono e recuperação total de 88,1%.

No estágio *cleaner II*, foi obtido um concentrado com teor de 86,2% de carbono e recuperação total de 84,5%.

Os resultados do teste final, após a etapa *cleaner III*, mostraram que foi obtido um concentrado com um teor de 91,6% e recuperação de 78,8% de carbono, utilizando um circuito constituído de uma etapa *rougher* e três etapas *cleaner*.

## REFERÊNCIAS

- AQUINO, José Aury de; SILVA, Diego Rosa da. **Estudo de concentração de grafite em escala de laboratório**. Vespasiano: SGS/GEOSOL, 2014.
- AQUINO, José Aury de; OLIVEIRA, Maria Lúcia Magalhães de; FERNANDES, Maurílio Dias. Flotação em Coluna. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 463-510, 2018.
- BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães. Fundamentos da Flotação. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 383-401, 2018.
- BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães. **Flotação no Tratamento de Minérios**. Recife: Departamento de Engenharia da Minas/UFPE, 2008.
- BROD, Emanuela Reis. **Circuito Alternativo para flotação de minério de ferro**. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antônio E. C.; (2003). **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**: Britagem, Peneiramento e Moagem. 2. ed. São Paulo: Signus Editora, 2003.
- CHAVES, Arthur Pinto; LEAL FILHO, Laurindo de Salles; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. Flotação. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 405-459, 2018.
- CORREIA, Julio Cesar Guedes; COUTO, Hudson Jean Bianchini. Classificação e Peneiramento. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 225-272, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**. Brasília, 2019.
- ENGENOVO. **Flotação**: informações básicas. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.engenovo.com.br/infotec/Art%20Tec--Flotacao-Fundamentos%20Basicos--2014.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2019.
- FUERSTENAU, M. C; MILLER, J. D; KUHN, M. C. **Chemistry of flotation**. New York: AIME, 1985.
- GUPTA, Ashok; YAN, Denis. **Mineral Processing Design and Operations: An Introduction**. 2nd ed. [S.l.]: Elsevier, 2016.
- KAWATRA, S. K. (2011). Fundamental Principles of Froth Flotation. *In*: P. DARLING (Ed.), **SME Mining Engineering Handbook**. 3rd ed. [S.l.]: SME, p. 1517-1531, 2011.

LOBATO, Emílio. **Perfil da grafita**. Brasília: J. Mendo Consultoria, 2009. Disponível em: [http://www.jmendo.com.br/wp-content/uploads/2011/08/P28\\_RT41\\_Perfil\\_da\\_Grafita.pdf](http://www.jmendo.com.br/wp-content/uploads/2011/08/P28_RT41_Perfil_da_Grafita.pdf). Acesso em: 27 abr. 2019.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antônio Freitas. Introdução ao tratamento de minérios. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 3-23, 2018.

LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. Cominuição: Britagem e moagem. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 135-183, 2018.

MATIS, K. A. **Flotation science and engineering**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1994.

MITCHELL, C. J. **Industrial Minerals Laboratory Manual: Flake Graphite**. Nottingham: British Geological Survey, 1993.

MORAIS, Carlos Antônio de; ALBUQUERQUE, Rodrigo Oscar de; LADEIRA, Ana Claudia Queiroz. Processos físicos e químicos utilizados na indústria mineral. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 8, p. 9-17, 2014. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/08/04-CTN2.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2019.

MORAIS, E. N. Geologia da Grafita. *In*: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília: DNPM/CPRM, p. 179-183, 1997.

PRAES, Plínio Eduardo; AQUINO, José Aury de; CALDEIRA, Francisco Jorge. **Estudo de concentração de grafite em escala de laboratório**. Belo Horizonte: CDTN, 2001.

RIBEIRO, Tamara Mariana G. **Caracterização de minério de grafita de Almenara-MG**. 2016. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SAMPAIO, João Alves; DELBONI JÚNIOR, Homero. Princípios da Cominuição. *In*: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (Ed.). **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 107-131, 2018.

SAMPAIO, João Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida; DUTRA, Achilles Junqueira Bourdot. Grafita. *In*: **Rochas e minerais industriais no Brasil: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 527-549, 2008.

SILVA, Alessandra Achcar Monteiro. **Estudo sobre a flotação de silicatos em coluna para o processo de concentração da apatita**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

WAKAMATSU, Takahide; NUMATA, Yoshiaki. Flotation of graphite. **Minerals Engineering**, v. 4, p. 975-982, 1991.

WILLS, Barry A.; FINCH, James A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.

## APÊNDICE A – CONDIÇÕES E RESULTADOS DOS TESTES DE FLOTAÇÃO

| EFEITO DO TEMPO DE MOAGEM   |                |              |                       |                     |                       |
|---|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-1   |                |              | Data: 07/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação <i>rougher</i> com tempo de moagem de 2,5 minutos |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA   | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|   | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM  | 2,5            | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO   | 5,0            | 40,0         | Natural               | 200,0               | 75,0                  |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>  | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS  |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO   | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|   | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO   | 253,8          | 25,8         | 60,2                  | 85,3                |                       |
| REJEITO   | 730,7          | 74,2         | 3,6                   | 14,7                |                       |
| ALIMENTAÇÃO   | 984,5          | 100          | 18,2                  | 100                 |                       |

| EFEITO DO TEMPO DE MOAGEM   |                |              |                       |                     |                       |
|---|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-2   |                |              | Data: 07/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação <i>rougher</i> com tempo de moagem de 5,0 minutos |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA   | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|   | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM  | 5,0            | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO   | 5,0            | 40,0         | Natural               | 200,0               | 75,0                  |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>  | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS  |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO   | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|   | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO   | 266,0          | 27,2         | 57,9                  | 88,6                |                       |
| REJEITO   | 710,7          | 72,8         | 2,8                   | 11,4                |                       |
| ALIMENTAÇÃO   | 976,7          | 100,0        | 17,8                  | 100,0               |                       |

| EFEITO DO TEMPO DE MOAGEM   |                |              |                       |                     |                       |
|---|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-3   |                |              | Data: 07/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação <i>rougher</i> com tempo de moagem de 7,5 minutos |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA   | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|   | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM  | 7,5            | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO   | 5,0            | 40,0         | Natural               | 200,0               | 75,0                  |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>  | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS  |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO   | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|   | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO   | 281,0          | 29,0         | 57,7                  | 92,0                |                       |
| REJEITO   | 687,8          | 71,0         | 2,1                   | 8,0                 |                       |
| ALIMENTAÇÃO   | 968,8          | 100,0        | 18,2                  | 100,0               |                       |

| EFEITO DO TEMPO DE MOAGEM  |                |              |                       |                     |                       |
|--|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-4  |                |              | Data: 12/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação <i>rougher</i> com tempo de moagem de 10,0 minutos |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA  | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|  | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM   | 10,0           | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO  | 5,0            | 40,0         | Natural               | 200                 | 75                    |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>   | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS   |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO  | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|  | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO  | 300,3          | 30,8         | 52,8                  | 93,5                |                       |
| REJEITO  | 674,5          | 69,2         | 1,6                   | 6,5                 |                       |
| ALIMENTAÇÃO  | 974,8          | 100,0        | 17,4                  | 100,0               |                       |

| EFEITO DA DOSAGEM DE QUEROSENE  |                |              |                       |                     |                       |
|---|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-5   |                |              | Data: 17/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação de grafite com variação da dosagem de querosene |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA   | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|   | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM  | 7,5            | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO   | 5,0            | 40,0         | Natural               | 150                 | 75                    |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>  | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS  |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO   | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|   | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO   | 291,5          | 29,7         | 54,3                  | 89,0                |                       |
| REJEITO   | 689,4          | 70,3         | 2,8                   | 11,0                |                       |
| ALIMENTAÇÃO   | 980,9          | 100,0        | 17,7                  | 100,0               |                       |

| EFEITO DA DOSAGEM DE QUEROSENE  |                |              |                       |                     |                       |
|---|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-6   |                |              | Data: 17/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação de grafite com variação da dosagem de querosene |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA   | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|   | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM  | 7,5            | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO   | 5,0            | 40,0         | Natural               | 250,0               | 75,0                  |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>  | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS  |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO   | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|   | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO   | 300,7          | 30,5         | 52,0                  | 89,1                |                       |
| REJEITO   | 684,2          | 69,5         | 2,6                   | 10,2                |                       |
| ALIMENTAÇÃO   | 984,9          | 100,0        | 17,7                  | 100,0               |                       |

| EFEITO DA DOSAGEM DE QUEROSENE  |                |              |                       |                     |                       |
|---|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-7   |                |              | Data: 17/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação de grafite com variação da dosagem de querosene |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA   | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|   | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM  | 7,5            | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO   | 5,0            | 40,0         | Natural               | 300,0               | 75,0                  |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>  | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS  |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO   | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|   | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO   | 296,9          | 30,0         | 52,60                 | 88,8                |                       |
| REJEITO   | 691,5          | 70,0         | 2,8                   | 11,2                |                       |
| ALIMENTAÇÃO   | 988,4          | 100,0        | 17,7                  | 100,0               |                       |

| EFEITO DA DOSAGEM DE FLOTANOL D-25   |                |              |                       |                     |                       |
|--|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-8  |                |              | Data: 18/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação de grafite variando a dosagem de Flotanol D-25 |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA  | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|  | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM   | 7,5            | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO  | 5,0            | 40,0         | Natural               | 200,0               | 50,0                  |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>   | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS   |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO  | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|  | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO  | 317,2          | 32,5         | 50,3                  | 91,4                |                       |
| REJEITO  | 659,8          | 67,5         | 2,3                   | 8,6                 |                       |
| ALIMENTAÇÃO  | 977,0          | 100,0        | 17,7                  | 100,0               |                       |

| EFEITO DA DOSAGEM DE FLOTANOL D-25   |                |              |                       |                     |                       |
|--|----------------|--------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Teste: TR-9  |                |              | Data: 18/06/2019      |                     |                       |
| Objetivo: Realizar a flotação de grafite variando a dosagem de Flotanol D-25 |                |              |                       |                     |                       |
| ETAPA  | CONDIÇÕES      |              |                       | REAGENTES (g/t)     |                       |
|  | TEMPO<br>(min) | %<br>SÓLIDOS | pH                    | Querosene<br>(100%) | Flotanol D-25<br>(1%) |
| MOAGEM   | 7,5            | 65,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| CONDICIONAMENTO  | 5,0            | 40,0         | Natural               | 200,0               | 100,0                 |
| FLOTAÇÃO<br><i>ROUGHER</i>   | 8,0            | 25,0         | Natural               | 0                   | 0                     |
| RESULTADOS   |                |              |                       |                     |                       |
| PRODUTO  | PESO           |              | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                     |                       |
|  | (g)            | (%)          | Teor                  | Distribuição        |                       |
| CONCENTRADO  | 301,0          | 30,2         | 55,6                  | 95,3                |                       |
| REJEITO  | 697,2          | 69,8         | 1,2                   | 4,7                 |                       |
| ALIMENTAÇÃO  | 998,2          | 100,0        | 17,7                  | 100,0               |                       |

| TESTE FINAL   |             |           |                       |                  |                    |
|---|-------------|-----------|-----------------------|------------------|--------------------|
| Teste: TR-10  |             |           | Data: 19/06/2019      |                  |                    |
| Objetivo: Realizar as flotações <i>cleaner I</i> , <i>cleaner II</i> e <i>cleaner III</i> com tempos de remoagem de 5,0 minutos |             |           |                       |                  |                    |
| ETAPA   | CONDIÇÕES   |           |                       | REAGENTES (g/t)  |                    |
|   | TEMPO (min) | % SÓLIDOS | pH                    | Querosene (100%) | Flotanol D-25 (1%) |
| MOAGEM  | 7,5         | 65,0      | Natural               | 0                | 0                  |
| CONDICIONAMENTO   | 5,0         | 40,0      | -                     | 200,0            | 100,0              |
| FLOTAÇÃO <i>ROUGHER</i>   | 8,0         | 25,0      | -                     | 0                | 0                  |
| REMOAGEM I  | 5,0         | -         | -                     | 0                | 0                  |
| FLOTAÇÃO <i>CLEANER I</i>   | 6,0         | -         | -                     | 0                | 50,0               |
| REMOAGEM II   | 5,0         | -         | -                     | 0                | 0                  |
| FLOTAÇÃO <i>CLEANER II</i>  | 6,0         | -         | -                     | 0                | 0                  |
| REMOAGEM III  | 5,0         | -         | -                     | 0                | 0                  |
| FLOTAÇÃO <i>CLEANER III</i>   | 6,0         | -         | -                     | 0                | 0                  |
| RESULTADOS  |             |           |                       |                  |                    |
| PRODUTO   | PESO        |           | CARBONO GRAFÍTICO (%) |                  |                    |
|   | (g)         | (%)       | Teor                  | Distribuição     |                    |
| CONCENTRADO <i>CLEANER III</i>  | 143,89      | 14,81     | 91,63                 | 78,82            |                    |
| REJEITO <i>CLEANER III</i>  | 20,10       | 2,07      | 47,46                 | 5,70             |                    |
| CONCENTRADO <i>CLEANER II</i>   | 163,99      | 16,88     | 86,22                 | 84,52            |                    |
| REJEITO <i>CLEANER II</i>   | 22,08       | 2,27      | 27,12                 | 3,58             |                    |
| CONCENTRADO <i>CLEANER I</i>  | 186,07      | 19,15     | 79,20                 | 88,10            |                    |
| REJEITO <i>CLEANER I</i>  | 77,98       | 8,02      | 6,97                  | 3,25             |                    |
| CONCENTRADO   | 264,05      | 27,18     | 57,87                 | 91,35            |                    |

|                        |        |       |       |       |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|
| <i>ROUGHER</i>         |        |       |       |       |
| REJEITO <i>ROUGHER</i> | 707,4  | 72,82 | 2,05  | 8,67  |
| ALIMENTAÇÃO            | 971,45 | 100,0 | 17,22 | 100,0 |