



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



VINICIUS GUIMARÃES SOARES

**DOSAGEM DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DE CARVÃO DE UMA
CARBONÍFERA PARANAENSE**

OURO PRETO

2024

VINICIUS GUIMARÃES SOARES

**DOSAGEM DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DE CARVÃO DE UMA
CARBONÍFERA PARANAENSE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Tratamento de Minérios

Orientador: José Aurélio Medeiro da Luz

OURO PRETO

2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinicius Guimarães Soares

Dosagem de reagentes na flotação de carvão de uma carbonífera paranaense

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia de minas

Aprovada em 23 de fevereiro de 2024.

Membros da banca

Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz — Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. Jorge Carlos Guerrero Vargas (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. Mariana Caroline Andrade Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

José Aurélio Medeiros da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Jose Aurelio Medeiros da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/03/2024, às 19:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0682558** e o código CRC **AD53B5A5**.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, por todo apoio e aprendizagem durante esses anos.

Ao projeto de Orientação Acadêmica de Engenharia de Minas, pela oportunidade de repassar conhecimentos e aprender todos os dias.

A Minera Jr., empresa júnior do curso de Engenharia de Minas, por fazer parte da minha trajetória de graduando.

A empresa Carbonífera por todo conhecimento e experiência durante o estágio em Beneficiamento de Carvão.

DEDICATÓRIA

À minha família pelo apoio durante toda minha trajetória. Aos meus amigos pela amizade e companhia nesses anos. Aos professores pelo conhecimento repassado.

RESUMO

O carvão mineral é uma rocha sedimentar composta principalmente por carbono, formada pela decomposição e fossilização de materiais orgânicos. Utilizado, principalmente para geração de energia elétrica, o carvão teve um aumento significativo de produção, sendo necessário o aproveitamento do rejeito para diminuir impactos ambientais e suprir a demanda do mineral. A flotação é uma técnica para aproveitamento das frações finas e ultrafinas do rejeito. Na flotação de carvão são utilizados hidrocarbonetos em concentrações compatíveis como facilitadores desse processo. Nesse estudo, são utilizados óleo diesel e óleo de pinho como coletor e espumante, respectivamente. Para determinar a dosagem ideal desses reagentes, testou-se concentrações diferentes dessas substâncias (152 g/t Diesel e 102 g/t Pinho, 150 g/t Diesel e 100 g/t Pinho, 149 g/t Diesel e 100 g/t Pinho, 125 g/t Diesel e 128 g/t Pinho e 124 g/t Diesel e 77 g/t Pinho. Durante os meses de Julho, Agosto e Setembro foram coletadas amostras do produto gerado das diferentes concentrações para análise de massa de flotado por litro e teor de cinzas. Ademais, em laboratório, foram realizados testes em escala de bancada para comparar a eficiência entre os espumantes óleos de pinho e FlotanolD25, mantendo todos os parâmetros da flotação fixos: rotação de condicionamento em 650 rpm, tempo de condicionamento do diesel de 5 minutos, tempo de condicionamento dos espumantes de 3 minutos e tempo de coleta de 3 minutos, variando somente os espumantes. Determinou-se para o sistema, a concentração de 124g/t de Diesel e 77 g/t de Pinho, resultando no menor teor de cinza (17,74%) com massa de sólido no flotado de 291,75 g por litro. Com isso, houve um decréscimo no teor de cinza e na concentração de reagentes utilizados nos meses de Agosto e Setembro, nos quais já havia sido padronizada a vazão do coletor e espumante. Para a comparação entre FlotanolD25 e óleo de pinho, o primeiro gera maior recuperação mássica (até 37,73%), porém, maior teor de cinzas (até 32%), acima do limite da qualidade do carvão (25%). Para os testes em que o teor de cinza do produto se manteve abaixo do limite de qualidade não houve diferenças significativas no uso dos diferentes espumantes.

Palavras-chave: Carvão Mineral. Flotação. Reagentes.

ABSTRACT

Mineral coal is a sedimentary rock composed mainly of carbon, formed by the decomposition and fossilization of organic materials. Used mainly to generate electricity, coal has seen a significant increase in production, making it necessary to use the waste to reduce environmental impacts and meet the demand for the mineral. Flotation is a technique for using the final and ultrafine fractions of waste. In coal flotation, hydrocarbons are used in compatible concentrations to facilitate this process. In this study, diesel oil and pine oil are used as collector and frother, respectively. To determine the ideal dosage of these reagents, different concentrations of these substances were tested (152 g/t Diesel and 102 g/t Pine, 150 g/t Diesel and 100 g/t Pine, 149 g/t Diesel and 100 g/t Pine, 125 g/t Diesel and 128 g/t Pine and 124 g/t Diesel and 77 g/t Pine. During the months of July, August and September, samples of the product generated from different concentrations were collected for flotation mass analysis per liter and ash content. Furthermore, in the laboratory, tests were carried out on a bench scale to compare the efficiency between the sparkling pine oils and FlotanolD25, keeping all flotation settings fixed: conditioning rotations at 650 rpm, conditioning time of diesel of 5 minutes, conditioning time of frother of 3 minutes and collection time of 3 minutes, varying only the frothers. The concentration of 124 g/t of Diesel and 77 g/t of Pine is determined for the system, resulting in the lowest ash content (17.74%) with a solid mass in the float of 291.75 g per liter. As a result, there was a decline in the ash content and concentration of reagents used in the months of August and September, in which the concentration of the collector and frother had already been standardized. For the comparison between FlotanolD25 and pine oil, the first generates greater maximum recovery (up to 37.73%), however, higher ash content (up to 32%), above the coal quality limit (25%). For tests in which the ash content of the product remained below the quality limit, there were no significant differences in the use of different frothers.

Keywords: Mineral Coal. Flotation. Reagents.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Carvão mineral | 10 |
| Figura 2 – Subprocessos de flotação de carvão | 13 |
| Figura 3 – Fatores que afetam na flotação de carvão | 17 |
| Figura 4 – Fluxograma do sistema de flotação e filtragem | 19 |
| Figura 5 – Tanques condicionadores e torneiras de saídas de reagentes..... | 21 |
| Figura 6 – Células de flotação | 22 |
| Figura 7 – Tanque de rejeito (1) e tanque de flotado (2) | 22 |
| Figura 8 – Filtro prensa | 23 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Parâmetros operacionais da flotação em bancada | 24 |
| Tabela 2 – Percentual de cinzas e massa de flotado em um litro referidos as dosagens de reagentes | 25 |
| Tabela 3 – Percentual de cinzas e massa de flotado em um litro referidos as dosagens de reagentes | 26 |
| Tabela 4 – Média dos condicionamentos 1, 2, 3 e 4 e teor de cinza e umidade do produto prensado | 26 |
| Tabela 5 – Resultados mensais dos meses de julho, agosto e setembro de 2022 | 28 |
| Tabela 6 - Resultados dos testes em bancada com uso de Flotanol D25 e Óleo de Pinho | 28 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Resultado dos condicionamentos 1, 2, 3 e 4 e teor de cinzas e massa de flotado por litro | 27 |
|--|----|

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 8 |
| 2. OBJETIVOS..... | 9 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 9 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 10 |
| 3.1. CARVÃO MINERAL | 10 |
| 3.2. USO DO CARVÃO..... | 11 |
| 3.4. BENEFICIAMENTO DE CARVÃO | 12 |
| 3.5. PROCESSO DE FLOTAÇÃO DE CARVÃO | 13 |
| 3.5.1. Reagentes para flotação..... | 14 |
| 3.5.1. Agregação na polpa de flotação de carvão | 17 |
| 3.3. CARBONÍFERA DO CAMBUÍ | 19 |
| 3.3.1. Processo de flotação do carvão..... | 19 |
| 4. METODOLOGIA..... | 21 |
| 4.1. DOSAGEM DE REAGENTES | 21 |
| 4.2. ACOMPANHAMENTO MENSAL..... | 23 |
| 4.3. AVALIAÇÃO DO ESPUMANTE..... | 23 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 25 |
| 5.1. DOSAGEM DE REAGENTES | 25 |
| 5.2. ACOMPANHAMENTO MENSAL..... | 27 |
| 5.3. AVALIAÇÃO DE ESPUMANTES | 28 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 30 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 31 |

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por carvão através dos anos acarretou um aumento de produção e, conseqüentemente, um aumento significativo no volume de rejeitos gerados nos lavadores de carvão. Por questões econômicas e ambientais, gerou-se a necessidade de avaliar métodos de beneficiamento aplicáveis a este rejeito para aproveitamento deste material com objetivo de diminuir os possíveis impactos ambientais que poderiam ser gerados pela sua disposição e, também, suprir a demanda de carvão atual. Neste contexto, têm-se a técnica de flotação como aproveitamento das frações finas e ultrafinas dos rejeitos.

Na flotação de carvão, são utilizados reagentes que reforçam a hidrofobicidade do carvão e reagentes que alteram a tensão superficial da água (espumantes), de modo a gerar uma espuma estável. Dentre os reforçadores utilizados, destaca-se o óleo diesel em função do seu desempenho. Já se tratando de espumantes, evidenciam-se o óleo de pinho e metil-isobutil-carbinol (MIBC). Porém, há no mercado outros espumantes utilizados na flotação de carvão, sendo um deles o Flotanol D25, da marca Clariant.

No presente trabalho foi estudada e analisada a dosagem apropriada de reagentes do sistema de flotação de uma carbonífera do Paraná, de forma a obter o melhor produto em termos de massa de flotado por litro de polpa e teor de cinzas. Além disso, foi avaliada a viabilidade do uso de Flotanol D25 como espumante no processo em detrimento ao óleo de pinho. O sistema de flotação da empresa conta com quatro tanques condicionadores, quatro células de flotação, dois tanques contendo o diesel e o óleo de pinho, um tanque com o produto flotado e um tanque com rejeito.

A metodologia do estudo consistiu em variar a dosagem de reagentes no processo de flotação do carvão e realizar amostragem e análises laboratoriais das amostras geradas em cada dosagem estabelecida. Ademais, foi realizado um comparativo entre as amostras coletadas para definir a melhor em termos de qualidade de carvão fino. Por fim, ainda, foi testada a viabilidade de uso de Flotanol D25 como espumante no sistema de flotação.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho foi estabelecer a dosagem de reagentes do sistema de flotação do setor de beneficiamento de rejeito de finos de uma carbonífera, de forma a obter a maior recuperação de massa e teor de cinzas baixo.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mais especificamente, pode-se listar os seguintes objetivos específicos:

- Testar diferentes combinações de concentração dos reagentes óleo diesel e óleo de pinho utilizados para flotação de finos de carvão. Foram utilizados: Teste 1 – 152 g/t Diesel e 102 g/t Pinho, Teste 2 – 150 g/t Diesel e 100 g/t Pinho, Teste 3 -149 g/t Diesel e 100 g/t Pinho, Teste 4 – 125 g/t Diesel e 128 g/t Pinho e Teste 5 – 124 g/t Diesel e 77 g/t Pinho.
- Acompanhar e comparar os resultados das análises do produto flotado com o uso de diferentes vazões de reagentes a fim de definir a dosagem que obtêm o produto de melhor qualidade, com base no teor de cinzas e massa de sólidos do flotado;
- Estudar a viabilidade do uso do espumante FlotanolD25 em comparação com o óleo de pinho por meio de testes de flotação em bancada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, informações bibliográficas sobre o carvão mineral, bem como seu processo de flotação e os reagentes utilizados nesse processo são trazidos de forma a embasar o trabalho.

3.1. CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é uma rocha sedimentar de coloração escura, composta principalmente por carbono, formada ao longo de milhões de anos a partir da decomposição e fossilização de materiais orgânicos variados. Essa fossilização ocorreu através de processos geológicos específicos, resultando em um dos principais combustíveis fósseis encontrados na natureza. Levando em consideração o período de formação e a quantidade de madeira presente na matéria original, o carvão mineral possui diferentes composições de carbono. Essa diversidade deu origem a diferentes classes de carvão e qualidades. Pode-se destacar a turfa, linhito, hulha, antracito e grafite. (Borba, 2001; Moderna Plus, 2016). A Figura 1 mostra um carvão mineral sobre uma escala quadriculada de 5 mm de lado.

Figura 1: Carvão mineral



Fonte: Acervo Pessoal, 2024

O Brasil possui depósitos de carvão do tipo turfa, linhito e hulha em diversos estados, incluindo São Paulo, Bahia e Minas Gerais. No entanto, a maior concentração de reservas encontra-se nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. (ANEEL, 2016).

O carvão brasileiro é subbetuminoso e betuminoso e apresenta alto teor de matéria volátil, enxofre e cinzas. Quando pirolisado, uma fração significativa de sua massa é liberada na forma de gases, levando a uma carbonização muito porosa. À medida que são aquecidos em atmosferas oxidantes, os carvões minerais perdem umidade e voláteis, e ocorre tanto a combustão homogênea de voláteis quanto a combustão heterogênea de carbono fixo. Além disso, a matéria mineral é oxidada dando origem a cinzas. As etapas de queima podem ser simultâneas ou sucessivas dependendo das condições operacionais e são afetadas pela taxa de aquecimento, pressão, temperatura e tamanho. (SILVA FILHO, 2008).

3.2 USO DO CARVÃO

O carvão mineral é utilizado em diversas aplicações em todo o mundo. A principal delas é a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas. Além disso, o carvão é amplamente empregado para geração de calor necessário em vários processos de produção, como a secagem de produtos, produção de cerâmicas e fabricação de vidros. Uma tendência crescente envolve a cogeração, onde o vapor no processo industrial é aproveitado para a geração de energia elétrica, ampliando ainda mais as possibilidades de uso do carvão. (ANEEL, 2016).

Além do carvão energético, existe também o carvão metalúrgico, um material poroso e leve, utilizado como combustível para altos-fornos, onde acontece a fusão de ferro e aço. É também chamado de carvão coqueificável e possui baixo teor de fosfatos e sulfetos. (Ruiz, 2009).

Qualquer que seja o equipamento utilizado para queimar carvão, a taxa de reação depende da cinética química e do transporte de massa tanto externo quanto interno à partícula. Existem várias resistências à reação a serem consideradas. Isso se deve ao transporte das espécies de gases reativos através do filme de gás que envolve a partícula, à difusão do gás através das camadas externas de cinzas, à difusão do gás através da estrutura porosa do núcleo da partícula e à resistência cinética química. O transporte de massa externo às partículas depende da mecânica dos fluidos, das propriedades das partículas, como tamanho e forma, e da concentração das partículas. O transporte de massa interno às partículas reativas depende da mecânica dos fluidos intrapartículas, do tamanho e da estrutura física das partículas (porosidade e estrutura dos poros). A resistência à cinética química é definida principalmente pela

temperatura do processo, atmosfera reagente, composição química, estrutura física e tamanho das partículas. (SILVA FILHO, 2008).

Além disso, o carvão é utilizado em processos industriais, meio agrícola, indústria química e farmacêutica, sendo seu uso em menores proporções. (Ruiz, 2009)

3.3 BENEFICIAMENTO DE CARVÃO

Após a extração e transporte, o carvão passa por um beneficiamento, na qual é submetido a processos de lavagem e purificação. O carvão bruto extraído contém impurezas como cinzas, enxofre e outros minerais indesejados. O processo de beneficiamento inclui a lavagem do carvão para remover essas impurezas. Isso é feito através de técnicas como a separação por densidade, onde o carvão é colocado em uma suspensão densa para que as impurezas sejam separadas. (Ruiz, 2009).

As cinzas são partículas inorgânicas presentes no carvão e podem afetar a eficiência da queima. A lavagem do carvão ajuda a remover uma parte significativa das cinzas, melhorando assim a qualidade do carvão e sua capacidade de geração de calor. Assim, ao remover as impurezas, o carvão beneficiado tem uma maior capacidade de geração de calor por unidade de peso. Isso é particularmente importante em aplicações como usinas térmicas, onde a eficiência da queima do carvão está diretamente relacionada ao seu teor de impurezas. (Ruiz, 2009).

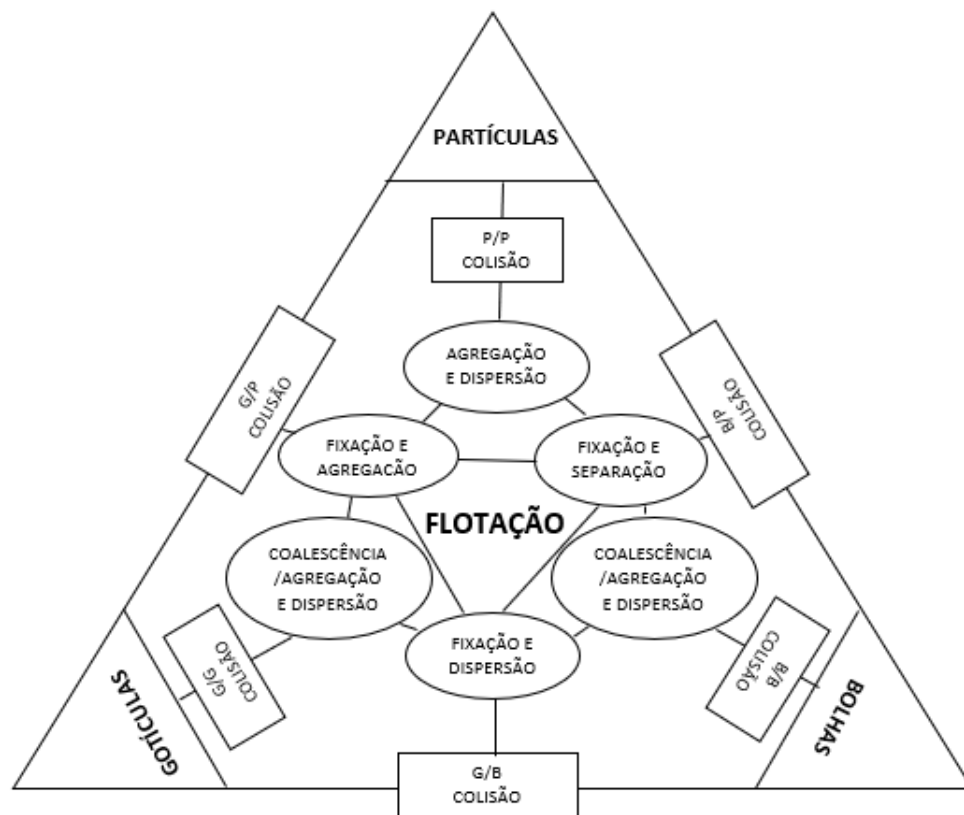
Após o beneficiamento, os produtos de carvão podem ser direcionados para atender às necessidades específicas de diferentes setores. O carvão beneficiado pode ser utilizado em diversas indústrias, como usinas térmicas para geração de energia elétrica, usinas siderúrgicas para a produção de aço, indústrias cerâmicas, entre outros segmentos que demandam carvão de qualidade específica. (Ruiz, 2019).

3.5 PROCESSO DE FLOTAÇÃO DE CARVÃO

A flotação consiste em um processo de concentração de minerais em polpa, por meio da diferença de capacidade de molhabilidade das espécies minerais. Através de bolhas de ar introduzidas nas células de flotação, as partículas hidrofóbicas aderem à sua superfície e são levitadas em uma camada de espuma até sua remoção. A flotação de carvão, geralmente, é realizada em apenas um estágio (rougher). Esse processo é auxiliar dentro do beneficiamento de carvão, cujo principal objetivo é recuperar os finos metalúrgicos. (CHAVES *et. al.*, 2009).

Existem três fases dispersas que constituem a polpa de flotação: partículas de carvão, gotículas de óleo e bolhas de ar. Estas fases interagem na água através de vários subprocessos durante a flotação que são identificados na Figura 2. Vários parâmetros afetam estes subprocessos e, portanto, o resultado do processo de flotação. (Polat, Polat, Chander, 2003).

Figura 2: Subprocessos de flotação de carvão



Fonte: Adaptado de Polat, Polat, Chander, 2003

Esses parâmetros são divididos em quatro grupos: parâmetros materiais, químicos, operacionais e de equipamentos. Os parâmetros que podem flutuar e necessitar de ajuste regularmente são referidos como parâmetros de Nível I. Aqueles que são definidos durante a fase de projeto ou após uma grande reforma são chamados de parâmetros de Nível II. Alguns parâmetros não são controlados devido a características inerentes ao material e limitações práticas, e são referidos como parâmetros de Nível III. (Polat, Polat, Chander, 2003).

A flotação de espuma convencional para limpeza de carvão fino sofre principalmente de dois problemas: falta de seletividade para carvões de alto teor devido à flotação de resíduos e ao arrastamento de finos minerais na espuma, e baixas recuperações para carvões fortemente oxidados ou carvões de baixa classificação devido à má adesão entre bolhas e partículas. Essas deficiências podem ser abordadas pela seleção de um melhor controle de processo e pelo uso de circuitos de flotação de múltiplos estágios (Polat, Polat, Chander, 2003), o que, por sua vez, requer uma boa compreensão das funções e do comportamento de vários componentes na polpa de flotação e os mecanismos envolvidos.

3.5.1 Reagentes para flotação

Hidrocarbonetos insolúveis em água são amplamente utilizados como coletores para aumentar a afinidade das partículas de carvão com as bolhas de ar. Esses coletores são basicamente óleos não polares, como querosene, petróleo bruto, óleo combustível, gasóleo e certos destilados de alcatrão de carvão (Polat, Polat, Chander, 2003). Moxton et al. (1987) observaram que a eficácia dos hidrocarbonetos saturados na flotação do carvão era uma função do tamanho da cadeia de hidrocarbonetos, sendo o dodecano os melhores resultados. Os hidrocarbonetos mais pesados sofreram com maior viscosidade, levando a uma diminuição na sua capacidade de espalhamento, enquanto os hidrocarbonetos mais leves foram perdidos nos poros da estrutura do carvão por espalhamento excessivo devido à sua baixa viscosidade. Por outro lado, Polat e Chander (1994) observaram, usando fotografia de alta velocidade, que as gotículas de óleo introduzidas em uma polpa de flotação contendo um carvão de alta classificação foram estabilizadas instantaneamente por partículas finas de carvão e produziram grandes agregados de óleo-carvão. A distribuição do tamanho das gotículas de óleo depende dos subprocessos de dispersão e coalescência, que são determinados pela intensidade da agitação mecânica, presença de promotores e partículas sólidas finas no sistema. (Polat et al.,

1999, 2000; Polat e Chander, 1994). Embora os promotores sejam comumente usados na flotação de molibdenita como emulsificantes de óleo, seu uso não é comum na flotação de carvão. Foi demonstrado em testes industriais em larga escala que a emulsificação do óleo com espumante resultou em uma melhoria significativa nos resultados globais da flotação (Laskowski, 1993; Laskowski e Romero, 1996).

Bolhas de ar são introduzidas no sistema para capturar e transportar partículas de carvão hidrofóbicas para a fase de espuma, deixando seletivamente para trás minerais de cinzas hidrofílicos. Numa célula de flotação típica, o tamanho da bolha varia de cerca de 0,5 a 1,0 mm. Uma quantidade crescente de ar de aeração na flotação amplia o espectro de flutuabilidade das partículas (Kalinowski e Kaula, 1997). Ahmed e Jameson (1983) encontraram uma forte relação entre a taxa de flotação e o tamanho da bolha. Quando o tamanho da bolha foi reduzido de 655 para 75 μm , a taxa de flotação aumentou até 100 vezes. A adsorção de um reagente promotor na interface ar/água resulta em bolhas mais finas e uma espuma estável e, portanto, afeta os subprocessos de colisão e adesão. Este é um dos usos mais frequentes de reagentes solúveis em água na flotação (espumantes).

Alguns espumantes comumente usados na flotação de carvão são metil isobutil carbinol (MIBC), polipropilenoglicol, éteres metílicos (por exemplo, Dowfroth 250), fenol e ácido cresílico. Laskowski (1993) argumentou que bons espumantes possuem cadeias ramificadas de hidrocarbonetos que tornam impossível para tais moléculas formarem filmes compactos (condensados) na interface líquido/gás. Suas propriedades hidrófilas-lipófilas devem ser adequadamente equilibradas e para a maioria dos bons espumantes os valores de HLB são próximos de 6, o que lhes permite cooperar ativamente com o coletor adsorvido no momento da fixação da partícula à bolha. Além da estabilização da espuma, sabe-se que os espumantes reduzem o tempo de indução e, portanto, aumentam a cinética de flotação. Muitos espumantes comerciais são conhecidos por terem propriedades de formação de espuma e de coleta. Horsley e Smith (1951) descobriram muito cedo que o MIBC, que não é facilmente adsorvido pelo carvão, tem pouca propriedade de coleta. Estudos recentes confirmaram a adsorção de espumantes em carvões (Frangiskos et al., 1960; Klassen e Makrousov, 1963; Jowett, 1980; Fuerstenau e Pradip, 1982; Aston et al., 1983; Gurses et al., 1992). Para linhitas, a adsorção aumentou com a oxidação e diminuiu com a desmineralização, o que sugere interações hidrofílicas entre a superfície do carvão e o espumante. Para carvões betuminosos, a adsorção aumentou pela desmineralização e diminuiu pela ligeira oxidação, o que foi explicado pelas interações hidrofóbicas entre a superfície do carvão e a molécula do espumante. De acordo com

Saleh e Iskra (1997) havia um peso molecular ideal dos espumantes de polietilenoglicol para proporcionar melhor desempenho na flotação de carvão de baixa classificação. O melhor desempenho (ou seja, alta taxa de flotação, recuperação e seletividade) do PG 600 foi atribuído à sua maior atividade superficial.

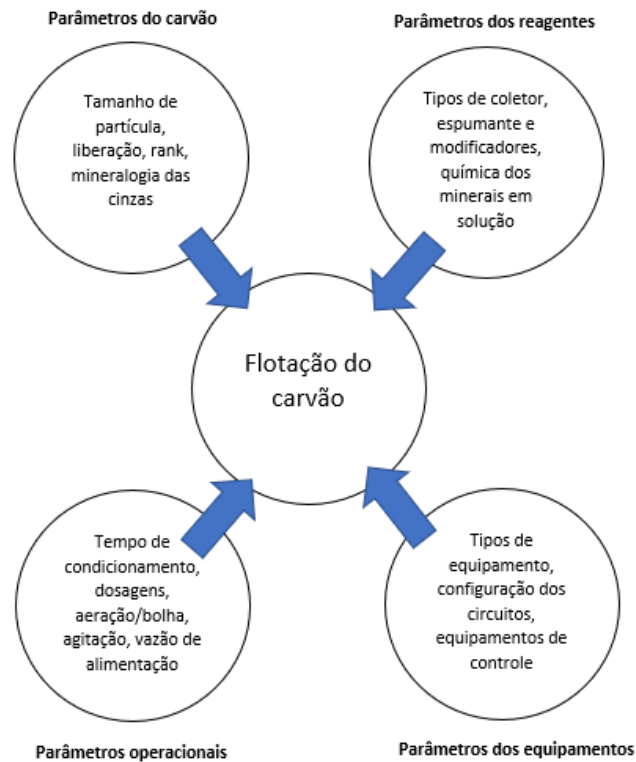
Descobriu-se que as misturas promotor-álcool flutuam no carvão ultrafino a uma taxa três a quatro vezes mais rápida do que álcoois puros ou promotores aniônicos puros (Read et al., 1989). O óleo de pinho, uma mistura de álcoois terpênicos e hidrocarbonetos, mostrou ser uma exceção a esta descoberta; exibiu constantes de velocidade mais altas do que os álcoois alifáticos puros ou outros promotores aniônicos puros estudados. Isto foi explicado pelo fato de o óleo de pinho utilizado atuar como espumante semelhante ao sistema álcool e querosene.

A fluvariabilidade do carvão também é afetada pela presença de substâncias inorgânicas dissolvidas no sistema. Num estudo dos efeitos de diferentes íons multivalentes hidrolisáveis, como Ca e Al, observou-se que a adsorção de Ca aumenta ligeiramente com o pH até 8 e depois acentuadamente acima desse valor, enquanto a do Al apresenta um aumento acentuado em torno do pH 3. –5 (Polat, Polat, Chander, 2003). A absorção acentuada destes íons metálicos parece ser governada pela formação de CaOH^+ e AlOH_2^+ . Estes resultados mostram que a adsorção de espécies multivalentes pode afetar drasticamente a hidrofobicidade do carvão e deprimir a flotação, muito provavelmente devido a tal precipitação superficial.

As concentrações de Fe, Al, Ca e Mg dissolvidos diminuem à medida que o pH aumenta, sendo irrelevante o modo de adição de álcali. Este resultado sugere que se o pH aumentar durante o processamento do carvão, haverá precipitação de espécies de íons metálicos, enquanto, se o pH diminuir, haverá dissolução de espécies minerais. (Polat, Polat, Chander, 2003). Os autores observaram uma diminuição na recuperação da flotação em grande medida sob as condições de precipitação. Eles argumentam que o precipitado de hidróxido das espécies minerais dissolvidas é adsorvido na superfície do carvão e torna a superfície hidrofílica. Concluiu-se que a presença destas espécies pode ser controlada através da manipulação do pH nas diferentes etapas do processamento dependendo do tipo de carvão.

A Figura 3 mostra um esquema que resume alguns fatores que afetam na flotação de carvão.

Figura 3: Fatores que afetam na flotação do carvão



Fonte: Adaptado de Ruiz, 2009

3.5.2 Agregação na polpa de flotação de carvão

Partículas de carvão, gotículas de óleo e bolhas de ar interagem entre si e com a água ou com espécies inorgânicas dissolvidas na água sob um determinado conjunto de condições de flotação. Embora a ligação entre as fases diferentes seja desejável, aquelas que ocorrem entre fases dispersas semelhantes, tais como partícula/partícula, gota/gotícula, bolha/bolha, são prejudiciais à flotação, uma vez que as formas dispersas de todas as três fases são necessárias para uma boa flotação. (Polat, Polat, Chander, 2003).

O grau de agregação aumenta em função da hidrofobicidade das partículas de carvão e da quantidade de coletor oleoso presente no sistema. Na flotação de carvões de alto teor, as partículas são muito difíceis de dispersar sem o uso de agentes umectantes e dispersantes especiais. Consequentemente, a agregação geralmente significa aprisionamento de partículas

de cinzas. O uso de petróleo só deverá piorar o problema de agregação entre as partículas de carvão. O tamanho, a estrutura e a composição dos agregados determinarão, portanto, a seletividade, que é o propósito da flotação de carvão. (Polat, Polat, Chander, 2003).

Estas interações são responsáveis pela seletividade na flotação em tamanhos finos. A falta de controle sobre estas interações é, em alguns casos, simplesmente devido à complexidade do processo, mas em outros casos é devido à falta de compreensão de como estas fases se comportam durante a flotação. O uso de reagentes selecionados adequados pode aumentar a flutuabilidade das partículas de carvão, evitar agregação excessiva e ao mesmo tempo emulsificar o óleo. (Polat, Polat, Chander, 2003).

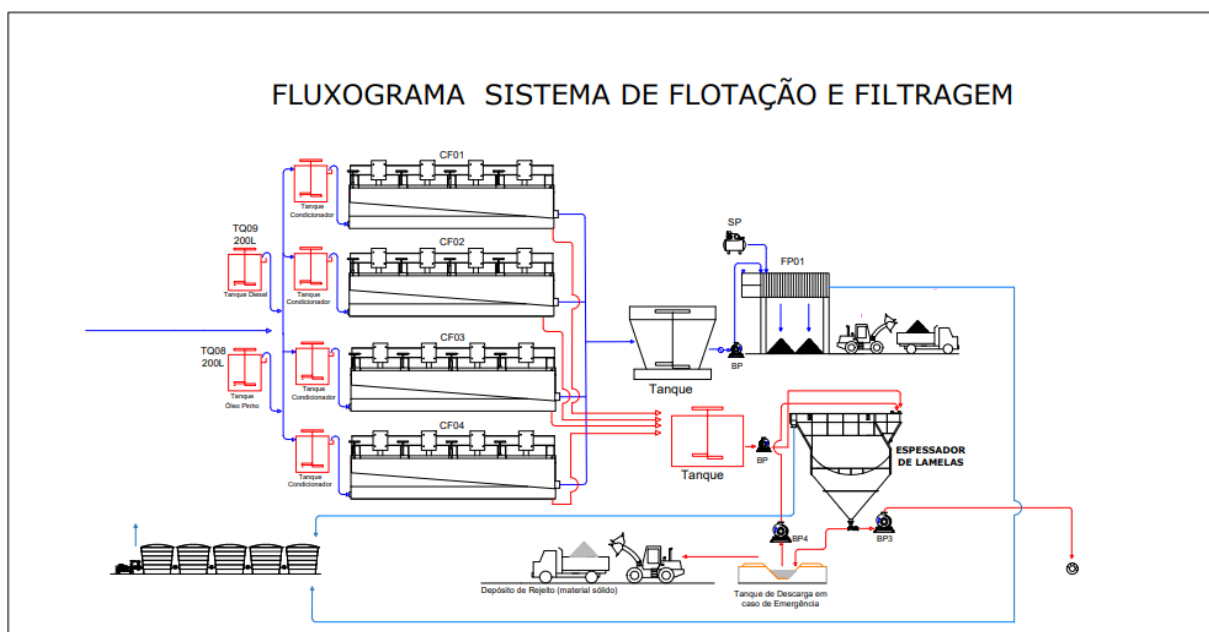
3.6 CARBONÍFERA DO CAMBUÍ

A Carbonífera do Cambuí é uma empresa voltada para a produção e comercialização de carvão, operando há mais de 75 anos no município de Figueira, no estado do Paraná. Sua produção ocorre em mina subterrânea de onde é extraído o carvão bruto (ROM) que, após passar por processos de beneficiamento em uma planta (lavador de carvão), transforma-se em carvões utilizados nas mais variadas aplicações industriais. O carvão mineral produzido pela Cambuí é classificado com um rank do tipo subbetuminoso, alto volátil. Atualmente, a Cambuí desenvolve a sua lavra na Mina-08, dentro de seu parque industrial denominado de Mina Amando Simões, onde estão localizadas suas instalações de beneficiamento de carvão mineral, como também toda sua infraestrutura de apoio. (Cambuí, s/d).

3.6.1 Processo de flotação do carvão

Atualmente, o setor de flotação da empresa é composto por 4 tanques condicionadores, 4 células de flotação, um tanque de óleo diesel, um tanque de óleo de pinho, um filtro prensa, um tanque de flotado e um tanque de rejeito. A Figura 4 abaixo representa o fluxograma do sistema:

Figura 4: Fluxograma do sistema de flotação e filtragem



Fonte: Acervo pessoal, 2022

A alimentação do rejeito fino é feita nos tanques condicionadores das células, onde, também, é depositada a concentração de reagentes, óleo de diesel e óleo de pinho, para o condicionamento. Em seguida, a polpa é direcionada às células de flotação onde ocorre o processo. O material flotado é suspenso por meio das bolhas de espumas geradas e direcionado ao tanque de flotado e o rejeito é conduzido ao tanque de rejeito. O rejeito do processo é bombeado para o espessador de lamelas e posteriormente ao seu destino. O produto flotado é bombeado para o filtro prensa, onde ocorre o processo de filtração do material, gerando um produto compacto e úmido.

Diariamente, o material filtrado é amostrado e sujeito a análises químicas no laboratório de qualidade para controle da qualidade do produto.

4 METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados com os rejeitos finos do beneficiamento de carvão do lavador da carbonífera do Paraná. Buscou-se avaliar o desempenho dos reagentes em diferentes concentrações para obter uma melhor recuperação de matéria carbonosa e um baixo conteúdo de teor de cinzas.

4.1. DOSAGEM DE REAGENTES

Os reagentes utilizados para a flotação de carvão no estudo em questão são óleo diesel e óleo de pinho. Para realizar o estudo mediu-se a vazão periódica dos reagentes. Utilizando-se uma proveta de 10 ml, coletou-se, durante 30 segundos o volume de reagente que fluía nas torneiras de saída em cada tanque de condicionamento. Dessa forma, calculou-se a vazão por hora. Essas medições eram feitas, em média, 5 vezes por dia, de forma a corrigir as variações de vazões que poderiam acontecer. Foram testadas e medidas diferentes combinações de volume horário entre o diesel e o óleo de pinho. Para todas as combinações realizadas foram feitas análises químicas em laboratório dos produtos obtidos, tanto da polpa flotada quanto do produto filtrado prensado. A avaliação do concentrado era baseada na massa de flotado por litro de polpa e teor de cinzas obtidas da polpa flotada.

Figura 5: Tanques condicionadores e torneiras de saída de reagentes



Fonte: Acervo pessoal, 2022

Figura 6: Células de flotação



Fonte: Acervo pessoal, 2022

Figura 7: Tanque de rejeito (1) e tanque de flotado (2)



Fonte: Acervo pessoal, 2022

Figura 8: Filtro prensa



Fonte: Acervo pessoal, 2022

4.2. ACOMPANHAMENTO MENSAL

Durante os estudos, foi realizado um controle diário, por meio da análise do produto filtrado e prensado. Diariamente, uma amostra deste produto foi analisada no laboratório de qualidade seguindo as variáveis: porcentagem de cinzas, umidade, produção e horas trabalhadas. O controle foi feito durante os meses de julho, agosto e setembro de 2022.

4.3. AVALIAÇÃO DO ESPUMANTE

Inicialmente mantiveram-se os padrões operacionais do processo de flotação em bancada fixos e variou-se o uso de dois espumantes para que a comparação e análise dos resultados de recuperação mássica e porcentagem de cinzas pudesse ser feita. Dessa forma, para padronizar e direcionar os testes, foram estabelecidos e fixados parâmetros, apresentados na Tabela 1, para todos os ensaios realizados.

Tabela 1: Parâmetros operacionais da flotação em bancada

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| Rotação de condicionamento | 650 rpm |
| Tempo de condicionamento | Diesel 5 min Espumante 3 min |
| Volume da cuba utilizada | 3 L |
| Rotação uniforme utilizada | 750 rpm |

No total foram realizados 12 testes de flotação em duplicata, com 3 diferentes volumes de reagentes, sendo elas: 0,3 ml de diesel e 0,2 ml de óleo de pinho e FlotanolD25, 0,2 ml de diesel e 0,2 ml de óleo de pinho e FlotanolD25 e 0,2 ml de diesel e 0,1 ml de óleo de pinho e FlotanolD25. Em todos os testes o tempo de coleta foi de 3 minutos. A polpa utilizada nos ensaios foi coletada diretamente na saída do circuito de finos do beneficiamento e possui 6,5% de sólidos, 66,91% de cinzas e 3,26% de enxofre.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse tópico aborda os resultados das comparações de dosagem de reagentes e a definição da melhor concentração obtida baseado nas análises laboratoriais, bem como o acompanhamento do produto da flotação durante os meses de julho, agosto e setembro de 2022. Além disso, discute acerca da avaliação do espumante Flotanol D25.

5.1 DOSAGEM DE REAGENTES

A alimentação do sistema considerada foi de 17 t/h com rotação de condicionamento de 650 rpm. Inicialmente, eram utilizadas no condicionamento do processo de flotação as dosagens de reagentes da linha do “Teste 1”. Com intuito de padronizar todas as células e aumentar a porcentagem de sólidos na polpa flotada, foram realizados novos testes com diferentes dosagens, representados pelos testes 2, 3, 4 e 5 nas Tabela 2 e Tabela 3:

Tabela 2: Percentual de cinzas e massa de flotado em um litro referidos as dosagens de reagentes

| Teste | CONDICIONAMENTO 1 | | | | CONDICIONAMENTO 2 | | | |
|-------|-------------------|----------------|--------------|----------------|-------------------|----------------|--------------|----------------|
| | Diesel (g/t) | Pinho (g/t) | Cinza (%) | Massa (g/l) | Diesel (g/t) | Pinho (g/t) | Cinza (%) | Massa (g/l) |
| 1 | 87 | 91 | 12,06 | 212,5 | 249 | 119 | 18,64 | 112,5 |
| 2 | 77 | 72 | 14,13 | 202,0 | 242 | 139 | 19,35 | 183,0 |
| 3 | 68 | 70 | 13,80 | 263,0 | 253 | 130 | 18,22 | 264,0 |
| 4 | 126 | 142 | 15,80 | 259,0 | 126 | 119 | 17,41 | 258,0 |
| 5 | 124 | 77 | 14,52 | 308,0 | 124 | 77 | 15,41 | 285,0 |

Tabela 3: Percentual de cinzas e massa de flotado em um litro referidos as dosagens de reagentes

| Teste | CONDICIONAMENTO 3 | | | | CONDICIONAMENTO 4 | | | |
|-------|-------------------|----------------|--------------|----------------|-------------------|----------------|--------------|----------------|
| | Diesel (g/t) | Pinho (g/t) | Cinza (%) | Massa (g/l) | Diesel (g/t) | Pinho (g/t) | Cinza (%) | Massa (g/l) |
| 1 | 117 | 119 | 17,63 | 475,7 | 157 | 77 | 23,94 | 121,0 |
| 2 | 133 | 119 | 25,45 | 131,0 | 148 | 70 | 23,53 | 136,0 |
| 3 | 127 | 128 | 23,40 | 207,0 | 147 | 74 | 21,31 | 275,0 |
| 4 | 127 | 128 | 22,63 | 331,0 | 124 | 122 | 32,24 | 229,0 |
| 5 | 124 | 77 | 18,20 | 325,0 | 124 | 77 | 22,18 | 249,0 |

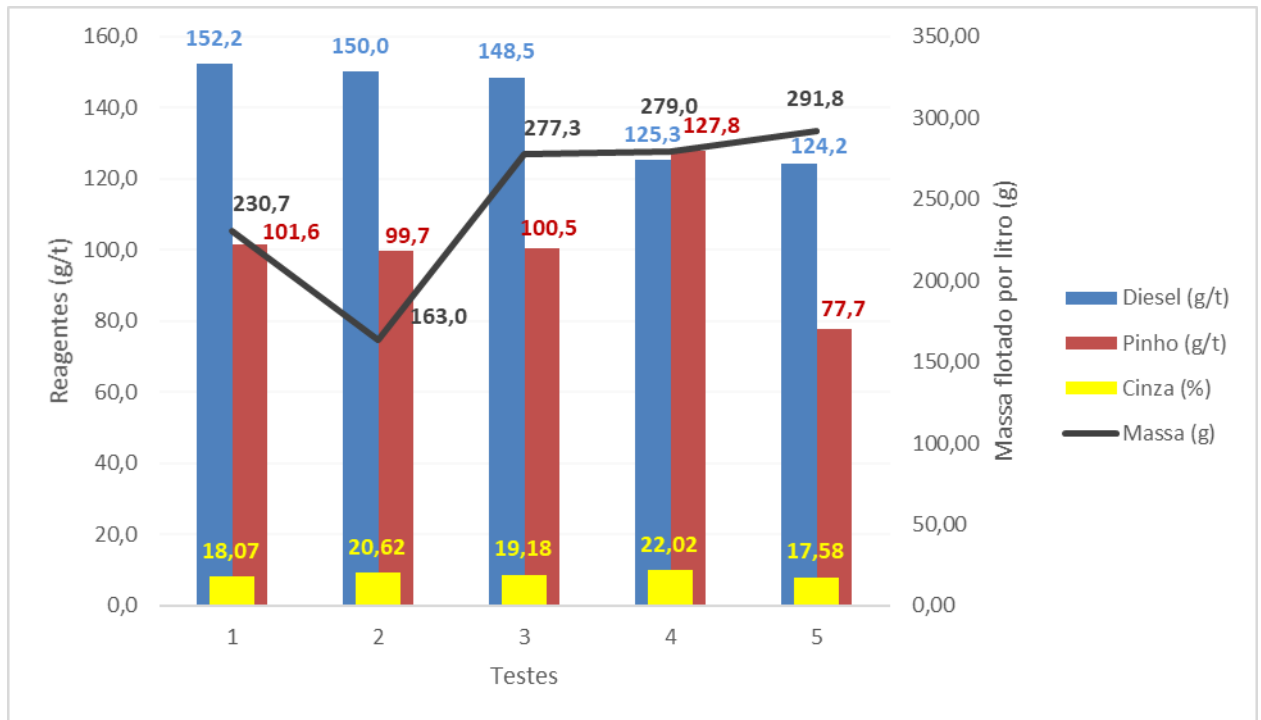
A Tabela 4 apresentada a média dos quatro condicionamentos, junto com o teor de cinzas e massa de sólidos da polpa flotada e o teor de cinzas e umidade do produto prensado.

Tabela 4: Média dos condicionamentos 1, 2, 3 e 4 e teor de cinza e umidade do produto prensado

| Teste | CONDICIONAMENTOS | | | | PRENSADO | |
|-------|------------------|----------------|--------------|----------------|---------------|-----------------|
| | Diesel (g/t) | Pinho (g/t) | Cinza (%) | Massa (g/l) | Cinza (ml) | Umidade (ml) |
| 1 | 152 | 102 | 18,07 | 230,7 | 23,7 | 35,7 |
| 2 | 150 | 100 | 20,62 | 163,0 | 23,9 | 36,9 |
| 3 | 149 | 100 | 19,18 | 277,3 | 21,9 | 36,4 |
| 4 | 125 | 128 | 22,02 | 279,0 | 20,3 | 36,6 |
| 5 | 124 | 77 | 17,58 | 291,75 | 17,5 | 37,7 |

O Gráfico 1 apresenta os resultados da Tabela 4:

Gráfico 1: Resultado dos condicionamentos 1, 2, 3 e 4 e teor de cinza e massa de flotado por litro



Nota-se que com a diminuição da concentração dos reagentes utilizados, o teor de cinzas diminuiu para 17,58% e, em contrapartida, a massa de flotado por litro na polpa aumentou, atingindo 291,8 g. Dessa forma, para essa condição, respeitando o limite de qualidade da empresa de 25% de teor de cinzas, definiu-se a concentração de diesel e óleo de pinho de 124 g/t e 77 g/t, respectivamente, especificado no Teste 5.

5.2 ACOMPANHAMENTO MENSAL

A partir da porcentagem de cinzas, umidade, produtividade e horas trabalhadas, foram gerados relatórios de resultados dos meses de julho, agosto e setembro de 2022, conforme Tabela 5 abaixo:

Tabela 5: Resultados mensais dos meses de julho, agosto e setembro de 2022

| Mês | Prensado | | | Hora Trab. (h) | Aliment. (T) | Rec (%) | Prod. (T/h) | Diesel | | Pinho | |
|----------|---------------|----------|-------------|----------------------|-----------------|------------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | Cinzas (%) | Umid.(%) | Peso (T) | | | | | L/mês | g/T | L/mês | g/T |
| Julho | 25,26 | 35,03 | 92,24 | 121,95 | 1848,14 | 4,99 | 0,756 | 316,29 | 150,60 | 223,32 | 115,72 |
| Agosto | 21,72 | 37,13 | 107,57 | 142,26 | 2452,56 | 4,39 | 0,756 | 341,42 | 122,50 | 242,30 | 90,59 |
| Setembro | 22,78 | 36,16 | 103,14 | 124,68 | 2221,71 | 4,84 | 0,827 | 299,23 | 118,52 | 179,54 | 74,10 |

Nota-se um decréscimo no teor de cinzas e uso de menor concentração de reagentes do mês de julho para os meses seguintes. Para o mês de Julho, obteve-se 25,26% de teor de cinzas no prensado, enquanto para os meses de Agosto e Setembro, obteve-se 21,72% e 22,78%, respectivamente. Além disso, as concentrações dos reagentes diminuíram de 150,60 g/t de diesel e 115,72 g/t de óleo de pinho, referentes ao mês de Julho, para 122,50 g/t de diesel e 90,59 g/t de óleo de pinho no mês de Agosto e 118,52 g/t de diesel e 74,10 g/t de óleo de pinho no mês de setembro.

Devido a dosagem dos reagentes ser realizada de forma manual, sendo necessário o acompanhamento periodicamente, é justificável a variação da dosagem em relação aos valores de 124 g/t de diesel e 77 g/t de óleo de pinho estabelecidos nos meses de Agosto e Setembro, nos quais iniciou a padronização da dosagem.

5.3 AVALIAÇÃO DO ESPUMANTE

Na Tabela 6 serão apresentados os resultados dos testes de flotação em bancada utilizando os dois diferentes espumantes já citados:

Tabela 6: Resultados dos testes em bancada com uso de Flotanol D25 e Óleo de Pinho

| Teste | %Sol p.v | Peso Sol.(g) | Diesel (ml) | Pinho (ml) | Flotanol (ml) | Flotado total | | | | Rejeito | |
|-------|-------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|----------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|
| | | | | | | Flotado (g) | Rec (%) | Enx (%) | Cinza (%) | Cinza (%) | Enx (%) |
| 1 | | | 0,3 | 0,2 | - | 58 | 25,49 | 3,76 | 25,02 | 82,86 | 2,95 |
| 2 | | | 0,3 | 0,2 | - | 58 | 25,49 | 3,77 | 25,60 | 81,01 | 2,96 |
| 3 | | | 0,3 | - | 0,2 | 79 | 34,73 | 4,06 | 32,42 | 83,67 | 2,85 |
| 4 | | | 0,3 | - | 0,2 | 61 | 26,81 | 3,51 | 26,86 | 81,92 | 3,07 |
| 5 | | | 0,2 | 0,2 | - | 53 | 23,30 | 2,88 | 22,12 | 78,53 | 3,13 |
| 6 | 6,5 | 227,5 | 0,2 | 0,2 | - | 46 | 20,22 | 2,95 | 20,18 | 78,88 | 2,93 |
| 7 | | | 0,2 | - | 0,2 | 64 | 28,13 | 3,03 | 24,66 | 80,73 | 2,70 |
| 8 | | | 0,2 | - | 0,2 | 63 | 27,69 | 3,03 | 26,07 | 80,82 | 3,09 |
| 9 | | | 0,2 | 0,1 | - | 60 | 26,37 | 3,20 | 19,44 | 80,81 | 3,24 |
| 10 | | | 0,2 | 0,1 | - | 54 | 23,74 | 3,23 | 19,98 | 80,05 | 3,19 |
| 11 | | | 0,2 | - | 0,1 | 65 | 28,57 | 3,46 | 23,02 | 79,69 | 3,16 |
| 12 | | | 0,2 | - | 0,1 | 56 | 24,62 | 3,33 | 23,66 | 81,60 | 3,17 |

As duplicatas são os seguintes testes: 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6, 7 e 8. 9 e 10, 11 e 12. Totalizando 12 testes em duplicata. Iniciou-se os testes utilizando 0,3 ml de coletor e 0,2 ml de espumantes, condições essas estabelecidas previamente pelo laboratório sem critérios definidos.

Observa-se que os testes com flotanol D25 obtiveram uma maior recuperação. Para a 0,3 ml de Diesel e 0,2 ml de Flotanol D25, obteve-se 34,73% e 26,81%, para 0,2 ml de Diesel e 0,2 ml de Flotanol D25, 28,13% e 27,69% e para 0,2 ml de Diesel e 0,1 ml de Flotanol D25, 28,57% e 24,62%. Em contrapartida, o teor de cinzas para essas condições foi maior do que para os testes realizados com o óleo de pinho. Porém, nota-se, que para determinada dosagem dos reagentes, como ocorreu nos testes 9, 10, 11 e 12, a diferença entre os dois espumantes não é significativa, obtendo até 26,37% de recuperação mássica para o óleo de pinho e 28,57% para o Flotanol D25. Enquanto, a porcentagem de cinzas ficou em 19,44% para o primeiro e 23,66% para o segundo.

6 CONCLUSÕES

Após combinações de reagentes testadas, concluiu-se que o melhor resultado se deu com a utilização 124 g/t de Diesel e 77 g/t de Pinho, resultando no menor teor de cinza (17,74%) com massa de sólido em um litro de polpa flotada de 291,75 g.

Com a padronização da dosagem dos reagentes houve um decréscimo no teor de cinza, de 25,26% para 21,72% e 22,78%. Nota-se que no mês de Julho, início dos testes, a concentração de reagentes era maior (150,60 g/t de diesel e 115,72 g/t de óleo de pinho), juntamente com o teor de cinza elevada (25,26%). Para os meses seguintes, houve a diminuição da concentração dos reagentes e porcentagem de cinzas do produto, devido a padronização definida. Para o mês de Agosto, utilizou-se 122,50 g/t de diesel e 90,59 g/t de óleo de pinho, obtendo 21,72% de teor de cinzas e para o mês de Setembro, com a concentração de 118,52 g/t de diesel e 74,10 g/t de óleo de pinho, resultou-se em 22,78% de teor de cinzas.

Levando em consideração a comparação entre o espumante FlotanolD25 e o Óleo de Pinho, conclui-se que, em termos de recuperação mássica e teor de cinzas, o Flotanol D25 possui maior recuperação, em contrapartida, também, gera maior teor de cinzas. Para a 0,3 ml de Diesel e 0,2 ml de Flotanol D25, obteve-se 34,73% e 26,81% de recuperação mássica e 32,42% e 26,86% de cinzas, para 0,2 ml de Diesel e 0,2 ml de Flotanol D25, 28,13% e 27,69% de recuperação mássica e 24,66% e 26,07% de cinzas e para 0,2 ml de Diesel e 0,1 ml de Flotanol D25 obteve-se 28,57% e 24,62% de recuperação mássica e 23,02% e 23,66% de cinzas. Para os testes em que o teor de cinza do produto se manteve abaixo do limite de qualidade considerado (25%), não houve diferenças significativas no uso dos diferentes espumantes. Dessa forma, para a conclusão de mudança de utilização de um ou de outro, é necessário incluir questões financeiras dos dois espumantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, N., JAMESON, G.J., 1983. The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles. **Int. J. Miner. Process.** 14, 195 – 215.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica , 2016.
<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf >

Borba RF. **Carvão mineral - Balanço mineral brasileiro**, 2001.

Carbonífera do Cambuí, 2023. <<https://www.carboniferadocambui.com.br/> >

FRANGISKOS, N.Z., HARRIS, C.C., JOWET, A., 1960. The adsorption of frothing agents on coals. 3rd Int. **Congress of Surface Activity**, Koln

FUERSTENAU, D.W., PRADIP, 1982. Adsorption of frothers at coal/ water interface. **Colloids Surf.** 4, 229 – 243.

GURSES, A., BAYRAKCEKEN, S., GULABOGLU, M., 1992. Adsorption of O-cresol from aqueous solution on coal. **Colloids Surf.** 64 (1), 7 – 13.

JOWETT, A., 1980. Formation and disruption of particle – bubble aggregates in flotation. In: Somasundaran, P. (Ed.), **Fine Particles Processing**, vol. 1, pp. 720 – 754. Chapter 37.

KALINOWSKI, K., KAULA, R., 1997. Effect of the intensity of aeration air on the floatability distribution in batch coal flotation experiments. **Fuel Energy Abstr.** 38 (3), 137.

KLASSEN, V.I., MAKROUSOV, V.A., 1963. **An Introduction to the Theory of Flotation.** Butterworth, London.

LASKOWSKI, J.S., ROMERO, D., 1996. The use of reagents in coal flotation. **Fuel Energy Abstr.** 37 (5), 335

LASKOWSKI, T.S., 1993. Frothers and flotation froth. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 12, 61 – 89.

MENEZES, Carlyle Torres Bezerra de e ESCOBAR, André Taboada e CHAVES, Arthur Pinto. Flotação do carvão no Brasil. **Teoria e prática do tratamento de minérios: a flotação no Brasil**. Tradução. São Paulo: Signus, 2009.

Moderna Plus. **Carvão mineral**, 2016.

MOXTON, N.T., KEAST-JONES, B., Nicol, S.K., 1987. Insoluble oils in coal flotation: the effects of surface spreading and pore penetration. **Int. J. Miner. Process.** 21, 261 – 274.

POLAT, M., POLAT, H., CHANDER, S. Physical and chemical interactions in coal flotation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 72, n. 1, p. 199-213, 2003.

READ, R.B., CAMP, L.R., SUMMERS, M.S., RAPP, D.M., 1989. The influence of reagent type on the kinetics of ultrafine coal flotation. **Powder Technol.** 59 (3), 153 – 162.

SALEH, A.M., ISKRA, J., 1997. The synergistic effect of frother and promoter in the flotation of low rank coal. **Fuel Energy Abstr.** 38 (2), 70.

SILVA FILHO, Claudionor Gomes da; MILIOLI, Fernando Eduardo. A thermogravimetric analysis of the combustion of a Brazilian mineral coal. **Química Nova**, v. 31, p. 98-103, 2008. <<https://www.scielo.br/j/qn/a/m3y9ZSNBRTNghRCKgWJGr3D/?format=pdf&lang=en> >