



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS ARARANGUÁ, CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE  
CURSO ENGENHARIA DE ENERGIA

Jonathan Tonello

**Beneficiamento do carvão mineral catarinense da camada Bonito visando à  
produção de materiais à base de grafeno**

Araranguá, SC  
2024

Jonathan Tonello

**Beneficiamento do carvão mineral catarinense da camada Bonito visando à  
produção de materiais à base de grafeno**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Virmond.  
Coorientador: Dr. Thiago Fernandes de Aquino.

Araranguá, SC

2024

Tonello, Jonathan

Beneficiamento do carvão mineral catarinense da camada Bonito visando à produção de materiais à base de grafeno / Jonathan Tonello ; orientadora, Elaine Virmond, coorientador, Thiago Fernandes de Aquino, 2024.

53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Carvão mineral. 3. Nanomateriais. 4. beneficiamento. 5. Redução de cinzas. I. Virmond, Elaine. II. Aquino, Thiago Fernandes de. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. IV. Título.

Jonathan Tonello

**Beneficiamento do carvão mineral catarinense da camada Bonito visando à produção de materiais à base de grafeno**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Elaine Virmond, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Tiago Elias Allievi Frizon, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

André Smaniotto, MSc.  
Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina - SATC

Videoconferência pelo Google Meet, 06 de dezembro de 2024.

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Profa. Carla de Abreu D'Aquino, Dra.  
Coordenadora do Curso

Profa. Elaine Virmond, Dra.  
Orientadora

Jonathan Tonello  
Autor

Araranguá, 06 de dezembro de 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

O autor manifesta profundo agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), cujo apoio financeiro, por meio do projeto 2021TR2151, foi essencial para a concretização deste trabalho. Estende também sua gratidão ao laboratório do NUDAPE – UFSC pela oportunidade de integrar o projeto, e à SATC, juntamente com toda sua equipe técnica, cuja excelência e dedicação na disponibilização da infraestrutura, no compartilhamento de conhecimentos e na troca de experiências, foram fatores fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste estudo.

## RESUMO

O carvão mineral é um recurso de grande relevância na matriz energética global, mas com a Lei nº 14.299/2022 (Programa de Transição Energética Justa - TEJ), a Lei nº 18.330/2022 (Política Estadual de TEJ) e o Decreto nº 11.124/2022, que trata do Conselho e do Plano de Transição Justa para a região carbonífera de SC, buscam-se alternativas ao seu uso. Uma solução é sua aplicação como precursor de nanomateriais de carbono, como o grafeno, que exige carvão com baixo teor de cinzas e alta pureza para garantir eficiência e boas propriedades elétricas. Neste trabalho, as características do carvão mineral da camada Bonito/SC foram analisadas e processos físicos de beneficiamento foram aplicados com o intuito de se obter um produto com menor teor de matéria mineral, mais adequado para a síntese de óxido de grafeno. Amostras de carvão de uma mineradora do sul catarinense foram coletadas em diferentes estágios do processo de beneficiamento da mineradora, pré-tratadas e caracterizadas em parceria com o Centro Tecnológico da SATC (Criciúma/SC). Elas foram submetidas a diversos ensaios de flotação em bancada, variando-se a razão sólido/líquido (4%, 6% e 8%) na cuba, o tempo de flotação (15 s, 30 s, 60 s e 120 s) e a concentração dos reagentes utilizados (óleo de pinho: 100 g/t, 300 g/t e 500 g/t de carvão, e óleo diesel: 600 g/t, 1000 g/t e 1400 g/t de carvão), além disso, análises de granulometria foram feitas para avaliar a porcentagem de cinzas que cada fração possuía antes e após o processo de reflotação. A amostra inicial de carvão coletada na mineradora apresentou teor de cinzas de 58,38% (b.s.) e, a partir dela, conseguiu-se resultados promissores, chegando próximo dos 11% (b.s.) de cinzas, mostrando que os métodos de beneficiamento aplicados ao carvão da camada Bonito foram eficazes na redução da fração mineral, possibilitando novas aplicações comerciais para o carvão regional.

**Palavras-chave:** Pré-tratamento; Carvão mineral; Redução de cinzas; Nanomateriais.

## ABSTRACT

Mineral coal is a highly relevant resource in the global energy matrix. However, with Law No. 14,299/2022 (Just Energy Transition Program - TEJ), Law No. 18,330/2022 (State Policy on TEJ), and Decree No. 11,124/2022, which addresses the Council and the Just Transition Plan for the coal mining region of Santa Catarina, alternatives to its use are being sought. One solution is its application as a precursor for carbon nanomaterials, such as graphene, which requires coal with low ash content and high purity to ensure efficiency and superior electrical properties. In this study, the characteristics of coal from the Bonito seam in Santa Catarina were analyzed, and physical beneficiation processes were applied to produce a material with reduced mineral matter content, making it more suitable for graphene oxide synthesis. Coal samples from a mining company in southern Santa Catarina were collected at different stages of the company's beneficiation process, pre-treated, and characterized in collaboration with the SATC Technological Center (Criciúma, SC). These samples underwent various bench flotation tests, varying the solid-to-liquid ratio (4%, 6%, and 8%) in the cell, flotation time (15s, 30s, 60s and 120s), and reagent concentrations (pine oil: 100 g/t, 300 g/t and 500 g/t of coal, and diesel oil: 600 g/t, 1000 g/t, and 1400 g/t of coal). Additionally, granulometry analyses were conducted to evaluate the ash content of each fraction before and after the re-flotation process. The initial coal sample collected at the mining company had an ash content of 58.38% (dry basis). From this, promising results were achieved, reducing the ash content to approximately 11% (dry basis), demonstrating that the beneficiation methods applied to the coal from the Bonito seam were effective in reducing ash content and enabling new commercial applications for the regional coal.

**Keywords:** Pretreatment; Mineral coal; Ash reduction; Carbon nanomaterials.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das tecnologias de beneficiamento para carvões de baixo <i>rank</i> .....	15
Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas.....	23
Figura 3 – Fluxograma do beneficiamento do carvão .....	24
Figura 4 – Célula de flotação da empresa onde foram realizadas as coletas de amostras para os ensaios de flotação em bancada laboratorial.....	24
Figura 5 – Recipientes utilizados para armazenamento das amostras. ....	25
Figura 6 – Equipamento de filtração à vácuo. ....	26
Figura 7 – Amostras na estufa após o processo de filtração.....	26
Figura 8 – Amostras na mufla para a análise do teor de cinzas.....	28
Figura 9 – Amostra na peneira de separação granulométrica.....	29
Figura 10 – Célula de flotação em escala de bancada.....	30



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Revisão da literatura sobre flotação de carvão mineral.....	17
Tabela 2 – Massa das amostras coletadas. ....	27
Tabela 3 – Testes de parametrização da célula de flotação. ....	31
Tabela 4 – Análise imediata das amostras brutas.....	32
Tabela 5 – Análise imediata das amostras brutas.....	33
Tabela 6 – Análise imediata das amostras brutas.....	37
Tabela 7 – Teor de cinzas da amostra C1 e C2 com o parâmetro F2.....	41
Tabela 8 – Teor de cinzas da amostra C1 e C2 com o parâmetro F21.....	41
Tabela 9 – Separação granulométrica e teor de cinzas da amostra C1 .....	42
Tabela 10 – Separação granulométrica e teor de cinzas da amostra C2.....	42
Tabela 11 – Teor de cinzas da mistura das amostras pela granulometria .....	43
Tabela 12 – Análise da flotação com o parâmetro F2 das amostras granulométricas .....	44
Tabela 13 – Análise da flotação com o parâmetro F21 das amostras granulométricas .....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	Antes do flotador – corrente de finos
ASTM	American Society for Testing and Materials
b.s	base seca
C1	Célula 1
C2	Célula 2
CE	Carvão Energético
CTJL	Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda
CZ	Cinzas
g/t	gramas por tonelada
kg	quilograma
m <sup>3</sup>	metro cúbico
MIBC	Metil Isobutil Carbinol
min	Minutos
MOF	metal-organic framework
MW	Megawatt
OD	Óleo diesel
OP	Óleo de pinho
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
QS	Querosene
R.C	Redução de cinzas
rpm	rotações por minuto
s	segundos
SC	Santa Catarina
TEJ	Transição Energética Justa

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>14</b>
2.1 CARVÃO COMO PRECURSOR DE NANOMATERIAIS DE CARBONO .....	14
2.2 FLOTAÇÃO .....	16
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
3.1 ORIGEM E COLETA DAS AMOSTRAS.....	23
3.2 PRÉ-TRATAMENTO DAS AMOSTRAS.....	26
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	28
3.4 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	29
3.5 BENEFICIAMENTO/ENSAIO DE FLOTAÇÃO .....	29
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>32</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS BRUTAS.....	32
4.2 ENSAIOS DE PARAMETRIZAÇÃO.....	33
4.3 FLOTAÇÃO EM BANCADA DAS AMOSTRAS C1 E C2.....	40
4.4 SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA E MISTURA .....	42
4.5 FLOTAÇÃO EM BANCADA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS .....	43
<b>5 ANÁLISE ECONÔMICA .....</b>	<b>45</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Carrisso *et al.* (1995), o carvão mineral é formado a partir de plantas que cresceram em ambientes úmidos e pantanosos, onde foram soterradas por sedimentos e, ao longo do tempo, foram transformadas em carvão devido à pressão e ao calor. Embora existam diferentes teorias sobre a sua formação, todas elas destacam a importância da pressão e do calor na transformação da matéria orgânica que é gradualmente soterrada por sedimentos e rochas. Com o tempo, as camadas sedimentares sofrem alterações físicas e químicas até se tornarem carvão.

Conforme a ASTM D388, o carvão é classificado com base em várias características, como as concentrações de carbono fixo, matéria volátil, cinzas, enxofre e o poder calorífico. Dentro desse sistema, existem quatro principais tipos de carvão. O antracito é caracterizado por ter um alto teor de carbono fixo, geralmente acima de 86%, e baixo teor de voláteis, resultando em alto poder calorífico e baixos níveis de cinzas e enxofre. A hulha (betuminoso) possui níveis moderados de carbono fixo (normalmente entre 45% e 86%) e matéria volátil, tornando-o versátil para uso industrial e geração de energia. O sub-betuminoso tem menor teor de carbono fixo em comparação com a hulha (geralmente abaixo de 45%) e maior quantidade de substâncias voláteis; é frequentemente utilizado em usinas termelétricas. Já o linhito tem menor teor sólido de carbono, muitas vezes inferior a 25%, apresentando alto teor de substâncias voláteis, maior quantidade de cinzas e poder calorífico mais baixo em comparação com outros tipos de carvão.

O carvão mineral é um recurso de grande relevância na matriz energética global e tem desempenhado um papel crucial na história industrial e energética. Sua utilização abrange desde a geração de energia elétrica até aplicações na indústria de aço, cimento, cerâmica, papel e celulose (EPE, 2024).

No cenário mundial, países como Estados Unidos, Rússia, China, Índia e Austrália concentram as maiores reservas de carvão mineral. A produção global, embora tenha declinado desde os anos 90, ainda mantém sua relevância como fonte energética. O consumo, liderado pela China, é predominantemente voltado para a geração de energia elétrica, mas também se estende a outras indústrias (ENERGY INSTITUTE, 2023).

No contexto brasileiro, o país possui reservas de carvão, especialmente no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e no Paraná. A maior parte da produção nacional

é destinada às usinas termoeletricas, mas a demanda para aplicação industrial, especialmente na siderurgia, é alta, no entanto, requer carvões de melhor qualidade. Diante disso, o Brasil ainda importa mais de 67% ( $14.585 \times 10^3$  toneladas) do carvão consumido (EPE, 2024).

Segundo o Anuário de Mineração Estadual (ANM, 2019), as reservas de carvão de Santa Catarina são estimadas em 1,5 bilhões de toneladas. O carvão do estado é utilizado principalmente para produção de energia térmica, mas também é utilizado nas indústrias metalúrgica e química. O estado de Santa Catarina (SC), desde 2010, é responsável por mais de 46% da produção nacional de carvão mineral beneficiado no Brasil, tendo a sua economia baseada na extração do carvão, com destaque também para a produção de energia elétrica a partir dele (SIECESC, 2022). A indústria de mineração de carvão tem desempenhado um papel fundamental na economia do estado, gerando empregos e contribuindo para o crescimento do setor de energia, particularmente representado pelo Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), com capacidade instalada de 857 MW por ano, o que equivale a cerca de 25% do consumo do estado.

A bacia carbonífera do estado é caracterizada principalmente por dois tipos de carvão, onde suas características podem variar dependendo da região e da profundidade da extração, com suas duas camadas notáveis, a Bonito, localizada em profundidades intermediárias, possui um teor de carbono mais alto e baixos níveis de impurezas, tornando-a adequada para aplicações industriais e na indústria siderúrgica. Já a Barro Branco, situada mais próxima da superfície, possui teor de carbono mais baixo e níveis variáveis de impurezas, sendo frequentemente utilizado na geração de eletricidade (REDIVO, 2002).

Com a institucionalização da Lei Ordinária Nacional nº 14.299, de 5 de janeiro de 2022, referente à Transição Energética Justa, a Lei nº 18.330/2022 (Política Estadual de TEJ) e o Decreto nº 11.124/2022, que trata do Conselho e do Plano de Transição Justa para a região carbonífera de SC, veio à tona a necessidade de explorar alternativas sustentáveis para o uso do carvão mineral. Tais diretrizes têm fomentado a pesquisa sobre o beneficiamento do carvão para finalidades tecnológicas, incentivando o desenvolvimento de processos que reduzam os impactos ambientais e agreguem valor ao recurso, tal como apresentado por Virmond *et al.* (2024). Essa abordagem, alinhada com a nova legislação, promove a integração de tecnologias emergentes ao setor energético, impulsionando a inovação no uso de

recursos minerais estratégicos, permitindo que a atividade de mineração continue a contribuir para a economia nacional de maneira sustentável (GT-SC, 2021).

Os nanomateriais de carbono, como o grafeno e derivados, representam uma área promissora de estudo e aplicação. Para essa finalidade, características específicas do carvão são requeridas, como baixo teor de cinzas e, conseqüentemente, alto teor de carbono. Esses materiais têm potencial de aplicação em diversas áreas. Abdelhalim *et al.* (2022) estudaram a funcionalização covalente e não covalente de Nanomateriais Baseados em Grafeno (GBN) para obter materiais únicos para aplicações biomédicas, como tratamento de câncer, administração de medicamentos e biomoléculas, desenvolvimento de biossensores e materiais com propriedades antivirais, antibacterianas e antifúngicas.

No estudo de Asim *et al.* (2022), a incorporação de materiais à base de grafeno em materiais de construção, como cimento, asfalto, materiais anticorrosivos, isolantes acústicos e térmicos, entre outros, mostrou melhores desempenhos, durabilidade e aderência. Já Haeri *et al.* (2022), relataram que os grupos funcionais abundantes e a alta área de superfície específica do óxido de grafeno não apenas auxiliou as partículas de MOF (metal-organic framework) a crescerem controladamente, como evitar e aumentar as desvantagens e vantagens, respectivamente de cada componente, como o crescimento das propriedades termomecânicas, retardantes de chamas e anticorrosivas dos polímeros.

Li *et al.* (2021) demonstraram que o uso de óxido de grafeno nos eletrodos das baterias para armazenamento de energia melhora a capacidade de armazenamento e a eficiência dos eletrodos, além de aumentar a capacidade de carga e descarga e a vida útil, pois o óxido de grafeno possui uma alta área de superfície específica e excelente condutividade elétrica, com a presença de grupos funcionais oxigenados na sua superfície, promove uma melhor dispersão e estabilidade estrutural dos eletrodos.

A síntese de materiais de carbono a partir do carvão mineral oferece um caminho para diversificar suas aplicações industriais, ao mesmo tempo que atende às exigências de sustentabilidade. Além disso, a pesquisa nessa área tem possibilitado avanços no entendimento das propriedades físico-químicas do carvão e no desenvolvimento de técnicas de purificação que ampliem sua utilidade em setores de alta tecnologia.

Diante desse cenário, o objetivo geral deste trabalho foi analisar as características do carvão mineral catarinense da camada Bonito e aplicar processos físicos para obtenção de um produto com teor reduzido de cinzas para aplicação em processo de síntese de óxido de grafeno.

Para isso, os processos industriais de beneficiamento do carvão mineral catarinense foram estudados; amostras de carvão de uma mineradora do sul catarinense foram coletadas em diferentes estágios do processo de beneficiamento industrial, pré-tratadas e caracterizadas; ensaios de flotação em bancada laboratorial foram conduzidos variando-se a massa de carvão (razão sólido/líquido na cuba de flotação, 4%, 6% e 8%), o tempo de flotação (15s, 30s, 60s e 120s) e a concentração dos reagentes utilizados (óleo de pinho: 100 g/t, 300 g/t e 500 g/t de carvão, e óleo diesel: 600 g/t, 1000 g/t e 1400 g/t de carvão); as amostras coletadas e os produtos dos ensaios de flotação foram caracterizados para avaliação do rendimento do processo.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 CARVÃO COMO PRECURSOR DE NANOMATERIAIS DE CARBONO**

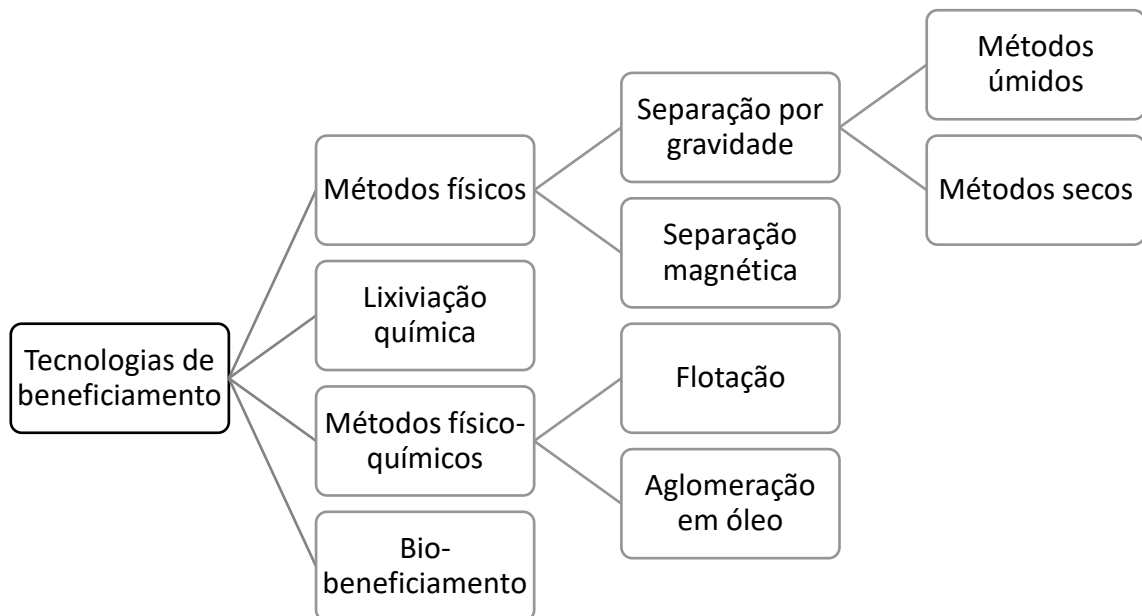
A produção de nanomateriais de carbono a partir do carvão, como o grafeno, apresenta uma abordagem promissora e sustentável para o aproveitamento deste recurso natural. O carvão, especialmente em suas formas de alta pureza e com baixo teor de cinzas, é uma matéria-prima adequada para a síntese de materiais de carbono de alto desempenho, visto que impurezas, como metais e materiais não carbonosos, podem comprometer a estrutura e as propriedades condutivas e mecânicas do grafeno (HOANG *et al.*, 2018; LEE; MAHAJAN, 2021).

Segundo Li *et al.* (2021), os processos de conversão do carvão em grafeno envolvem a remoção de compostos não carbônicos e impurezas, preservando as regiões gráficas da estrutura. Carvões como o antracito, que possuem uma alta concentração de carbono, são ideais para essa finalidade, pois fornecem uma estrutura de camadas bem ordenadas e quimicamente estáveis. Dessa forma, o grafeno derivado do carvão se torna uma alternativa competitiva em relação às fontes tradicionais de carbono, tanto pelo seu custo quanto pela abundância do carvão (LI *et*

*al.*, 2021). Entretanto, o desafio é maior ao se partir de carvões de menor qualidade, sendo necessário seu pré-tratamento para a redução do teor de impurezas, tal como apresentado por Sanchez (2023); Sanchez *et al.* (2024a); Sanchez *et al.* (2024b).

Dentre as opções de pré-tratamento do carvão (Figura 1), destacam-se tecnologias físicas (como separação por gravidade e magnética), químicas (lixiviação), físico-químicas (flotação e aglomeração de óleo) e biológicas (uso de microrganismos específicos). Cada uma dessas técnicas é adaptada às características específicas do carvão a ser tratado, podendo ser combinadas para alcançar resultados mais eficazes (XIA *et al.*, 2015).

Figura 1 – Classificação das tecnologias de beneficiamento para carvões de baixo *rank*



Fonte: Traduzido e adaptado de XIA *et al.* (2015).

Conforme Xia *et al.* (2015), os processos de beneficiamento do carvão mineral podem ser classificados em diversas metodologias, cada uma com características específicas. A separação por gravidade baseia-se nas diferenças de densidade entre os componentes do carvão, utilizando equipamentos como mesas vibratórias e ciclones. A separação magnética, por sua vez, explora as propriedades magnéticas de certos minerais presentes, permitindo sua remoção. Já a lixiviação química emprega soluções ácidas ou alcalinas para dissolver impurezas específicas, como enxofre e cinzas.



Entre os métodos físico-químicos, destacam-se a flotação, que separa as partículas hidrofóbicas das hidrofílicas e é amplamente utilizada para remover cinzas e enxofre, e a aglomeração de óleo, que forma aglomerados a partir de partículas de carvão atraídas pelo óleo, facilitando sua separação. Por fim, o bio-beneficiamento utiliza microrganismos específicos para oxidar compostos sulfurados e outros contaminantes, promovendo a limpeza biológica do carvão. Neste trabalho, foi utilizado o processo de flotação para o beneficiamento do carvão mineral, conforme detalhado no item seguinte.

## 2.2 FLOTAÇÃO

A flotação é um processo amplamente aplicado em diferentes setores industriais para promover a separação de minerais com base em suas propriedades físico-químicas. No beneficiamento do carvão mineral, a técnica é empregada para distinguir partículas hidrofóbicas das hidrofílicas em meio líquido. Em escala industrial, esse método é conduzido em grandes células ou colunas de flotação, capazes de processar milhões de toneladas de minério anualmente, garantindo elevada eficiência e produtividade.

A flotação em bancada, segundo Fuerstenau (2003), é um processo em menor escala, geralmente utilizado em laboratórios para testar a viabilidade de novos processos de flotação. Além de ser uma ferramenta importante para a pesquisa e desenvolvimento de novos processos de flotação, ela permite a avaliação de diversos reagentes químicos, além de permitir a simulação de condições específicas de operação. Com isso, é possível otimizar o processo de flotação em escala industrial, reduzindo custos e aumentando a eficiência (FINCH e DOBBY, 1991).

A Tabela 1 apresenta uma revisão da literatura sobre flotação de carvão mineral, que serviu de base para a definição da metodologia utilizada neste estudo.

Tabela 1 – Revisão da literatura sobre flotação de carvão mineral.

(continua)

Autor/ano	Título	Objetivo	Reagentes	Concentração dos reagentes	Parâmetros da célula de Flotação	Melhores resultados em termos de R.C.
<b>Campos et al (1979)</b>	Flotação de carvão: Estudos em escala de bancada	Desenvolver método de beneficiamento visando melhorar a qualidade e a fração de rendimento metalúrgico.	Óleo de pinho (OP), óleo diesel (OD) e querosene (QS)	800 g/t de OD e 200 g/t OP. 1100 g/t de QS e 200g/t OP	Cuba de 3 L	OD: 800 g/t OP: 200 g/t – 75 s. CZ: 10% QS: 1100 g/t OP: 200 g/t – 150 s. CZ: 10,5%
<b>Campos et al (1981)</b>	Flotação de carvão de Santa Catarina em escala de bancada e piloto	Estudar o processo de flotação para o carvão catarinense afim de conseguir as melhores condições de flotação em escala de bancada	Óleo de pinho (OP), óleo diesel (OD), querosene (QS) e MIBIC	Diversos	1200rpm, 11%, 5 L	OP: 154 g/t OD: 98 g/t CZ: 11%
<b>Chaves (1983)</b>	Flotação de carvão de Santa Catarina (Região do Alto Metalúrgico).	Estudar a flotação do carvão e as adições de coletor, a diluição de polpa, a adição de cloreto férrico (como depressor da pirita) e o efeito dos espumantes e de presença das lamas.	Óleo de pinho (OP), óleo diesel (OD) e querosene (QS)	Coletor: 200, 600 e 1000 g/t. Espumante: 150 e 250 g/t. Depressor 100, 350 e 750 g/t	6%, 12% e 18% de sólidos, 1600 rpm, 60 s, 120 s, 210 s	OP: 150g/t OD: 200g/t - 60s CZ: 14%
<b>Ruiz e Chaves (2009)</b>	Flotação do carvão contido em um rejeito carbonoso	Demonstrar a viabilidade da recuperação do carvão contido num rejeito carbonoso. Concentrado de carvão que atinja as especificações do mercado	Querosene (QS), diesel (OD), pinho (OP) e MIBIC	Concentrações variadas, diversos testes.	Eliminação da fração acima de 35#. Polpa com sólidos entre 6% e 8% em massa. 1.100 rpm na célula de 2,8 L	QS: 2000 g/t MIBIC: 300 g/t CZ: 7,5% QS: 2000 g/t OP: 233 g/t CZ: 9,6% OD: 1000 g/t OP: 163 g/t. CZ: 9,8%

Tabela 1 – Revisão da literatura sobre flotação de carvão mineral.

(continuação)

Autor/ano	Título	Objetivo	Reagentes	Concentração dos reagentes	Parâmetros da célula de Flotação	Melhores resultados em termos de R.C.
<b>Ruiz (2009)</b>	Flotação do carvão contido no rejeito da barragem El Cantor.	Obter por meio de flotação direta um carvão que apresente teor de cinzas menor que 7,5% e recuperação de massa maior que 30%	Querosene (QS) e diesel (OD) como coletor e óleo de pinho (OP) e MIBIC como espumantes	Partindo de 2000g/t de QS e 1000 g/t de OD com incrementos de 1000g/t e espumante de 163 a 912g/t	2,8 L, 1100 rpm, 8%	QS + MIBIC - 2000 e 300 g/t. CZ: 7,5% OD e OP - 1000 e 163 g/t. CZ: 9,8%
<b>Dávila (2013)</b>	Estudo de flotação convencional em bancada do lodo da carbonífera Criciúma	Avaliar a performance do processo de flotação, adequação das combinações dos reagentes para obter um produto com teor de cinzas de 35% e recuperação mássica de 40%	Óleo Diesel, Querosene, MIBC, Óleo de Pinho, Lilafloth GS 13	1-6 kg/t do coletor e fixo 400 g/t do espumante	Célula de acrílico de 4 L, rotação de 1000 rpm e fluxo de 2 L/min. Condicionada com 8% de sólidos em peso	1 kg/t de coletor e 400 g/t de pinho menor fração do teor de cinzas foi no tempo de 1 min de coleta basicamente em todos os testes variando de 19% a 28%
<b>Dávila e Brum (2013)</b>	Flotação de lodos do beneficiamento de carvão para recuperação de matéria carbonosa	Recuperar a matéria carbonosa e reduzir o teor de cinzas e contaminantes	Óleo diesel/óleo de pinho, óleo diesel/MIBC, querosene/óleo de pinho, querosene/MIBC e Lilafloth	Espumantes variaram de 300 g/t a 600 g/t e o coletor (óleo diesel), de 1000 g/t de 6000 g/t.	4 L, 8% de sólidos, agitação de 1000 rpm e fluxo de ar controlado 2 L	QS 1000 g/t e MIBC 400g/t, CZ: 19%
<b>Zancan e Brum (2015)</b>	Recuperação de matéria carbonosa presente em lodos do beneficiamento de carvão por meio de flotação	Recuperar matéria carbonosa e redução de cinzas.	Óleo de pinho, como espumante; óleo diesel, como coletor; e óxido de cálcio	OP: de 100 g/t e 400 g/t OD: de 1-5 kg/t	4 L de polpa com 8% de concentração de sólidos. 6 minutos de flotação	Amostra MC: 1000 OD e 400 OP – CZ: 26% e Amostra CC: 4000 OD e 1000OP – CZ: 22%

Tabela 1 – Revisão da literatura sobre flotação de carvão mineral.

(continuação)

Autor/ano	Título	Objetivo	Reagentes	Concentração dos reagentes	Parâmetros da célula de Flotação	Melhores resultados em termos de R.C.
Brum e Jesus (2016)	Flotação de rejeitos do beneficiamento gravimétrico de carvão mineral	Estudar o processo de flotação em coluna para um carvão específico. O objetivo é recuperar matéria carbonosa e reduzir os teores de cinzas e contaminantes.	Óleo diesel e pinho	Óleo diesel variando de 50 a 200 g/t e óleo de pinho de 50 a 400 g/t	30% de sólidos, 1000 rpm, produtos tirados a cada 10s da polpa	200g/t de diesel e 300g/t de pinho – CZ: 31,5%
Castro (2016)	Análise do sistema de reagentes na flotação de finos de carvão mineral de Moazite, Moçambique	Analisar o sistema de reagentes na flotação do carvão de Moatize, sua adequação para a recuperação da fração fina de parte do carvão (ROM) da camada UCB proveniente da lavra a céu aberto	Betacol como coletor e espumante ao mesmo tempo, óleo diesel como coletor e MIBC como espumante.	Betacol de 400 a 900 g/t, OD de 200 a 500 g/t e MIBC 300 g/t	Capacidade da célula de acrílico 4 L Velocidade do rotor 1000 RPM Vazão de ar 1-4 Litros por minuto Concentração dos sólidos 4% Tempo de flotação 1 a 5 min	Ensaio G: 200 g/t (O.D) – 300 g/t (MIBC) recuperações mássicas e teor de cinzas em torno de 45,64% e 8,07% respectivamente (primeiro mim com 6,95% de cinzas)
Pinto et al. (2010)	Flotação	Explicar o processo de flotação como um todo, reagentes e modelos de plantas de flotação utilizadas comercialmente	Diversos	Ácido cresílico 100 g/t óleo de pinho 50 g/t, MIBC 40 g/t, Aerofroths 15-100 g/t	-	-
Zancan et al. (2019)	Efeito do arraste de matéria inorgânica em processo de flotação de carvão mineral de Moatize, em Moçambique	Analisar o arraste de matéria inorgânica frente ao sistema de flotação de finos de carvão mineral pertencente à camada superior da referida jazida	Betacol (agente hidrofobizante e espumante), óleo diesel (agente hidrofobizante) e MIBC (espumante)	Utilizado óleo diesel e Betacol com concentrações variando de 200 g/t à 500 g/t e manteve-se constante o MIBC	Fluxo de ar de 1-4 L, tempo de flotação 2 min e 3 min	Betacol - 400 g/t (rougher) – 400 g/t (scavenger), CZ de 2,06% e 9,28%. Óleo Diesel 300 g/t e 300 g/t MIBC, CZ de 0,37% e 1,57%

Tabela 1 – Revisão da literatura sobre flotação de carvão mineral.

							(conclusão)
Autor/ano	Título	Objetivo	Reagentes	Concentração dos reagentes	Parâmetros da célula de Flotação	Melhores resultados em termos de R.C.	
<b>Zancan (2020)</b>	Beneficiamento de carvão moçambicano por flotação: Efeito da proximidade com estruturas geológicas intrusivas	Avaliar o melhor sistema de reagentes na flotação do carvão de Moatize, tendo em conta um teor baixo de cinzas e máxima recuperação mássica.	Betacol Com 3 (BC3), Betafroth Fom 3 (BF3), Óleo Diesel (OD), Metil isobutil carbinol (MIBC)	Concentrações variadas, diversos testes.	Capacidade das células de acrílico 1,5 L e 4,0 L; 1000 rpm Vazão de ar 1-4 L/min; 4% e 8% de sólidos. Tempo de flotação 30 s a 300 s	4% sólidos com OD e MIBC: 75 g/t – CZ: 8% 8% sólidos com OD e MIBC: 75 g/t CZ: 10% 100 g/t de OD e 100 g/t de MIBC – CZ: 7,5% 200 g/t de OD e 100 g/t de MIBC - CZ 9,06%	
<b>Zancan et al. (2021)</b>	Uso de flotação para a recuperação de matéria carbonosa presente em lodos do beneficiamento de carvão	O objetivo é recuperar matéria carbonosa e redução de cinzas.	Óleo Diesel e Óleo de Pinho	OP: 100g/ton e 400g/ton OD: 1000g/ton, a 5000g/t	4 L de polpa com concentração de sólidos de 4% e 8%. Cada ensaio durou seis minutos.	-	
<b>Braga et al. (2022)</b>	Desenvolvimento de reagentes alternativos na flotação de minérios de carvão	Desenvolve reagentes alternativos para otimizar o desempenho da flotação de três minérios de carvão	Lupromin FP C 1920, Lupromin FF 1908, entre outros	Lupromin FP C 1920 - 500, 750, 1000 e 2000 g/t, Lupromin FF 1908 - 167, 83, 42 g/t	Água destilada, 5 L, 6% sólidos, 1400 rpm, 5 min	Dosagem Lupromin FP C 1920: 1000 a 2000(g/t) com cinzas em 5,8% de 14%	
<b>Tiscoski et al. (2023)</b>	Otimização do processo de operação de uma célula de flotação em bancada para carvão sub-betuminoso sul catarinense	Otimização dos parâmetros da operação de uma célula de flotação em bancada visando a redução do teor de cinzas das amostras	Óleo Diesel (OD) e óleo de Pinho (OP)	OD de 2,5 -6,4 kg/t e OP de 1-1,6 kg/t	Ar de 2 a 3 L/min, 1200 a 1000 rpm, de 3 a 10% de sólidos, 15, 30 e 60 s	1000 rpm, 3,8 OD, 1 kg OP, 3% sólidos e 15 s	

Fonte: O autor (2024)

De acordo com Chaves (1983), o processo de flotação do carvão gera melhores resultados com grandes quantidades de bolhas de ar de diâmetros pequenos, operando com diluições (razão carvão/água) elevadas quando comparadas com as flotações usuais, da ordem de 3% a 8% em massa de carvão.

Segundo Tiscoski *et al.* (2023), as condições ideais de operação do flotador para a redução de cinzas da amostra no processo de flotação foram de uma rotação de 1000 rpm, uma vazão de ar de 2L/min e a variação do tempo de flotação de 15 s, 30 s e 60 s. Já as condições aplicadas na célula de flotação foram de uma razão de 3% de sólido/líquido, 3,8 kg de óleo diesel e 1 kg de óleo de pinho por tonelada de carvão.

De acordo com Brum e Jesus (2016), as concentrações de reagentes utilizadas no processo de flotação variaram entre 50 g/t a 200 g/t para óleo diesel e 50 g/t a 400 g/t para óleo de pinho. O melhor resultado obtido foi com a utilização de 200 g/t de óleo diesel e 300 g/t de óleo de pinho, o que resultou em uma redução do teor de cinzas para 31,5%. Os parâmetros operacionais da célula de flotação incluíram uma concentração de sólidos de 30%, uma rotação de 1000 rpm, e a retirada dos produtos da polpa a cada 10 segundos.

No estudo de Ruiz e Chaves (2009), a fração acima de #35 *mesh* foi eliminada antes de ajustar a polpa para uma porcentagem de sólidos entre 6% e 8% em massa. O processo de flotação foi realizado em uma célula de 2,8 L, operando a 1.100 rpm, utilizando 1000 g/t de óleo diesel e 163 g/t de óleo de pinho como reagentes. Este procedimento resultou em um teor de cinzas de 9,8%. Já para Campos *et al.* (1979), o processo de flotação utilizando 800 g/t de óleo diesel e 200 g/t de óleo de pinho, em um tempo de 75 s, resultou em um teor de cinzas de 10%. Além disso, o carvão pré-lavado com densidade menor ou igual a 1,3 apresentou aproximadamente 2,5% de cinzas, enquanto o carvão com densidade entre 1,3 e 1,4 apresentou cerca de 11,6% de cinzas.

Segundo Zancan (2020) e Brum (2004), um dos maiores desafios enfrentados pelas indústrias mineradoras atualmente é a recuperação de partículas minerais finas. Esse problema tem sido amplamente discutido em diversos estudos ao longo das últimas décadas, onde a principal preocupação surge da necessidade de processar minérios que requerem um alto grau de moagem, resultando na geração de grandes quantidades de partículas finas.

Os finos na flotação apresentam diversos desafios que dificultam a recuperação eficiente dos minerais desejados. Entre os principais problemas estão a baixa probabilidade de colisão e adesão entre partículas e bolhas, além da dificuldade em superar a barreira energética entre elas. Isso resulta em um menor contato entre as partículas minerais e as bolhas de ar, reduzindo a eficiência do processo de flotação. Além disso, o arraste mecânico e o recobrimento por ultrafinos, contribuem para o aumento do consumo de reagentes e uma rigidez excessiva da espuma, o que prejudica a seletividade na adsorção de reagentes e, conseqüentemente, a recuperação do mineral de interesse (ZANCAN, 2020).

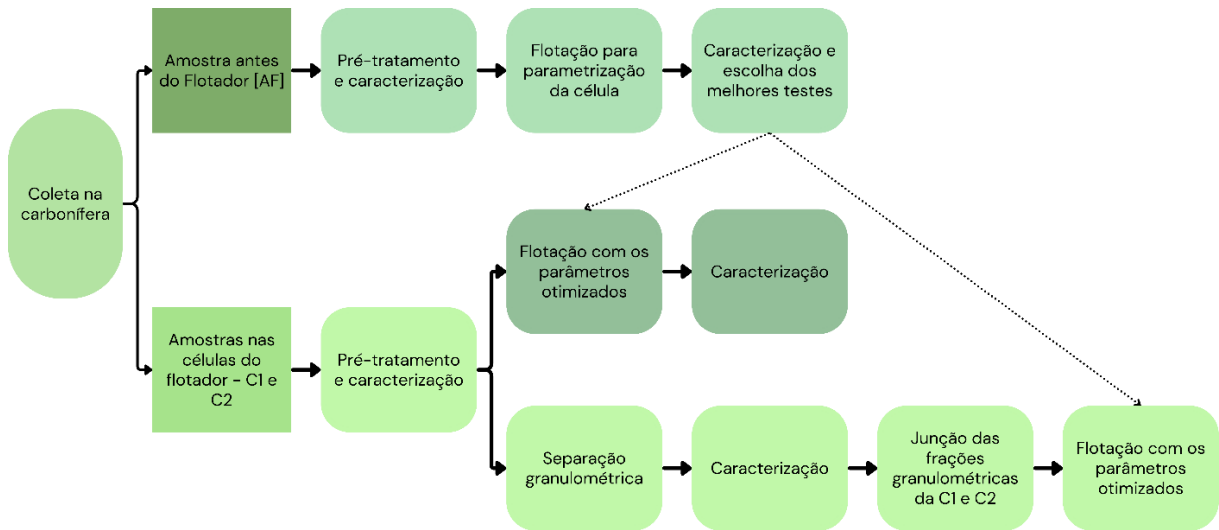
Santos e Dutra (2011) afirmam que as partículas ultrafinas, com tamanho inferior a 10  $\mu\text{m}$ , têm baixa eficiência de colisão com bolhas de ar e são suscetíveis ao arraste hidrodinâmico. Nas células de flotação convencionais, as bolhas geradas são grandes demais para capturar eficazmente as partículas ultrafinas, o que resulta em baixa recuperação.

O estudo realizado por Karmakar *et al.* (2024) evidenciou que existe uma correlação direta entre o aumento da densidade/granulometria e a elevação do teor de cinzas. Por exemplo, para densidades inferiores a 1,3  $\text{kg/m}^3$ , foi identificada uma concentração de cinzas em torno de 4,49%. Já na faixa de 1,3  $\text{kg/m}^3$  a 1,4  $\text{kg/m}^3$ , observou-se um aumento para aproximadamente 9,39%. Em contraste, frações com densidade superior a 1,8  $\text{kg/m}^3$  apresentaram teores de cinzas elevados, cerca de 61,3%.

### **3 METODOLOGIA**

A execução deste trabalho foi estruturada em etapas bem definidas, descritas nesta seção e representadas no fluxograma da Figura 2, visando assegurar a confiabilidade e precisão dos resultados obtidos. As etapas metodológicas abrangeram todo o processo, desde a coleta inicial das amostras até a realização dos ensaios de flotação.

Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas



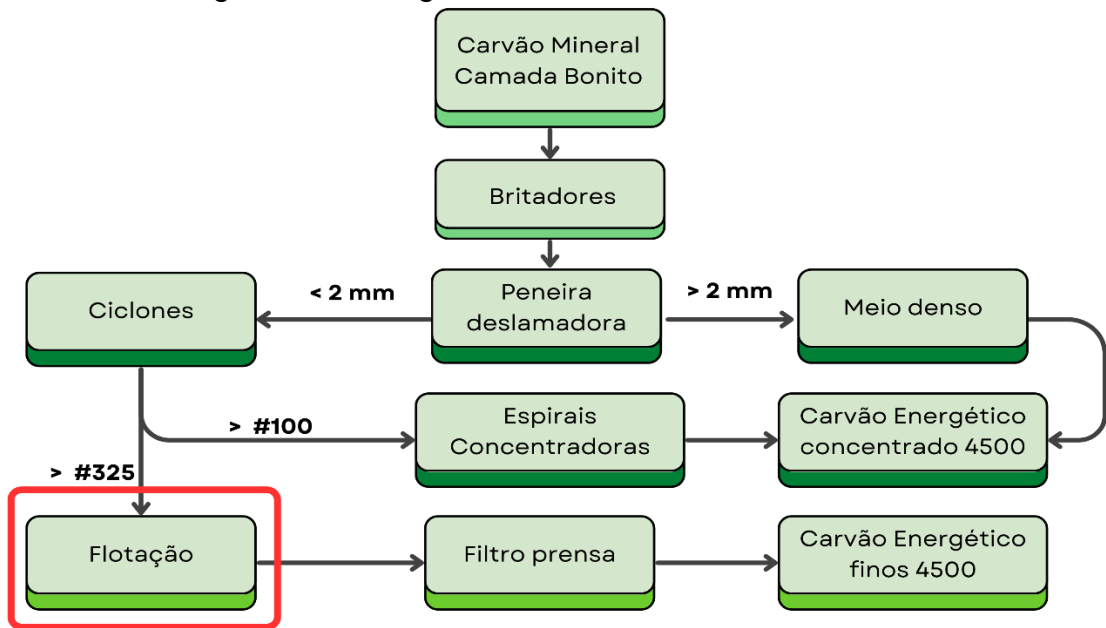
Fonte: O autor (2024)

### 3.1 ORIGEM E COLETA DAS AMOSTRAS

Nesta pesquisa, as amostras de carvão foram coletadas de uma mineradora situada no sul de Santa Catarina, em Treviso, especializada na extração e processamento de carvão mineral catarinense, sendo o carvão do tipo sub-betuminoso da camada Bonito. As amostras foram coletadas na entrada e saída do flotador do sistema de beneficiamento, que recebe material proveniente de um ciclone. Nesse processo, a fração maior que #100 é direcionada às espirais concentradoras, enquanto a fração maior que #325 segue para o flotador, conforme ilustrado na Figura 3. O fluxograma descreve o sistema de forma simplificada e destaca o local de coleta das amostras e o tamanho granulométrico em cada etapa do processo, sendo que o material que entra no flotador possui granulometria superior a #325 *mesh*.



Figura 3 – Fluxograma do beneficiamento do carvão



Fonte: Adaptado de Tiscoski *et al.* (2023).

A instalação de beneficiamento de carvão na empresa consiste unicamente de duas unidades de flotação, conforme demonstrado na Figura 4. Assim, as amostras foram coletadas tanto na corrente de finos, onde o carvão é separado durante a flotação, quanto antes do flotador, permitindo uma análise comparativa das suas características após o processo.

Figura 4 – Célula de flotação da empresa onde foram realizadas as coletas de amostras para os ensaios de flotação em bancada laboratorial



Fonte: O autor (2024).

As amostras foram armazenadas em recipientes de polietileno de alta densidade (PEAD) com capacidades de 30 L para o material flotado e 220 L para o material de entrada do flotador (Figura 5). Esses recipientes foram cuidadosamente mantidos ao abrigo de agentes externos que poderiam comprometer a integridade das amostras.

Figura 5 – Recipientes utilizados para armazenamento das amostras.



Fonte: O autor (2024).

A seleção dos pontos de coleta ao longo da linha de beneficiamento teve como base o estudo de Campos (1979), que evidenciou que a fração de finos contém, predominantemente, carvão de alta qualidade (rico em vitrinita) e apresenta elevada seletividade no processo de flotação. Assim, as amostras foram coletadas tanto na corrente de finos, onde o carvão é separado durante a flotação, quanto antes do flotador, permitindo uma análise comparativa da eficiência do processo e facilitando a obtenção de uma maior fração de massa em menor tempo (TISCOSKI *et al.*, 2023).

Todos os recipientes contendo as amostras foram devidamente identificados para assegurar a rastreabilidade e organização ao longo das etapas de trabalho:

- “AF” para a amostragem realizada antes do estágio de flotação;
- “C1” para a amostragem da saída da primeira célula de flotação;
- “C2” para a amostragem da saída da segunda célula de flotação.

A massa total coletada, em base úmida, correspondente à condição em que o material foi retirado do ponto de amostragem, foi de aproximadamente 179,4 kg para a amostra antes do flotor (AF), 23,8 kg para a célula 1 (C1) e 26,2 kg para a célula 2 (C2).

### 3.2 PRÉ-TRATAMENTO DAS AMOSTRAS

Após a coleta nas instalações de beneficiamento da empresa carbonífera, as amostras foram transportadas ao Centro Tecnológico da SATC, especificamente para o Lab-síntese do Núcleo de Energia e Síntese de Produtos (NEP). No laboratório, devido à alta quantidade de água presente nas amostras, foi realizado um processo de filtração a vácuo no equipamento da marca Brastorno com 3,5 kW de potência (Figura 6). Durante essa etapa, as amostras, juntamente com o papel filtro, foram retiradas do equipamento, colocadas nas bandejas de alumínio e levadas a uma estufa (Figura 7) da marca Quimis, modelo Q317M-72, para acelerar o processo de secagem.

Figura 6 – Equipamento de filtração à vácuo.



Fonte: O autor (2024).

Figura 7 – Amostras na estufa após o processo de filtração



Fonte: O autor (2024).

A estufa foi configurada para operar a uma temperatura máxima de 100 °C para evitar uma possível volatilização da matéria e por um período de 24 horas. Esse tempo foi suficiente para que ocorresse a completa evaporação de toda parte líquida das amostras. A Tabela 2 apresenta as massas coletadas de cada amostra, as massas dos recipientes, as massas de sólidos secos obtidos após a secagem e as massas de água evaporadas.

Tabela 2 – Massa das amostras coletadas.

<b>Amostras</b>	<b>Massa bombona cheia [kg]</b>	<b>Massa bombona vazia [kg]</b>	<b>Massa amostra seca [kg]</b>	<b>Massa água [kg]</b>
AF	179,43	9,54	8,42	161,47
C1	23,80	2,14	1,40	20,26
C2	26,22	2,10	1,68	22,44

Fonte: O autor (2024).

Após a secagem, a massa total coletada, foi de aproximadamente 8,42 kg para a amostra antes do flutuador (AF), 1,4 kg para a célula 1 (C1) e 1,68 kg para a célula 2 (C2).



### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os parâmetros físicos são importantes para avaliar a qualidade, características e o rendimento do carvão, com isso, as análises empregadas para caracterizar as amostras em todas as etapas do estudo seguiram os métodos padronizados pela American Society for Testing and Materials - ASTM (1996), que são amplamente utilizados na indústria e na pesquisa. As normas ASTM D3173 e ASTM D3174, que abrangem os procedimentos para avaliação da determinação da umidade de higroscopia e do teor de cinzas respectivamente, foram empregadas neste estudo. A mufla da marca Jung, modelo LF62312 (Figura 8) foi configurada para operar a uma temperatura de 775 °C por um período mínimo de 4 horas, para que ocorresse a total queima de toda parte orgânica das amostras.

Figura 8 – Amostras na mufla para a análise do teor de cinzas



Fonte: O autor (2024).

### 3.4 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Neste trabalho foram utilizadas quatro peneiras de diferentes aberturas de malhas para investigar a distribuição de tamanho das partículas que compõem as amostras coletadas, onde a peneira 60 *Mesh Tyler* (#60) possui uma abertura de malha maior, permitindo a passagem de partículas maiores, enquanto as peneiras #120, #200 e #325 possuem aberturas menores, sendo capazes de reter partículas denominadas ultrafinas pela literatura. Ao analisar as frações retidas em cada peneira, foi possível obter uma distribuição granulométrica e mássica detalhada das amostras.

Figura 9 – Amostra na peneira de separação granulométrica



Fonte: O autor (2024).

### 3.5 BENEFICIAMENTO/ENSAIO DE FLOTAÇÃO

Os ensaios de flotação foram conduzidos em uma célula de flotação de bancada modelo CFB-1000 EEPN, da marca CDC (Figura 10), equipada com uma cuba de capacidade máxima de 3 L. Durante os testes, diferentes condições

operacionais foram avaliadas, incluindo variações na dosagem de reagentes. O óleo de pinho foi utilizado como agente espumante, enquanto o óleo diesel, derivado de petróleo, atuou como promotor de hidrofobicidade.

Figura 10 – Célula de flotação em escala de bancada



Fonte: O autor (2024).

Com base em Tiscoski *et al.* (2023), que trabalhou com carvão da camada Barro Branco, foram definidos os parâmetros de tempo, vazão de ar e rotação para os testes de flotação. Os parâmetros incluíram intervalos de 15, 30, 60 e 120 s para o tempo, uma vazão de ar de 2L/min e uma rotação fixa de 1000 rpm. Com esses parâmetros definidos, foi organizada uma sequência de 27 testes de flotação (Tabela 3) para parametrizar a célula de flotação para o beneficiamento do carvão da camada Bonito, com foco na redução do teor de cinzas, variando a concentração de sólidos e a dosagem dos reagentes óleo diesel e óleo de pinho, onde tais concentrações se baseiam nos dados obtidos na tabela de revisão bibliográfica (Tabela 1).

Tabela 3 – Testes de parametrização da célula de flotação.

<b>Parâmetro</b>	<b>Razão de sólidos [%]</b>	<b>Massa de óleo de pinho [g/t]</b>	<b>Massa de óleo diesel [g/t]</b>
F1	4%	100	600
F2	4%	100	1000
F3	4%	100	1400
F4	6%	100	600
F5	6%	100	1000
F6	6%	100	1400
F7	8%	100	600
F8	8%	100	1000
F9	8%	100	1400
F10	4%	300	600
F11	4%	300	1000
F12	4%	300	1400
F13	6%	300	600
F14	6%	300	1000
F15	6%	300	1400
F16	8%	300	600
F17	8%	300	1000
F18	8%	300	1400
F19	4%	500	600
F20	4%	500	1000
F21	4%	500	1400
F22	6%	500	600
F23	6%	500	1000
F24	6%	500	1400
F25	8%	500	600
F26	8%	500	1000
F27	8%	500	1400

Fonte: O autor (2024).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos estão apresentados a seguir, organizados por tópicos, correspondentes às etapas da metodologia previamente descritas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS BRUTAS

As amostras coletadas na planta de beneficiamento da empresa carbonífera, após a secagem, armazenamento e descanso de aproximadamente uma semana, apresentaram os seguintes resultados na análise imediata realizada em duplicata, cujos valores médios foram expressos na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise imediata das amostras brutas.

<b>Análise</b>	<b>AF</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>
Umidade de higroscopia (%)	1,45 ± 0,05	0,79 ± 0,05	0,71 ± 0,02
Teor de cinzas (%)	58,38 ± 0,01	35,51 ± 0,17	28,55 ± 0,10
Teor de materiais voláteis (%)	15,95 ± 0,06	19,86 ± 0,05	21,11 ± 0,06
Teor de Carbono Fixo (%)	24,22 ± 0,12	43,84 ± 0,27	49,63 ± 0,18

Fonte: O autor (2024).

O teor de cinzas obtido na amostra AF foi de 58,38%, o que demonstra que existe muita matéria inorgânica nessa etapa do beneficiamento e quando comparado com os valores da C1 e C2, nota-se que elas diminuíram, melhorando a qualidade do carvão, ou seja, retirando essas impurezas. A análise de umidade de higroscopia é realizada como complemento no cálculo do teor de cinzas, que leva em consideração apenas a massa de sólido, excluindo-se qualquer água residual que possa estar presente. Juntamente com a análise de voláteis, que mostra a quantidade de substâncias que se volatilizam sob aquecimento, possibilita calcular o teor de carbono fixo da amostra. Este, por sua vez, representa a quantidade de carbono presente na amostra que não é liberada durante o aquecimento e que permanece na forma sólida após a perda dos voláteis e da umidade. (TISCOSKI *et al*, 2023).

## 4.2 ENSAIOS DE PARAMETRIZAÇÃO

A Tabela 5 exibe de forma detalhada os resultados obtidos nos 27 ensaios de flotação para a parametrização da célula, conforme os parâmetros previamente estabelecidos para vazão de ar, rotação, concentração de sólidos e dosagem dos reagentes (óleo diesel e óleo de pinho), cada coleta foi realizada na mesma batelada, durante o tempo indicado, por exemplo, de 0 a 15s uma amostragem do flotado, de 16s a 30s outra e assim por diante.

Tabela 5 – Análise imediata das amostras brutas.

(continua)

<b>Amostra</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Umidade de higroscopia [%]</b>	<b>Teor de cinzas [%]</b>
F1	15	1,20 ± 0,10	23,10 ± 0,22
	30	1,30 ± 0,10	25,89 ± 2,07
	60	1,23 ± 0,10	40,75 ± 0,53
	120	1,20 ± 0,10	41,89 ± 0,17
F2	15	1,23 ± 0,10	21,47 ± 0,11
	30	0,92 ± 0,10	26,55 ± 2,09
	60	1,31 ± 0,10	37,76 ± 0,32
	120	1,30 ± 0,10	38,40 ± 0,82
F3	15	0,81 ± 0,10	24,10 ± 0,12
	30	0,82 ± 0,10	27,89 ± 0,46
	60	1,00 ± 0,10	35,44 ± 0,10
	120	1,28 ± 0,10	40,98 ± 0,27
F4	15	0,80 ± 0,10	24,51 ± 0,34
	30	1,00 ± 0,10	26,29 ± 3,98
	60	1,12 ± 0,10	33,64 ± 0,60
	120	1,07 ± 0,10	36,47 ± 3,21
F5	15	1,37 ± 0,10	25,14 ± 0,21
	30	0,82 ± 0,10	32,31 ± 0,09
	60	0,98 ± 0,10	41,77 ± 0,68
	120	1,21 ± 0,10	40,85 ± 0,05

Tabela 5 – Análise imediata das amostras brutas.

(continuação)

<b>Amostra</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Umidade de higroscopia [%]</b>	<b>Teor de cinzas [%]</b>
F6	15	0,86 ± 0,10	28,50 ± 0,28
	30	0,93 ± 0,10	29,46 ± 1,22
	60	1,37 ± 0,10	28,29 ± 0,01
	120	1,25 ± 0,10	31,10 ± 0,08
F7	15	0,96 ± 0,10	26,20 ± 0,18
	30	0,93 ± 0,10	26,72 ± 0,08
	60	1,02 ± 0,10	28,70 ± 0,11
	120	1,52 ± 0,10	33,84 ± 0,36
F8	15	1,09 ± 0,10	25,77 ± 0,23
	30	1,15 ± 0,10	27,50 ± 0,11
	60	1,05 ± 0,10	27,33 ± 0,54
	120	1,21 ± 0,10	32,35 ± 0,01
F9	15	1,10 ± 0,10	28,11 ± 0,08
	30	1,05 ± 0,10	29,10 ± 0,15
	60	1,18 ± 0,10	30,11 ± 0,05
	120	1,15 ± 0,10	32,57 ± 0,08
F10	15	1,21 ± 0,10	36,01 ± 0,12
	30	1,06 ± 0,10	30,61 ± 0,05
	60	0,88 ± 0,10	25,21 ± 0,05
	120	1,24 ± 0,10	24,86 ± 0,29
F11	15	1,53 ± 0,10	45,44 ± 0,55
	30	1,46 ± 0,10	35,46 ± 0,35
	60	1,12 ± 0,10	29,33 ± 0,32
	120	1,14 ± 0,10	26,38 ± 0,01
F12	15	1,07 ± 0,10	22,93 ± 0,05
	30	1,14 ± 0,10	27,52 ± 0,05
	60	1,46 ± 0,10	35,07 ± 0,28
	120	1,12 ± 0,10	32,96 ± 0,35

Tabela 5 – Análise imediata das amostras brutas.

(continuação)

<b>Amostra</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Umidade de higroscopia [%]</b>	<b>Teor de cinzas [%]</b>
F13	15	1,07 ± 0,10	23,42 ± 0,22
	30	1,12 ± 0,10	26,60 ± 0,07
	60	1,12 ± 0,10	30,29 ± 0,30
	120	1,15 ± 0,10	32,88 ± 0,09
F14	15	0,97 ± 0,10	24,71 ± 0,17
	30	0,93 ± 0,10	25,23 ± 0,13
	60	0,94 ± 0,10	28,92 ± 0,52
	120	1,47 ± 0,10	34,20 ± 0,11
F15	15	1,22 ± 0,10	23,60 ± 0,30
	30	1,11 ± 0,10	23,72 ± 1,98
	60	1,18 ± 0,10	28,64 ± 0,07
	120	1,24 ± 0,10	34,82 ± 0,23
F16	15	1,00 ± 0,10	23,67 ± 0,08
	30	1,09 ± 0,10	24,98 ± 0,09
	60	1,03 ± 0,10	27,43 ± 0,16
	120	1,11 ± 0,10	33,24 ± 0,15
F17	15	1,06 ± 0,10	26,65 ± 0,10
	30	1,13 ± 0,10	27,78 ± 0,05
	60	1,08 ± 0,10	29,87 ± 0,12
	120	1,11 ± 0,10	33,74 ± 0,06
F18	15	0,96 ± 0,10	26,85 ± 0,10
	30	1,05 ± 0,10	27,11 ± 0,80
	60	1,10 ± 0,10	29,56 ± 0,02
	120	1,13 ± 0,10	34,34 ± 0,09

Tabela 5 – Análise imediata das amostras brutas.

(continuação)

<b>Amostra</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Umidade de higroscopia [%]</b>	<b>Teor de cinzas [%]</b>
F19	15	0,96 ± 0,10	23,90 ± 0,10
	30	2,47 ± 0,10	26,75 ± 0,50
	60	1,26 ± 0,10	32,21 ± 0,04
	120	1,34 ± 0,10	31,50 ± 0,06
F20	15	1,09 ± 0,10	26,81 ± 0,18
	30	1,16 ± 0,10	27,14 ± 0,35
	60	1,12 ± 0,10	27,62 ± 0,23
	120	1,30 ± 0,10	32,25 ± 0,75
F21	15	1,05 ± 0,10	22,79 ± 0,01
	30	0,99 ± 0,10	24,15 ± 0,83
	60	0,92 ± 0,10	28,30 ± 0,04
	120	1,26 ± 0,10	36,17 ± 0,02
F22	15	1,03 ± 0,10	25,57 ± 0,02
	30	0,90 ± 0,10	27,83 ± 0,01
	60	1,01 ± 0,10	30,49 ± 0,05
	120	1,12 ± 0,10	31,66 ± 0,18
F23	15	0,97 ± 0,10	26,14 ± 0,18
	30	1,01 ± 0,10	25,88 ± 0,08
	60	1,08 ± 0,10	28,82 ± 0,08
	120	1,57 ± 0,10	33,70 ± 0,07
F24	15	1,31 ± 0,10	25,95 ± 0,09
	30	1,34 ± 0,10	25,31 ± 0,08
	60	1,76 ± 0,10	26,87 ± 0,07
	120	1,32 ± 0,10	32,30 ± 0,19

Tabela 5 – Análise imediata das amostras brutas.

(conclusão)

Amostra	Tempo [s]	Umidade de higroscopia [%]	Teor de cinzas [%]
F25	15	1,16 ± 0,10	26,85 ± 0,20
	30	1,17 ± 0,10	27,68 ± 0,22
	60	1,27 ± 0,10	28,91 ± 0,14
	120	1,29 ± 0,10	33,07 ± 0,07
F26	15	1,18 ± 0,10	28,93 ± 0,03
	30	1,13 ± 0,10	28,64 ± 0,11
	60	1,11 ± 0,10	30,73 ± 0,28
	120	1,32 ± 0,10	34,86 ± 0,39
F27	15	1,12 ± 0,10	24,52 ± 0,67
	30	1,11 ± 0,10	27,86 ± 0,12
	60	1,22 ± 0,10	30,61 ± 0,25
	120	1,29 ± 0,10	32,78 ± 0,10

Fonte: O autor (2024).

A Tabela 6 apresenta os rendimentos das 27 flotações de parametrização, demonstradas anteriormente.

Tabela 6 – Análise imediata das amostras brutas.

(continua)

Parâmetro	Tempo [s]	Massa [g]	Rendimento [%]	Parâmetro	Tempo [s]	Massa [g]	Rendimento [%]
F1	15	10,49	8,74	F3	15	9,12	7,60
	30	6,03	5,03		30	8,76	7,30
	60	10,42	8,68		60	8,73	7,28
	120	10,23	8,53		120	9,19	7,66
	Fundo	82,83	69,03		Fundo	84,2	70,17
<b>Total</b>		120	100,00	<b>Total</b>		120	100,00
F2	15	5,09	4,24	F4	15	16,38	9,10
	30	10,19	8,49		30	11,71	6,51
	60	8,13	6,78		60	10,16	5,64
	120	10,44	8,70		120	17,21	9,56
	Fundo	86,15	71,79		Fundo	124,54	69,19
<b>Total</b>		120	100,00	<b>Total</b>		180	100,00

Tabela 6 – Análise imediata das amostras brutas.

(continuação)

Parâmetro	Tempo [s]	Massa [g]	Rendimento [%]	Parâmetro	Tempo [s]	Massa [g]	Rendimento [%]
F5	15	19,2	10,67	F12	15	2,97	2,48
	30	12,37	6,87		30	4,71	3,93
	60	13,08	7,27		60	4,64	3,87
	120	14,29	7,94		120	7,15	5,96
	Fundo	121,06	67,26		Fundo	100,53	83,78
<b>Total</b>	<b>180</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>120</b>	<b>100,00</b>		
F6	15	10,65	5,92	F13	15	8,98	4,99
	30	7,24	4,02		30	5,09	2,83
	60	10,26	5,70		60	8,42	4,68
	120	14,57	8,09		120	14,55	8,08
	Fundo	137,28	76,27		Fundo	142,96	79,42
<b>Total</b>	<b>180</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>180</b>	<b>100,00</b>		
F7	15	15,01	6,25	F14	15	8,8	4,89
	30	6,3	2,63		30	8,37	4,65
	60	13,51	5,63		60	10,86	6,03
	120	13,48	5,62		120	15,18	8,43
	Fundo	191,7	79,88		Fundo	136,79	75,99
<b>Total</b>	<b>240</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>180</b>	<b>100,00</b>		
F8	15	22,8	9,50	F15	15	10,54	5,86
	30	8,36	3,48		30	7,91	4,39
	60	17,72	7,38		60	11,27	6,26
	120	17,26	7,19		120	14,51	8,06
	Fundo	173,86	72,44		Fundo	135,77	75,43
<b>Total</b>	<b>240</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>180</b>	<b>100,00</b>		
F9	15	26,69	11,12	F16	15	8,21	3,42
	30	12,03	5,01		30	11,76	4,90
	60	16,48	6,87		60	17,41	7,25
	120	22,59	9,41		120	20,72	8,63
	Fundo	162,21	67,59		Fundo	181,9	75,79
<b>Total</b>	<b>240</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>240</b>	<b>100,00</b>		
F10	15	3,77	3,14	F17	15	13,75	5,73
	30	0,77	0,64		30	13,73	5,72
	60	1,79	1,49		60	16,85	7,02
	120	5,09	4,24		120	21,49	8,95
	Fundo	108,58	90,48		Fundo	174,18	72,58
<b>Total</b>	<b>120</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>240</b>	<b>100,00</b>		
F11	15	5,06	4,22	F18	15	25,4	10,58
	30	2,98	2,48		30	11,33	4,72
	60	2,78	2,32		60	16,15	6,73
	120	5,97	4,98		120	20,18	8,41
	Fundo	103,21	86,01		Fundo	166,94	69,56
<b>Total</b>	<b>120</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>240</b>	<b>100,00</b>		

Tabela 6 – Análise imediata das amostras brutas.

				(conclusão)			
Parâmetro	Tempo [s]	Massa [g]	Rendimento [%]	Parâmetro	Tempo [s]	Massa [g]	Rendimento [%]
F19	15	6,64	5,53	F24	15	5,06	2,81
	30	6,32	5,27		30	14,06	7,81
	60	6,95	5,79		60	14,93	8,29
	120	10,36	8,63		120	17,08	9,49
	Fundo	89,73	74,78		Fundo	128,87	71,59
	<b>Total</b>	120	100,00		<b>Total</b>	180	100,00
F20	15	12,12	10,10	F25	15	21,01	8,75
	30	7,39	6,16		30	13,46	5,61
	60	9,54	7,95		60	17,00	7,08
	120	16,86	14,05		120	18,94	7,89
	Fundo	74,09	61,74		Fundo	169,60	70,67
	<b>Total</b>	120	100,00		<b>Total</b>	240	100,00
F21	15	6,8	5,67	F26	15	31,44	13,10
	30	5,01	4,18		30	17,28	7,20
	60	6,68	5,57		60	13,88	5,78
	120	15,87	13,23		120	21,94	9,14
	Fundo	85,64	71,37		Fundo	155,47	64,78
	<b>Total</b>	120	100,00		<b>Total</b>	240	100,00
F22	15	17,65	9,81	F27	15	19,45	8,10
	30	6,43	3,57		30	10,67	4,45
	60	11,29	6,27		60	21,95	9,15
	120	11,33	6,29		120	16,56	6,90
	Fundo	133,3	74,06		Fundo	171,38	71,41
	<b>Total</b>	180	100,00		<b>Total</b>	240	100,00
F23	15	12,74	7,08				
	30	13,59	7,55				
	60	10,76	5,98				
	120	15,34	8,52				
	Fundo	127,57	70,87				
	<b>Total</b>	180	100,00				

Fonte: O autor (2024).

Cada conjunto de resultados demonstrados na Tabela 5 e na Tabela 6 permitiu uma análise comparativa da eficiência de cada configuração experimental em termos de rendimento à redução do teor de cinzas no carvão da camada Bonito em cada flotação. Evidenciam variações significativas nos rendimentos e massas recuperadas em diferentes tempos de coleta e entre as amostras analisadas. De maneira geral, observa-se que a maior parte da massa, e conseqüentemente do



rendimento, está concentrada no resíduo (fundo), o que é esperado, dado o comportamento típico de rejeitos durante processos de flotação. No entanto, o comportamento das amostras em tempos curtos, como 15 segundos, e ao longo dos intervalos crescentes demonstra reduções nos teores de cinzas e nos rendimentos iniciais.

Amostras como F10, F11 e F12, por exemplo, demonstram rendimentos no fundo superiores a 83%, com a amostra F11 apresentando teores de cinzas acima de 45%, indicando uma maior retenção de partículas no resíduo. Por outro lado, amostras como F23 e F25 exibem uma maior distribuição de massa nos tempos iniciais, sugerindo maior eficiência sob condições operacionais específicas. No entanto, ainda apresentam elevados rendimentos no fundo, uma característica observada em todas as amostras, que demonstraram rendimentos superiores a 64%.

A sistematização dos dados também permitiu identificar as melhores condições operacionais para a redução do teor de cinzas, destacando-se as amostras F2 e F21. Essas amostras obtiveram os menores teores de cinzas na flotação, com reduções de 63,22% e 60,97%, respectivamente, no tempo de flotação de 15 segundos. Além disso, esses resultados foram acompanhados por rendimentos de 4,24% para F2 e 9,21% para F21, refletindo a eficiência do processo em remover as impurezas enquanto mantém um rendimento satisfatório no curto intervalo de tempo.

#### 4.3 FLOTAÇÃO EM BANCADA DAS AMOSTRAS C1 E C2

Empregando os dois parâmetros otimizados anteriormente, F2 (100 g/t de óleo de pinho, 1000 g/t de óleo diesel e 4% de sólidos na cuba de flotação) e F21 (500 g/t de óleo de pinho, 1400 g/t de óleo diesel e 4% de sólidos na cuba de flotação), procedeu-se à realização dos ensaios de flotação das amostras C1 e C2 visando avaliar a eficácia da flotação nessas condições na redução do teor de cinzas em relação àquele encontrado na amostra coletada na empresa mineradora.

Tabela 7 – Teor de cinzas da amostra C1 e C2 com o parâmetro F2

<b>Tempo [s]</b>	<b>Teor de cinzas C1 [%]</b>	<b>Teor de cinzas C2 [%]</b>	<b>Rendimento C1 [%]</b>	<b>Rendimento C2 [%]</b>
15	24,61 ± 1,09	17,01 ± 0,04	16,33	13,93
30	21,02 ± 0,29	17,61 ± 0,01	2,82	5,63
60	20,85 ± 0,75	19,17 ± 0,03	12,30	8,21
120	22,37 ± 0,07	21,13 ± 0,07	10,77	11,19
Fundo	-	-	57,78	61,04

Fonte: O autor (2024).

Tabela 8 – Teor de cinzas da amostra C1 e C2 com o parâmetro F21

<b>Tempo [s]</b>	<b>Teor de cinzas C1 [%]</b>	<b>Teor de cinzas C2 [%]</b>	<b>Rendimento C1 [%]</b>	<b>Rendimento C2 [%]</b>
15	22,29 ± 0,08	18,20 ± 0,06	14,62	14,18
30	20,41 ± 0,12	15,50 ± 0,02	6,87	9,21
60	19,89 ± 0,33	19,07 ± 0,06	6,29	8,74
120	21,34 ± 0,30	22,17 ± 0,11	14,85	12,12
Fundo	-	-	57,37	55,75

Fonte: O autor (2024).

Na flotação das amostras C1 e C2 com os parâmetros F2 e F21, as maiores reduções no teor de cinzas foram observadas em diferentes tempos de coleta. Para o parâmetro F2 (Tabela 07), a maior redução para a amostra C1 foi de 41,37% em 60 s, enquanto para a amostra C2, a redução máxima foi de 40,43% em 15 s. No caso do parâmetro F21 (Tabela 08), a maior redução foi de 43,98% para a amostra C1 em 60 s, e de 45,72% para a amostra C2, que ocorreu aos 30 s. Foi considerado como 'Fundo' toda a fração e amostra não flotada, ou seja, aquela que permaneceu na cuba da célula da flotação após os 120 s de análise. Tomando como base os resultados dos experimentos de Tiscoski *et al.* (2023) e Campos (1979), não foi realizado a análise imediata do 'fundo' pois grande parte da matéria carbonosa já teria flotado, aumentando significativamente a quantidade do teor de cinzas nessa fração restante.

#### 4.4 SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA E MISTURA

O processo de separação granulométrica das amostras C1 e C2 foi realizado utilizando peneiras de malha #60, #120, #200 e #325. Devido à natureza ultrafina das partículas presentes nas amostras, optou-se pela utilização do processo de separação via úmida, que envolve a aplicação de uma corrente de água para promover a dispersão das partículas e facilitar o transporte das frações por meio das peneiras de granulometria fina, evitando a agregação das partículas, garantindo uma separação mais eficiente.

Tabela 9 – Separação granulométrica e teor de cinzas da amostra C1

<b>Mesh</b>	<b>Rendimento [%]</b>	<b>Teor de cinzas [%]</b>	<b>Redução de cinzas [%]</b>
#60	1,11	17,81 ± 0,27	49,84
#120	4,99	16,31 ± 0,28	54,07
#200	6,19	21,43 ± 0,12	39,65
#325	6,93	25,90 ± 0,33	27,06
Passante	80,78	-	-

Fonte: O autor (2024).

Tabela 10 – Separação granulométrica e teor de cinzas da amostra C2

<b>Mesh</b>	<b>Rendimento [%]</b>	<b>Teor de cinzas [%]</b>	<b>Redução de cinzas [%]</b>
#60	1,38	18,69 ± 0,06	34,53
#120	2,72	12,17 ± 0,02	57,37
#200	7,66	16,70 ± 0,09	41,50
#325	5,75	19,16 ± 0,06	32,89
Passante	82,48	-	-

Fonte: O autor (2024).

Apenas com a separação granulométrica ocorreu uma redução significativa do teor de cinzas. Na fração C2, utilizando a malha #120, o teor de cinzas foi reduzido de 28,55% para 12,17%, representando uma diminuição de aproximadamente

57,37%. De forma similar, na fração C1, a maior redução foi observada na mesma malha, com o teor de cinzas reduzido para 16,31%, equivalente a uma redução superior a 54%.

O rendimento de cada fração granulométrica foi extremamente baixo em comparação ao total passante pela peneira #325, somando a fração de #60 e #120 o rendimento chega a menos de 6,5% na C1 e para a C2 esse valor é ainda menor, cerca de 4,1%, o que pode ser atribuído à natureza ultrafina das partículas presentes nas amostras. Para superar essa limitação, foram realizados ajustes no processo para garantir uma massa suficiente para as flotações utilizando os parâmetros F2 e F21, que exigem 4% de sólidos, ou aproximadamente 120 gramas por flotação para a cuba do flotador. O ajuste consistiu na combinação das frações de mesma granulometria das amostras C1 e C2, juntamente com uma porção de uma coleta anterior. Essa mistura foi então submetida a uma nova análise do teor de cinzas, cujos resultados estão descritos na tabela abaixo (Tabela 11).

Tabela 11 – Teor de cinzas da mistura das amostras pela granulometria

<b>Mesh</b>	<b>Umidade de higroscopia [%]</b>	<b>Teor de cinzas [%]</b>
#60	1,63	25,66 ± 0,50
#120	1,48	14,39 ± 0,22
#200	1,26	16,86 ± 0,01
#325	1,57	18,71 ± 0,06

Fonte: O autor (2024).

#### 4.5 FLOTAÇÃO EM BANCADA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise imediata, rendimento e a porcentagem de redução do produto flotado classificado granulometricamente com o parâmetro F2, comparando com a amostra bruta (Tabela 11).

Tabela 12 – Análise da flotação com o parâmetro F2 das amostras granulométricas

<i>Mesh</i>	Tempo [s]	Umidade de higroscopia [%]	Teor de cinzas [%]	Redução do teor de cinzas [%]	Rendimento [%]
#60	15	1,06 ± 0,04	17,14 ± 0,35	33,21	39,33
	30	0,47 ± 0,01	17,96 ± 1,30	30,00	15,13
	60	0,82 ± 0,01	19,35 ± 0,66	24,61	10,03
	120	0,86 ± 0,05	25,61 ± 0,44	0,20	2,68
	Fundo	-	-	-	32,84
#120	15	1,17 ± 0,17	12,92 ± 0,07	10,21	47,20
	30	1,49 ± 0,24	12,93 ± 0,16	10,14	28,65
	60	1,28 ± 0,09	13,68 ± 0,09	4,93	15,33
	120	1,33 ± 0,12	13,73 ± 1,91	4,58	3,93
	Fundo	-	-	-	4,90
#200	15	1,16 ± 0,05	13,66 ± 0,25	19,01	39,78
	30	1,16 ± 0,10	14,83 ± 0,10	12,06	22,39
	60	1,14 ± 0,01	14,72 ± 0,77	12,74	20,50
	120	1,17 ± 0,01	17,07 ± 0,02	-1,23	11,15
	Fundo	-	-	-	6,18
#325	15	1,38 ± 0,12	14,30 ± 0,10	23,60	55,56
	30	1,26 ± 0,19	16,84 ± 0,51	10,01	13,30
	60	1,44 ± 0,03	18,32 ± 0,52	2,13	15,70
	120	1,30 ± 0,04	21,39 ± 0,23	-14,31	7,73
	Fundo	-	-	-	7,72

Fonte: O autor (2024).

Tabela 13 – Análise da flotação com o parâmetro F21 das amostras granulométricas (continua)

<i>Mesh</i>	Tempo [s]	Umidade de higroscopia [%]	Teor de cinzas [%]	Redução do teor de cinzas [%]	Rendimento [%]
#60	15	1,12 ± 0,06	17,27 ± 0,03	32,69	33,99
	30	1,25 ± 0,10	20,79 ± 0,07	19,01	22,70
	60	1,36 ± 0,05	18,11 ± 0,21	29,44	13,13
	120	1,44 ± 0,12	23,00 ± 0,02	10,39	7,34
	Fundo	-	-	-	22,83
#120	15	1,12 ± 0,02	12,40 ± 0,16	13,81	45,13
	30	1,13 ± 0,02	11,31 ± 2,14	21,38	29,25
	60	1,33 ± 0,04	11,96 ± 0,60	16,86	13,00
	120	1,55 ± 0,06	13,58 ± 0,15	5,61	7,13
	Fundo	-	-	-	5,50

Tabela 13 – Análise da flotação com o parâmetro F21 das amostras granulométricas (conclusão)

<i>Mesh</i>	Tempo [s]	Umidade de higroscopia [%]	Teor de cinzas [%]	Redução do teor de cinzas [%]	Rendimento [%]
#200	15	1,23 ± 0,14	14,45 ± 0,25	14,29	62,88
	30	1,18 ± 0,08	15,93 ± 0,04	5,55	17,52
	60	1,10 ± 0,01	16,57 ± 0,16	1,72	11,85
	120	1,25 ± 0,09	22,11 ± 0,54	-31,13	3,34
	Fundo	-	-	-	4,42
#325	15	1,33 ± 0,13	14,36 ± 0,15	23,28	53,58
	30	1,40 ± 0,14	15,55 ± 0,16	16,90	17,53
	60	1,33 ± 0,05	17,07 ± 0,17	8,81	14,93
	120	1,34 ± 0,08	21,25 ± 0,01	-13,54	5,39
	Fundo	-	-	-	8,57

Fonte: O autor (2024).

O percentual negativo de redução refere-se ao aumento do teor de cinzas na amostra flotada no determinado tempo, o que indica que a parte carbonosa da amostra foi efetivamente flotada nos primeiros segundos do processo de flotação, deixando para trás as impurezas, que se concentraram na fração residual. Esse fenômeno ocorre porque, durante o processo de flotação, o material mais leve, geralmente o carbono, é arrastado pelas bolhas de ar, enquanto as impurezas mais densas, como as cinzas, permanecem na parte inferior da cuba.

O processo resultou em reduções significativas no teor de cinzas, com os melhores resultados observados variando entre 11% a 13%, obtidos na malha #120. Em termos de rendimento, as flotações apresentaram valores variando de 60% a 70%, considerando a soma das frações coletadas após 15s, 30s e 60s de uma única batelada. Esse resultado é consistente, uma vez que o teor de cinzas nas amostras não variou mais do que 4% entre os diferentes tempos de flotação.

## 5 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise preliminar de viabilidade econômica considerou que o processo de flotação é responsável por tratar até 20% do material que passa pelos britadores da indústria carbonífera de referência. A fração flotada nas células 1 e 2 (C1 e C2)

corresponde a 12% da massa total processada, conforme a média dos rendimentos das flotações F2 e F21 realizadas em 15 s e 30 s. A análise dos teores de cinzas nas amostras C1 e C2, conforme evidenciado na Tabela 9 e na Tabela 10, apontou que a junção das frações #60 e #120 é a opção mais adequada, apresentando teores de cinzas de 17,81% e 16,31% na amostra C1, e de 18,69% e 12,17% na C2, respectivamente.

Dessa forma, optou-se pelo uso exclusivo de uma peneira de malha #120, capaz de reter simultaneamente as frações #60 e #120, eliminando a necessidade de separação adicional. Essa simplificação reflete as práticas operacionais da carbonífera de referência, onde o material flotado das células é misturado. Sob essas condições, o rendimento do processo foi estimado em 15%. Para cada tonelada de material processado (entrada dos britadores), cerca de 3,8 kg de carvão seriam retidos na peneira #120, calculados com base nos seguintes fatores: 20% do material tratado passa para a célula de flotação, 12% é flotado e 15% é retido na separação granulométrica.

A partir de 1 t de carvão bruto, obtém-se aproximadamente 3,6 kg de carvão com baixo teor de cinzas ( $\pm 13\%$ ). Considerando que o rendimento do processo de fabricação de óxido de grafeno é de cerca de 50%, segundo condições de síntese reportadas por Sanchez (2023) e Sanchez *et al.* (2024a, 2024b), seria possível produzir 1,8 kg de óxido de grafeno. Seguindo a mesma lógica, para produzir 1 t de carvão com baixo teor de cinzas, seriam necessárias 277,8 t de carvão bruto, enquanto a produção de 1 t de óxido de grafeno demandaria o dobro desse valor, cerca de 555,6 t.

Com base no preço estimado pelo CIP-SILOS (ANEEL, 2024), de R\$ 406,38 por tonelada de carvão do tipo CE 4500, o custo de produção de 1 t de material base para a síntese de óxido de grafeno com um teor de cinzas aproximado de 13% (conforme Tabela 13) seria de aproximadamente R\$ 1.344,18, e para a obtenção de 1 t de óxido de grafeno, o custo apenas do carvão seria algo próximo de R\$ 2.688,36, tornando o processo economicamente atrativo dentro das condições estabelecidas considerando que, segundo Chagas (2021), o preço de mercado de 1 g de óxido de grafeno reduzido ou em pó pode chegar a US\$ 97,00 (aproximadamente R\$ 582,00, com o dólar a R\$ 6,00). Além disso, conforme Wyss (2022), o preço por tonelada de grafeno pode variar entre US\$ 60 mil e US\$ 200 mil, dependendo das especificações do material, o que equivale a cerca de R\$ 360 mil a R\$ 1,2 milhões. Contudo, é

importante destacar que os valores do carvão baixo em cinzas foram estimados com base em carvão de partida com teor de cinzas de 43%, e podem não refletir diretamente o preço do produto em questão.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram a viabilidade técnica dos ensaios de flotação em escala de bancada para o beneficiamento do carvão sub-betuminoso da camada Bonito. Com o ajuste e otimização de parâmetros amplamente utilizados em unidades industriais, foi possível reduzir significativamente o teor de cinzas nas amostras analisadas. Inicialmente, a amostra bruta apresentava 58,37% de cinzas, enquanto o processo de flotação ajustado reduziu para 21,47% e 22,79%, usando os parâmetros F2 (100 g/t de óleo de pinho, 1000 g/t de óleo diesel e 4% de sólidos) e F21 (500 g/t de óleo de pinho, 1400 g/t de óleo diesel e 4% de sólidos), respectivamente. Com a separação granulométrica, os teores de cinzas foram ainda mais reduzidos, alcançando 11,31% no *mesh* #200 com o parâmetro F21, evidenciando o potencial técnico das metodologias aplicadas.

Apesar da eficiência técnica, a aplicação produtiva enfrenta limitações econômicas devido ao alto custo dos reagentes (óleo diesel e óleo de pinho) e à necessidade de novos equipamentos. No entanto, os métodos empregados mostraram-se promissores, abrindo possibilidades comerciais para o carvão sul- Catarinense como precursor de produtos nanotecnológicos de alta performance, reforçando seu papel estratégico no desenvolvimento de materiais de carbono avançados.

Futuros estudos devem avaliar a viabilidade econômica das rotas de beneficiamento em larga escala, além dos impactos ambientais das técnicas empregadas. Trabalhos complementares são essenciais para alinhar o uso do carvão beneficiado aos princípios de sustentabilidade e às diretrizes da Transição Energética Justa, maximizando o aproveitamento do recurso mineral com responsabilidade ambiental.



## REFERÊNCIAS

ABDELHALIM, A. O. E.; et al. **Functionalisation of graphene as a tool for developing nanomaterials with predefined properties**. J. Mol. Liq., v. 348(15), p. 118368, 2022.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Estadual de Santa Catarina. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual/santa-catarina>>. Acesso em: 18 dez. 2024.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (2024). Homologação do preço do carvão mineral nacional a ser adquirido pelo Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, nos termos da Lei nº 14.299/2022 e da Portaria nº 768/2024, emitida pelo Ministério de Minas e Energia – MME. Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/cedoc/areh20243410\\_1.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/areh20243410_1.pdf)>

ASIM, N.; et al. **Application of graphene-based materials in developing sustainable infrastructure: An overview**, Composites Part B: Engineering, v. 245, p. 110188, 2022.

ASTM D3173 - American Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke**. 1996. Acesso em: 18 ago 2023.

ASTM D3174 - American Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal**. 1996. Acesso em: 18 ago 2023.

ASTM D3175 - American Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke**. 1996. Acesso em: 18 ago 2023.

ASTM D388 - American Society for Testing and Materials. **Standart Classification of Coals by Rank**. 1972 Acesso em: 18 ago 2023

ASTM D5373-02 - American Society for Testing and Materials: **Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon,Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal**. 2002. Acesso em: 18 ago 2023

BONETTI, B. et al. **CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> monitoring in the air of underground coal mines in southern Brazil and GHG emission estimation**. 2019. REM - International Engineering Journal, v. 72, p. 635–642

BRAGA, A. S. et al. **Desenvolvimento de reagentes alternativos na flotação de minérios de carvão**. 2022. Anais do XXIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Armação dos Búzios. Anais eletrônicos, Campinas-SP, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/entmme-2022/trabalhos/desenvolvimento-de-reagentes-alternativos-na-flotacao-de-minerios-de-carvao?lang=pt-br>>

BRUM, I. A. S. **Concentração de partículas minerais grossas de fluorita em coluna de flotação**. Porto Alegre, 2004, 103p. Tese de Doutorado em Engenharia-Escola de Engenharia, PPGEM/UFRGS

BRUM, I. A. S.; JESUS, L. G. M. **Flotação de rejeitos do beneficiamento gravimétrico de carvão mineral**. 2016. Disponível em: <[https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es\\_B7\\_B8\\_B9/B9\\_ARTIGO\\_01.pdf](https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_B7_B8_B9/B9_ARTIGO_01.pdf)>. Acesso em: 12 nov. 2023.

CAMPOS, A. R.; ALMEIDA, S. L. M.. **Flotação de carvão de Santa Catarina em escala de bancada e piloto**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1981. (Série Tecnologia Mineral, 15).

CAMPOS, A. R.; et al. **Flotação de carvão: estudos em escala de bancada**. 1979. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1979. (Série Tecnologia Mineral, 01)

CARRISSO, R. C. C.; POSSA, M. V.; **Carvão mineral: aspectos gerais e econômicos**. 1995. Rio de Janeiro: CETEM/MCT,

CASTRO, A. F. de.; **Análise do sistema de reagentes na flotação de finos de carvão mineral de Moatize, Moçambique**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais). Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2016

CHAGAS, D. C. (2021). **Viabilidade técnico-econômica do óxido de grafeno**. Brazilian Journal of Development, 7(1), 6777–6792. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-459>

CHAVES, A. P. **Flotação de carvão de Santa Catarina (Região do Alto Metalúrgico)**. 1983. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983. doi:10.11606/T.3.1983.tde-02052024-135613.

DAVENPORT, J; WAYTH, N. **Statistical review of world energy**. Energy Institute, 2024.

DAVILA, G. B. G. **Estudo de flotação convencional em bancada do lodo da Carbonífera Criciúma**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais). Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.

DÁVILA, G.B.G; BRUM, I.A.S. **Flotação de lodos do beneficiamento de carvão para recuperação de matéria carbonosa**. 2013. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia - GO. Out. 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional (BEN) 2024**. Ministério de Minas e Energia - Brasil, 2024.

WYSS, K. **Grafeno, o material que pode aumentar em 10 vezes a velocidade dos chips**. Newsletter FastCompany. 2022. Disponível em: <<https://fastcompanybrasil.com/tech/grafeno-o-material-que-pode-aumentar-em-10-vezes-a-velocidade-dos-chips/>>.

FINCH, J. A.; DOBBY, G. S. **Column flotation: A selected review**. Part I. *International Journal of Mineral Processing*, v. 33, n. 1-4, p. 343–354, nov. 1991.

FUERSTENAU, M. C. **Principles of mineral processing**. 2003. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

GT-SC. Ministério de Minas e Energia. **Relatório do Grupo de Trabalho para Avaliar as Atividades de Geração Termelétrica a Carvão Mineral e de Mineração de Carvão Mineral no Estado de Santa Catarina**. 30 abril 2021.

HAERI, Z.; et al. **Recent progress on the metal-organic frameworks decorated graphene oxide (MOFs-GO) nano-building application for epoxy coating mechanical-thermal/flame-retardant and anti-corrosion features improvement**. *Prog. Org. Coat.*, v. 163, p. 106645, 2022.

HOANG, V. C.; HASSAN, M.; GOMES, V. G. **Coal derived carbon nanomaterials – Recent advances in synthesis and applications**. *Applied Materials Today*, v. 12, p. 342-358, 2018.

KARMAKAR, A.; SINGH, R.; SINGH, R. K.; SINGH, R. K. **Beneficiation of high ash Indian non-coking coal by dry deshaling using a novel air table**. *Fuel*, v. 354, p. 129-140, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236124018118>. Acesso em: 24 nov. 2024.

LEE, S.-Y.; MAHAJAN, R. L. **A facile method for coal to graphene oxide and its application to a biosensor**. *Carbon*, v. 181, p. 408-420, 2021.

LI, K.; LIU, G.; ZHENG, L.; ZHU, Y.; ZHANG, Y. **Coal-derived carbon nanomaterials for sustainable energy storage applications**. *New Carbon Materials*, v. 36, n. 1, p. 133-154, 2021.

LIU, Q., LIU, J., PENG, Y., & WANG, L. (2018). **Improving the recovery of ultrafine chalcopyrite by flotation using a new collector**. *Minerals Engineering*, 121, 27-34

PEREIRA, Z. et al. Palynology of Bonito and Barro Branco coal seams from Rio Bonito Formation (Lower Permian of Paraná Basin) in the Criciúma coal region, southernmost Brazil. 2019. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 91, p. 27–35

PINTO, A. et al. **Flotação**. 2010. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia Coordenação de Processos Minerários - COPM. Tratamento de Minérios, 5a Edição -Capítulo 11 -pág. 465-513. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/744/1/CCL00330010.pdf>>.

REDIVO, Rosimeri Venâncio. **Caracterização tecnológica do carvão das camadas Barro Branco e Bonito para fins energéticos na região de Criciúma - SC**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Acesso em: 22 out. 2023.

RUIZ, A. S. e CHAVES, A. P. **Flotação do carvão contido em um rejeito carbonoso**. Rem: Revista Escola de Minas [online]. 2009, v. 62, n. 3. Acesso em: 23 nov. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672009000300009>>.

- RUIZ, A. S.; **Flotação do carvão contido no rejeito da barragem El Cantor**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. doi:10.11606/D.3.2009.tde-01072009-154601.
- SAHOO, S., B, S., & TRIPATHY, S. **Características do carvão e seus produtos de combustão**. 2014. Procedia Engenharia, 90, 195-203.
- SANCHEZ, S.N.B. **Preparation and Characterization of Graphene Oxide-Based Materials from Brazilian Mineral Coals**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 132, 2023.
- SANCHEZ, S.N.B.; et al. **Adsorption of ciprofloxacin on graphene oxide-based adsorbents: synthesis, characterization and DFT calculations**. Water, Air & Soil Poll., v. 235(417), 2024b.
- SANCHEZ, S.N.B.; et al. **Synthesis of multi-layer graphene oxide from HCl-treated coke and Brazilian coals by sulfuric acid thermal exfoliation and ozone oxidation**. Heliyon, 10(e30546), p. 1-12, 2024a.
- SANTOS & DUTRA. **Concentração de Partículas Mineraias Finas e Ultrafinas por Eletroflotação**. UFRJ, 2011, 21-22p, HOLOS, Ano 27, Vol5.
- SCHNEIDER, J. C.; BASEI, M. A. S.; UHRY, A. L. **Estratigrafia da Bacia Carbonífera de Santa Catarina: revisão e síntese**. 2013. Pesquisas em Geociências, v. 40, p. 1-16
- SIECESC. **Dados Estatísticos**. Disponível em: < [https://carvaomais.com.br/wp-content/uploads/2024/02/dados\\_estatisticos\\_ano\\_2022.pdf](https://carvaomais.com.br/wp-content/uploads/2024/02/dados_estatisticos_ano_2022.pdf)>. Acesso em: 04 out. 2022.
- TISCOSKI, L.; MARCINEIRO, L.; TONELLO, J.; AQUINO, T.; VIRMOND, E.. Otimização do processo de operação de uma célula de flotação em bancada para carvão sub-betuminoso sul catarinense. **Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense - SICT-Sul**, Brasil, out. 2023. Disponível em: <<https://eventoscientificos.ifsc.edu.br/index.php/sictsul/12-sict-sul/paper/view/4069>>. Data de acesso: 25 Out. 2024.
- VIRMOND, E.; Dos SANTOS, D.A.; BONETTI, B.; WATZKO, E.S. **Perspectivas em ciência, tecnologia e inovação para o carvão catarinense no contexto da transição energética**. In: XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – XIV CBPE, Manaus/AM, 16 a 18/10/2024.
- XIA, W.; XIE, G.; PENG, Y. **Recent advances in beneficiation for low rank coals**. Powder Technology, v. 277, p. 206–221, 1 jun. 2015.
- ZANCAN, P. et al. **Efeito do arraste de matéria inorgânica em processo de flotação de carvão mineral de Moatize, em Moçambique**. 2019. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte-MG. Nov. 2019
- ZANCAN, P. M. et al. **Uso de flotação para a recuperação de matéria carbonosa presente em lodos do beneficiamento de carvão**. In: **anais do vi congresso brasileiro de carvão mineral**. 2021, Porto Alegre. Anais eletrônicos, Campinas-SP,

Galoá, 2021. Disponível em: <<https://proceedings.science/cbcm-2021/trabalhos/uso-de-flotacao-para-a-recuperacao-de-materia-carbonosa-presente-em-lodos-do-ben?lang=pt-br>>.

ZANCAN, P. M. **Beneficiamento de carvão moçambicano por flotação: Efeito da proximidade com estruturas geológicas intrusivas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais). Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2020

ZANCAN, P. M.; BRUM, I.A.S. **Recuperação de matéria carbonosa presente em lodos do beneficiamento de carvão por meio de flotação**. 2015. SIC - XXVII Salão de iniciação científica da UFRGS. Porto Alegre – RS