



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Morgana Nuernberg Sartor Faraco

**Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região
sul de Santa Catarina**

Florianópolis
2022

Morgana Nuernberg Sartor Faraco

**Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da
região sul de Santa Catarina**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Fabiano Raupp Pereira, Dr.
Coorientador: Prof. Oscar R. K. Montedo, Dr.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Faraco, Morgana Nuernberg Sartor

Valorização de frações residuais geradas no
beneficiamento de carvão mineral da região sul de Santa
Catarina / Morgana Nuernberg Sartor Faraco ; orientador,
Fabiano Raupp-Pereira, coorientador, Oscar R. K. Montedo,
2023.

136 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. I. Raupp
Pereira, Fabiano. II. R. K. Montedo, Oscar. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

Morgana Nuernberg Sartor Faraco

**Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região
sul de Santa Catarina**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. João Batista Rodrigues Neto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro, Dr.
Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal - IPVC

Profa. Sabrina Arcaro, Dra.
Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC

Prof. Thiago Fernandes De Aquino, Dr.
Centro Universitário SATC - UNISATC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor (a) em Ciência e Engenharia de Materiais.

Prof. João Batista Rodrigues Neto, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Fabiano Raupp-Pereira, Dr.
Orientador

Prof. Oscar R. K. Montedo, Dr.
Coorientador

Florianópolis, 2022

Este trabalho é dedicado ao meu esposo Sandro, minhas filhas Catarina e Helena, meus pais Pedro Paulo e Neiva e meus irmãos. Não podendo deixar de dedicar aos meus colegas de laboratório que muito contribuíram para este estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PGMAT) da UFSC, pela oportunidade de participar de um programa de qualidade reconhecida.

Agradeço imensamente à Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), pela estrutura de laboratórios e apoio disponibilizado durante todo o desenvolvimento desta tese.

Ao orientador Professor Dr. Fabiano Raupp Pereira pela confiança, compreensão, incentivo e ensinamentos durante toda a caminhada do doutoramento.

Ao coorientador Professor Dr. Oscar R. K. Montedo pelos conselhos, ensinamentos e disponibilidade do Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec) para o desenvolvimento da pesquisa.

À minha parceira e amiga de doutoramento Juliana Acordi, que foi fundamental para o desenvolvimento deste estudo.

Ao projeto Circular Co@l e todos os participantes que direta ou indiretamente contribuíram para este estudo, um agradecimento mais que especial para minha colega Eduarda Fraga Olivo que me apoiou, incentivou e contribuiu muito para finalização da tese.

Ao Lisandro Simão pelos incentivos e parceria durante todo o doutoramento.

Aos meus pais Neiva Nuernberg Sartor e Pedro Paulo Sartor pelo apoio, carinho, confiança e torcida em todas as minhas etapas de estudo.

Ao meu esposo Sandro Roberto Faraco pelo suporte, auxílio e apoio neste período.

As minhas filhas Catarina e Helena Sartor Faraco pelo carinho e compreensão.

Aos meus irmãos pelo carinho e torcida pelo bom desempenho.

As empresas mineradoras que foram parceiras e permitiram visitas e coleta dos materiais para este estudo.

À Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), Centro Tecnológico SATC (CT) e ao Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIESESC) que contribuíram com dados referente à situação dos rejeitos de carvão na bacia carbonífera Catarinense, além de ensaios, contatos e todo o apoio necessário, o meu muito obrigada.

“O que prevemos raramente ocorre, o que menos esperamos geralmente acontece” (Benjamin Disraeli).

RESUMO

O carvão mineral é uma importante matéria-prima para a produção de energia em todo o mundo e o Brasil está entre os países que possuem as maiores reservas de carvão mineral concentradas nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. A qualidade do carvão varia de acordo com a região de extração sendo que no Brasil, cerca de 50% da totalidade do ROM (do inglês, *run-of-mine*), são descartados como rejeito (material não carbonoso). Desde o início do século XX, a quantidade de rejeito depositado em aterros na região carbonífera de Santa Catarina, já alcançou 300 milhões de toneladas, sendo que todos os meses são ainda adicionadas mais 300 mil toneladas. O descarte destes materiais se deve à atividade extrativa de seis diferentes empresas pertencentes ao consórcio de fornecimento de carvão energético da Termelétrica Jorge Lacerda, localizada na cidade de Capivari de Baixo - SC. Desta forma, torna-se importante para o desenvolvimento sustentável da região e do país a aplicação de princípios inovadores que visem a valorização de frações residuais contidas nos rejeitos com características relacionadas a sua origem geológica e o tipo de processo de beneficiamento utilizado. Neste contexto, frações seletivas foram coletadas de forma sistêmica na fonte geradora e analisadas utilizando a sequência apresentada na sistemática CPQvA (Classificação, Potencialidade, Quantidade e viabilidade, Aplicação) para valorização de resíduos a partir da identificação de características físico-químicas potenciais atribuídas por diferentes aspectos de geolocalização e de operações de beneficiamentos aplicados na obtenção de carvão energético da região sul catarinense. Os resultados mostraram que o aspecto geológico incluindo idade e profundidade dos depósitos de carvão, dão a característica argilosa para a fração mineral descartada. O beneficiamento fornece o caráter piritoso à fração de rejeito descartada, a depender da sequência de descartes adotada pela mineradora. O descarte conjunto dos rejeitos torna difícil o processo de valorização, no entanto, o descarte seletivo propicia a potencialização das qualidades das frações de ROM descartadas em materiais como argamassa, zeólitas, geopolímeros, concreto asfáltico entre outros.

Palavras-chave: Carvão, Rejeitos Minerais, Caracterização, Valorização de Resíduos.

ABSTRACT

Mineral coal is an important raw material for energy production worldwide. Brazil's most significant mineral coal reserves are concentrated in Rio Grande do Sul, Santa Catarina, and Paraná. Coal quality varies according to the extraction region, and in Brazil, about 50% of the total ROM (run-of-mine) is discarded as tailings (non-carbonaceous material). Since the beginning of the 20th century, the amount of waste deposited in landfills in the coal region of Santa Catarina has already reached 300 million tons, with an additional 300,000 tons being added every month. These materials are disposed of due to the extractive activity of six companies in the Thermoelectric Jorge Lacerda energy coal consortium, located in Capivari de Baixo - SC. In this way, it becomes crucial for the sustainable development of the region and the country to apply innovative principles that aim to valorize residual fractions contained in the tailings with characteristics related to their geological origin and the improvement process used. In this context, selective fractions were systematically collected at the generating source and analyzed using the sequence presented in the CPQvA systematic (Classification, Potentiality, Quantity and Feasibility, Application) for waste recovery. This systematic is based on identifying potential physicochemical characteristics attributed to different aspects of geolocation and processing operations applied in obtaining energy coal from the southern region of Santa Catarina. The results showed that the geological aspect, including the coal deposits' age and depth, gives the clayey character to the discarded mineral fraction. Processing provides the pyrite character to the discarded tailings fraction, depending on the disposal sequence adopted by the mining company. The joint disposal of waste makes the recovery process difficult; however, selective disposal allows the enhancement of the qualities of the ROM fractions discarded in materials to use in mortar, zeolites, geopolymers, and asphaltic concrete, among others.

Keywords: Coal, Mineral tailings, Characterization, Waste Valorization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Diagrama esquemático do desenvolvimento deste estudo.....	29
Figura 2-1 – Gráfico comparativo entre a produção e o consumo de carvão em regiões do mundo no ano de 2021.....	31
Figura 2-2 – Classificação do carvão quanto a origem da matéria orgânica, ambiente deposicional relacionando com a composição de carvão retirada do ROM de uma mineração do sul de Santa Catarina.	33
Figura 2-3 – Estágios da matéria orgânica durante o processo de carbonificação.....	35
Figura 2-4 – Delimitação das jazidas carboníferas localizadas na borda da bacia do Paraná considerando as áreas de ocorrências de camadas de carvão com espessuras superiores a 50 cm. Adaptado de Aboarrage e Lopes (1987).....	37
Figura 2-5 – Localização da bacia carbonífera catarinense.....	38
Figura 2-6 – Camadas estratigráficas da formação Rio Bonito.....	39
Figura 2-7 – Jigue (a esquerda) seguindo a direita pelo elevador de canecos por onde sai o rejeito na concentração de carvão de uma mineradora do sul de Santa Catarina.....	43
Figura 2-8 – Meio Denso (a esquerda) e ciclone de meio denso de uma mineradora do sul de Santa Catarina.....	45
Figura 2-9 – Processo por espirais de uma mineradora do sul de Santa Catarina mostrando no detalhe (a direita) uma das espirais da operação de beneficiamento.....	46
Figura 2-10 – Processo de Flotação de uma mineradora do sul de Santa Catarina com o detalhe (a direita) da espuma resultante.....	47
Figura 3-1 – Divisão geográfica da bacia carbonífera catarinense de acordo com a geolocalização e localização das empresas onde foram realizadas as coletas das frações residuais.....	55
Figura 3-2 – Etapas iniciais do desenvolvimento da tese.....	56
Figura 3-3 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora α (amarela) e as frações residuais geradas.....	58
Figura 3-4 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora β (cinza) e as frações residuais geradas.....	59
Figura 3-5 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora γ (vermelha) e as frações residuais geradas.....	60

Figura 3-6 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora Δ (magenta) e as frações residuais geradas.	61
Figura 3-7 – Representação do beneficiamento resultado em quatro frações residuais resultantes da concentração do carvão da empresa ϵ	62
Figura 3-8 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora σ (azul) e a fração residual gerada.	63
Figura 3-9– Sistemática CPQvA para a valorização de resíduos.	64
Figura 3-9 – Ensaio de caracterização realizados nas 24 frações residuais.	66
Figura 4-1 – Potencial hidrogeniônico das amostras em 3 períodos diferentes: após coleta, 12 meses após coleta e 36 meses após coleta.	75
Figura 4-2 – Teor de óxidos de alumina e sílica e a razão Al_2O_3/SiO_2 das frações residuais. .	82
Figura 4-3 – Distribuição granulométrica acumulada das frações residuais grossas resultantes do beneficiamento por britador, jigue, meio denso e mesa de ar.	85
Figura 4-4 – Distribuição granulométrica acumulada das frações residuais resultantes do beneficiamento por ciclone, flotação e bacia de decantação.	86
Figura 4-5 – Curvas de análise térmica TG e DTG das frações residuais classificadas como caulínicas, ílíticas e piritosas em atmosfera de nitrogênio com taxa de $20\text{ }^\circ\text{Cmin}^{-1}$ até à temperatura de $1100\text{ }^\circ\text{C}$	88
Figura 4-6 – Curvas de análise térmica (TG) das frações residuais classificadas como caulínicas, ílíticas e piríticas em atmosfera de oxigênio com taxa de $20\text{ }^\circ\text{Cmin}^{-1}$ até a temperatura de $1100\text{ }^\circ\text{C}$	89
Figura 4-7 – Curvas de análise térmica (ATD) das frações residuais classificadas como caulínicas, ílíticas e piríticas em atmosfera de nitrogênio com taxa de $20\text{ }^\circ\text{Cmin}^{-1}$ até a temperatura de $1100\text{ }^\circ\text{C}$	90
Figura 4-8 – Curvas de análise térmica (ATD) das frações residuais classificadas como caulínicas, ílíticas e piríticas em atmosfera de oxigênio com taxa de $20\text{ }^\circ\text{Cmin}^{-1}$ até a temperatura de $1100\text{ }^\circ\text{C}$	92
Figura 4-9 – Identificação das fases mineralógicas (DRX) das frações residuais resultantes do beneficiamento da camada Barro Branco: (BB:Md(α), BB:Ci(α), BB:Fl(α), BB:Ji(ϵ)-1 e BB:Ji(ϵ)-2).	93
Figura 4-10 – DRX das frações residuais resultantes do beneficiamento da camada Barro Branco da empresa Δ : BB:Ma(Δ)-1, BB:Ma(Δ)-2, BB:Ma(Δ)-3, BB:Br(Δ), BB:Ci(Δ) e BB:Bd(Δ).	95

Figura 4-11 – DRX das frações residuais resultantes do beneficiamento da camada Bonito (BO:Md(γ), BO:Md(ϵ), BO:Ji(γ)-1, BO:Ji(γ)-2, BO:Ji(γ)-3 e BO:Ji(ϵ)).	96
Figura 4-12 – DRX das frações residuais do beneficiamento de antigos depósitos de rejeitos: RE:Ji(β)-1, RE:Ji(β)- 2, RE:Ji(β)- 3 RE:Ji(β)-4, RE:Ji(β)-5, RE:Bd(β), RE:Ji(σ)).	98
Figura 4-13 – Geração de rejeito em Santa Catarina em milhões de toneladas por ano versus quantidade acumulada.	100
Figura 4-14 – Mapa de localização dos depósitos de rejeitos da Bacia Carbonífera Catarinense ativos (verde) e inativos (vermelho).	101
Figura 4-15 – Depósitos de rejeitos ativos conforme sua localização na BCC.	102
Figura 4-16 – Cobogó obtido com a fração residual BO:Md(γ).	111
Figura 4-17 – Testes de fertilizantes utilizando fração residual BB:Bd(Δ).	112
Figura 4-18 – Detalhes da preparação das amostras geopoliméricas.	113
Figura 4-19 – Corpos de prova de CAUQ desenvolvidos com a fração BB:Fl(α).	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-1 – Trabalhos relacionados à tese em revisão/submetidos/publicados em periódicos e anais de congressos.....	19
Quadro 4-1 – Associação das diferentes frações residuais coletadas por grupos de características a partir da geologia e do processamento para a análise de aplicabilidade.....	108
Quadro 4-2 – Principais linhas de pesquisa oriundas desta tese e pesquisadores envolvidos.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Identificação das 24 frações residuais coletadas a partir de: camada, processo de beneficiamento e empresa mineradora (e cor associada).	57
Tabela 4-1 – Resultados dos testes de lixiviação e solubilização da fração residual BB:Md(α) e de diferentes rejeitos de mineração de carvão.	73
Tabela 4-2 – Dados de umidade, massa específica e absorção dos rejeitos.	77
Tabela 4-3 – Composição química dos resíduos com os percentuais dos principais óxidos....	80
Tabela 4-4 – Determinação do teor de enxofre em frações residuais.....	83
Tabela 4-5 – Análise elementar CHNS/O de algumas frações residuais.	84
Tabela 4-6 – Quantidades das frações residuais geradas por mês, separadas por camadas e rebeneficiamento de antigos depósitos de rejeitos.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM - *American Society for testing and materials*

BB:Md(α) – Rejeito da camada Barro Branco, descartado no processo de meio denso da empresa α .

BO:Md(γ) – Rejeito da camada Bonito, descartado no processo de meio denso da empresa γ .

BO:Md(ϵ) – Rejeito da camada Bonito, descartado no processo de meio denso da empresa ϵ .

BO:Ji(γ)-1 – Rejeito da camada Bonito, descartado no primeiro corte do jigue da empresa γ .

BO:Ji(γ)-2 – Rejeito da camada Bonito, descartado no segundo corte do jigue da empresa γ .

BO:Ji(γ)-3 – Rejeito da camada Bonito, descartado no terceiro corte do jigue da empresa γ .

RE:Ji(β)-1 – Rejeito de rebeneficiamento de antigas pilhas de rejeitos, descartado no primeiro corte do jigue de dois cortes da empresa β .

RE:Ji(β)-2 – Rejeito de rebeneficiamento de antigas pilhas de rejeitos, descartado no segundo corte do jigue de dois cortes da empresa β .

RE:Ji(β)-3 – Rejeito de rebeneficiamento de antigas pilhas de rejeitos, descartado no primeiro corte do jigue de três cortes da empresa β .

RE:Ji(β)-4 – Rejeito de rebeneficiamento de antigas pilhas de rejeitos, descartado no segundo corte do jigue de três cortes da empresa β .

RE:Ji(β)-5 – Rejeito de rebeneficiamento de antigas pilhas de rejeitos, descartado no terceiro corte do jigue de três cortes da empresa β .

BO:Ji(ϵ) – Rejeito da camada Bonito, descartado no jigue da empresa ϵ .

BB:Ji(ϵ)-1 – Rejeito da camada Barro Branco, descartado no primeiro corte do jigue de dois cortes da empresa ϵ .

BB:Ji(ϵ)-2 – Rejeito da camada Barro Branco, descartado no segundo corte do jigue de dois da empresa ϵ .

RE:Ji(σ) – Rejeito de rebeneficiamento de antigas pilhas de rejeitos, descartado no jigue da empresa σ .

RE:Bd(β) – Rejeito de rebeneficiamento de antigas pilhas de rejeitos, descartado na bacia de decantação da empresa β .

BB:Ma(Δ)-1 – Rejeito da subcamada Forro da camada Barro Branco, descartado na mesa de ar da empresa Δ .

BB:Ma(Δ)-2 – Rejeito da subcamada Quadração da camada Barro Branco, descartado na mesa de ar da empresa Δ .

BB:Ma(Δ)-3 – Rejeito da subcamada Banco da camada Barro Branco, descartado na mesa de ar da empresa Δ .

BB:Fl(α) – Rejeito da camada Barro Branco, descartado no processamento por flotação da empresa α .

BB:Br(Δ) – Rejeito da camada Barro Branco, descartado no britador da empresa Δ .

BB:Ci(Δ) – Rejeito da camada Barro Branco, descartado no processo de ciclone da empresa Δ .

BB:Bd(Δ) – Rejeito da camada Barro Branco, descartado na bacia de decantação da empresa Δ .

BB:Ci(α) – Rejeito da camada Barro Branco, descartado no processamento por ciclone da empresa α .

BCC – Bacia Carbonífera Catarinense

CE 4500 – Carvão energético com poder calorífico de 4500 kcal/kg

DAM – Drenagem ácida de mina

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

DRX - Difração de raios X

EC - Economia Circular

EPA - Agência de Proteção Ambiental

FRX - Fluorescência de raios X

GCEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

MME – Ministério de minas e energia

PF – Perda ao fogo

pH – Potencial hidrogeniônico

PNM – Plano Nacional de Mineração

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

ROM - “*Run of mine*” (direto da mina, minério bruto não classificado)

RSI - Resíduo Sólido Industrial

SIECESC - Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina

TEJ – Transição Energética Justa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	30
1.1.1	Objetivo Geral.....	30
1.1.2	Objetivos Específicos	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
2.1	FORMAÇÃO GEOLÓGICA	31
2.1.1	Bacia carbonífera catarinense	36
2.1.2	Camadas de Carvão da Bacia Carbonífera Catarinense	39
2.2	BENEFICIAMENTO DO CARVÃO	41
2.2.1	Jigue	42
2.2.2	Meio Denso	44
2.2.3	Espirais e Flotação	45
2.2.4	Mesa de Ar.....	47
2.3	REJEITOS DE CARVÃO	48
2.4	VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE CARVÃO	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	MATERIAIS.....	56
3.2	MÉTODOS	63
3.2.1	Classificação	64
3.2.2	Potencialidades.....	65
3.2.3	Quantidade/viabilidade	68
3.2.4	Aplicação	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
4.1	CLASSIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES RESIDUAIS	70
4.2	POTENCIALIDADES	76
4.2.1	Umidade, massa específica e absorção.....	76

4.2.2	Composição química.....	78
4.2.3	Determinação do teor de enxofre e análise elementar.....	82
4.2.4	Análise Granulométrica	84
4.2.5	Análise Térmica	87
4.2.6	Análise Mineralógica	93
4.3	QUANTIDADE E VIABILIDADE	99
4.4	APLICAÇÕES.....	106
4.4.1	Uso em argamassa cimentícia	110
4.4.2	Uso como fertilizantes e Tecnosolo	111
4.4.3	Síntese de Zeólitas.....	112
4.4.4	Obtenção de geopolímeros	113
4.4.5	Uso em asfaltos.....	114
5	CONCLUSÃO.....	116
	REFERÊNCIAS.....	118

APRESENTAÇÃO DA TESE

DIAGRAMA CONCEITUAL

Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região sul de Santa Catarina

Por quê?

Santa Catarina possui 10% das reservas de carvão nacional. O minério catarinense contém altos teores de cinzas e níveis variados de enxofre. O beneficiamento do minério bruto gera 65% de rejeito. Estudos são necessários para identificar potencialidades no material descartado.

Quem fez isso?

A maioria das pesquisas trabalha com os resíduos já depositados ou misturados. A quantidade abundante de rejeitos mostra que seu potencial de valorização ainda requer estudos. O que torna esta pesquisa única é a caracterização dos rejeitos gerados em cada etapa do beneficiamento do carvão de 6 (seis) mineradoras da região.

Hipóteses

- É possível identificar e correlacionar os materiais descartados nas diferentes etapas de beneficiamento do carvão das seis mineradoras estudadas?
- É possível valorizar potenciais frações contidas nos rejeitos para aplicação em novos processos e produtos?

Métodos

- Definição das empresas foco de estudo;
- Análise de geolocalização e do processo/tecnologia de beneficiamento;
- Coleta e caracterização dos materiais descartados e avaliação por meio da sistemática de valorização de resíduos CPQVA;

Respostas

O caráter argiloso do material descartado é dado pela geologia da camada de carvão extraída; O caráter piritoso é dado pelo processamento; A coleta dos rejeitos de forma seletiva possibilitou estudos de valorização que tiraram proveito de características de frações residuais contidas nos rejeitos.

TRABALHOS REALIZADOS DURANTE O PERÍODO DE DOUTORAMENTO

Durante o período de doutoramento alguns trabalhos foram submetidos e outros apresentados. O Quadro 1-1 mostra artigos submetidos e trabalhos apresentados em congressos relacionados ao tema desenvolvido nesta tese.

Quadro 1-1 – Trabalhos relacionados à tese em revisão/submetidos/publicados em periódicos e anais de congressos.

Título dos artigos	Periódico	Autores
<i>Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physicochemical features</i>	Resources Policy	J. Acordi; L. Simão; M. N. S. Faraco; C.H. Borgert; E. Olivo; O.R.K. Montedo F. Raupp-Pereira
<i>Addition of barium carbonate to eliminate soluble sulfates in new cement formulations based on coal mining waste</i>	Em execução para submissão na Materials Letter	J. Acordi; M.C.K. Vieira; L. Simão; M. N. S. Faraco; J.J. Zocche; F. Raupp-Pereira
<i>An overview of coal mining in Brazil: Characterization and new perspectives of waste valorization</i>	Em execução para submissão na Resources, Conservation & Recycling	M. N. S. Faraco; J. Acordi; L. Simão; E. Olivo; O.R.K. Montedo; F. Raupp-Pereira
Título dos resumos	Congresso	Autores
Estudo da separação granulométrica de rejeitos de carvão sul catarinense	65° - 66° CBC Congresso Brasileiro de Cerâmica	J. Acordi; M.N. Sartor; M.K. Vieira; E.F. Olivo; M. F. Ebs; F. Raupp-Pereira
Potencial de aplicabilidade de frações residuais do carvão mineral como matéria prima para novos produtos: uma revisão	65° - 66° CBC Congresso Brasileiro de Cerâmica	M.F. Ebs; E.F. Olivo; J. Acordi; M.N. Sartor; L. Simão; M. Gryczak; J.J. Zocche; F. Raupp-Pereira
Seleção de resíduos da indústria carbonífera para utilização em fertilizantes organominerais	65° - 66° CBC Congresso Brasileiro de Cerâmica	E.F. Olivo; M.F. Ebs; J. Acordi; M.N. Sartor; L. Simão; M. Gryczak; J.J. Zocche; F. Raupp-Pereira
Caracterização de resíduos da concentração de carvão energético para uso em argamassas cimentícias	VI CBCM Congresso Brasileiro de Carvão Mineral	J. Acordi; M.N. Sartor; T.F. Watanabe; D.W. Dimer; O. R. K. Montedo; F. Raupp-Pereira

1 INTRODUÇÃO

Desde a evolução industrial, o carvão tem sido uma das fontes de energia fóssil mais utilizadas para alimentar a economia de vários países, sendo encontrado em mais de 70 países em diferentes continentes (SHAFIEE; TOPAL, 2009), e com uma produção anual de cerca de 8 bilhões de toneladas (COAL, 2022). Desde então, os governos perceberam que o uso do carvão era a chave para a industrialização e, conseqüentemente, as minas de carvão foram amplamente desenvolvidas (TAHA *et al.*, 2017).

De acordo com o conteúdo carbonífero, esse combustível fóssil é classificado em: turfa, que constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%; linhito, que apresenta teor de carbono que varia de 60% a 75%; hulha que subdivide-se em carvão sub-betuminoso e betuminoso. O carvão sub-betuminoso é o mais utilizado como combustível e o betuminoso, como fonte de transformação em coque, por conter entre 75% e 85% de carbono. O antracito, o mais puro dos carvões, apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90% de material carbonoso. No Brasil as reservas de carvão são do tipo linhito e sub-betuminoso (ANEL, 2008).

O carvão mineral é uma importante fonte para a produção de energia e atualmente representa 27% das fontes de energia em todo o mundo (DMITRIENKO; STRIZHAK, 2017). De toda a energia elétrica gerada no mundo, 45% vem de usinas térmicas que utilizam como combustível recursos energéticos tradicionais (carvão, turfa, óleo combustível, etc.) (CHEN; XU, 2010).

No mundo, as reservas de carvão possuem grande disponibilidade e ultrapassam 1 (um) trilhão de toneladas de reservas totais conhecidas, quantidade suficiente para suprir o consumo nos níveis atuais por 190 anos (BRITISH PETROLEUM, 2021; KERR, 2009). O Brasil ocupa a 15ª posição no ranking mundial (BRITISH PETROLEUM, 2021; CGEE, 2012). Quanto a produção ocupa o 26º lugar, com um volume anual de aproximadamente 5 milhões de toneladas (SIECESC, 2020).

No Brasil o carvão mineral possui duas aplicações principais: como combustível para geração de energia elétrica (carvão nacional), incluindo uso energético industrial, e na siderurgia para produção de coque, ferro-gusa e aço (AMARAL, 2014).

Mesmo possuindo uma das maiores reservas do mundo o Brasil não se enquadra entre os maiores produtores, visto que o carvão nacional não possui propriedades adequadas para o

uso siderúrgico, pois, quando queimado, dá origem a um elevado percentual de cinzas. Por isso, o país precisa importar carvão, principalmente da Austrália, Estados Unidos, Rússia, Canadá, Colômbia, Venezuela, Indonésia e África do Sul (MME, 2010).

Os carvões brasileiros, sul-africanos e indianos são semelhantes e chamados carvões gonduânicos, que diferem dos carvões norte-americanos e europeus devido ao elevado teor de materiais voláteis e cinzas. O teor de materiais voláteis é determinado através do aquecimento em mufla à 950°C, já o teor de cinzas é obtido por combustão do carvão à 750°C durante 6 horas. (CHAVES, 2008).

O carvão nacional possui as suas reservas concentradas nos estados do Rio Grande do Sul (89,3 %), Santa Catarina (10,4%) e Paraná (0,3%) (ANEL, 2008). Este minério contém elevados teores de cinzas e níveis variados de enxofre e precisa ser beneficiado para atingir os padrões de combustão exigidos pelas termoelétricas (KALKREUTH *et al.*, 2010b). No Estado do Paraná, o teor médio de enxofre é de 10% e a matéria inorgânica de aproximadamente 36%. Já o carvão catarinense apresenta um teor médio de enxofre de 3% e 40% de matéria inorgânica (material rejeitado no beneficiamento do carvão energético), e o carvão rio-grandense apresenta um teor médio de enxofre de 0,5% e um teor de matéria inorgânica de 52% (LEON, 1985).

A indústria de mineração é criticada mundialmente por gerar grande quantidade de resíduos sólidos, gerando normalmente grandes impactos ambientais. Segundo De La Villa *et al.* (DE LA VILLA *et al.*, 2017) e Peters *et al.* (PETERS *et al.*, 2017) devido aos impactos gerados existe uma tendência para o desenvolvimento econômico onde este esteja desacoplado do uso exaustivo de recursos minerais, consumo de energia e emissões de carbono. No Brasil, com o crescimento do setor industrial, tornam-se cada vez maiores as quantidades destes materiais rejeitados e, conseqüentemente, as preocupações inerentes ao seu descarte ou à sua não utilização. Desta forma, ressalta-se a importância da busca por soluções eficazes para a diminuição dos impactos ambientais associados.

Contudo, atualmente, a busca de uma atividade sustentável deve identificar os recursos minerais e potencializar recursos econômicos logo no início da exploração. Soluções técnicas devem ser desenvolvidas para lidar com alguns dos problemas desta atividade industrial, tais como: drenagem ácida de mina (DAM), valorização das frações residuais (geradas por aplicações de operações unitárias específicas de segregação do ROM), segurança ambiental e trabalhista e processo de reabilitação da área minerada (MINALLIANCE, 2012).

Em 2015, a ONU aprovou a Agenda 2030, formada por um conjunto de objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) para o período 2015-2030. Vários temas que abrangem as dimensões ambiental, social, econômica e institucional compreendem 17 ODS, 169 metas e 232 indicadores (KRONEMBERGER, 2019). Ainda de acordo com a ONU, para melhor atender os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), a mineração de carvão deve contribuir com a realização de ações baseadas em iniciativas voltadas para a economia circular.

Recentemente o presidente Jair Bolsonaro sancionou a Lei nº 14.299 que prorroga o funcionamento de térmicas a carvão até 2040, ratificando a necessidade de continuação de pesquisas para valorizar os resíduos do setor e torná-lo mais sustentável ambientalmente, socialmente e economicamente. A Lei nº 14.299 institui subvenção econômica às concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica de pequeno porte e cria o Programa de Transição Energética Justa (TEJ) para as regiões destas empresas (BRASIL, 2022).

Segundo o SIECESC (SIECESC, 2020) cerca de 550 milhões de toneladas de ROM foram processadas no Brasil desde 1925, com uma massa estimada de estoque de resíduos de ~320 milhões de toneladas, o que gera muitos estudos e preocupações ao setor.

No caso específico de Santa Catarina, aproximadamente 65% do carvão ROM (Run-of-Mine) é descartado como rejeito, sem valor comercial, após o beneficiamento do mineral. Este elevado percentual de rejeito é decorrente da pequena espessura das camadas de carvão e sua intercalação com rochas sedimentares (folhelhos, siltitos e arenitos), nódulos de pirita (dissulfeto de ferro – FeS_2) e cinzas, bem como, mecanização de lavra (WEILER; FILHO; SCHNEIDER, 2014).

Tais rejeitos são normalmente misturados e tratados como um único material sem abordar e correlacionar as suas características específicas e consequente potencialidade de aplicação em novos processos e produtos. Esta mudança de paradigma em relação aos rejeitos gerados, torna-se uma das hipóteses de pesquisa da presente tese.

Sendo assim, este estudo tem como abordagem a coleta das frações geradas nas diferentes etapas e tecnologias de beneficiamento aplicadas pelas indústrias de extração de carvão do Sul de Santa Catarina, fornecedoras de combustível fóssil não renovável para o Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda, situado no município de Capivari de Baixo, SC. Após coleta e caracterização, as potencialidades, quantidade/viabilidade e possíveis aplicações serão

estudadas e correlacionadas de modo a compreender as semelhanças e diferenças de cada fração residual gerada na região.

Conforme Acordi (2022), esta metodologia de estudo se destaca das demais pois, objetiva a recuperação do resíduo direto do beneficiamento, antes da deposição destes em módulos de rejeitos, não gerando impactos ambientais (AMARAL, 2014) e (CGEE, 2012).

A maioria dos estudos existentes está relacionado a uma tecnologia de beneficiamento específica ou em uma determinada mina de carvão ou ainda em rejeitos coletados de aterros industriais/depósitos. Raros são os estudos analisando um grande campo de mineração de carvão (sul de Santa Catarina) para redução e valorização dos resíduos sólidos gerados. Reutilizar os resíduos de carvão após o beneficiamento e evitar a geração contínua é um grande desafio, que deve ser projetado sistematicamente com base em uma perspectiva holística para o avanço do desenvolvimento sustentável e da economia circular.

Os avanços tecnológicos e sociais têm reflexo direto no aumento da demanda de energia. O Plano Nacional de Energia 2030 (MME, 2010) sustenta a visão de que a expansão da geração termelétrica a carvão faz parte da estratégia da expansão da matriz energética brasileira. Com isso, o volume de rejeitos gerados no beneficiamento do carvão aumentará de forma significativa no futuro (CGEE, 2012).

As reservas mundiais de carvão em 2020 ficaram em 1.074 bilhões de toneladas e estão fortemente concentradas em alguns países: EUA (23%), Rússia (15%), Austrália (14%) e China (13%) (DMITRIENKO; STRIZHAK, 2017).

No Brasil, a produção de carvão em 2021 foi de aproximadamente 6 milhões de toneladas e especificamente em Santa Catarina esse número foi de 2,4 milhões de toneladas (SIECESC, 2022).

Sabe-se, que na China a produção média de resíduos do carvão varia de 10 a 30% dependendo das características do ROM extraído, isso representa 315 milhões de toneladas/ano mas, deste montante tem-se uma recuperação de 42% (BIAN *et al.*, 2009).

Na Polônia, a cada ano é gerado 40 milhões de toneladas de rejeitos de carvão (KORBAN, 2012) e 86% da produção de eletricidade deste país é baseada em carvão (KIJO-KLECZKOWSKA *et al.*, 2022). Em Marrocos existem depósitos estimados com 25 milhões de toneladas de rejeitos de carvão (TAHA *et al.*, 2017).

Conforme Modarres e Rahmanzadeh (MODARRES; RAHMANZADEH, 2014), o Irã produz aproximadamente 310 milhões de toneladas de carvão e com o beneficiamento deste, gera cerca de 40-45% de rejeito.

A extração e beneficiamento do carvão que em Santa Catarina chega a 65% de geração de rejeito, custos adicionais as mineradoras e encargos extras para o meio ambiente são uma grande problemática. Devido às características do carvão, a região sul de Santa Catarina é bastante afetada por essa situação. Desde 1977, de acordo com o relatório do CPRM (Serviço geológico do Brasil) (SUFFART; CAYE; DEEMON, 1977), adotou-se como critério que quando a camada de carvão for inferior a um terço da espessura da camada de minerais não carbonosos, esse leito de carvão é considerado não minerável.

No passado se extraía o carvão sem se preocupar com o descarte e controle dos rejeitos gerados, as elevadas quantidades de materiais rejeitados, presentes até hoje, comprovam que o seu grande potencial de valorização ainda requer muita pesquisa (KINUTHIA; SNELSON; GAILIUS, 2009).

Passou a tramitar no senado federal brasileiro, no ano de 2019, o projeto de lei nº 1496 (BRASIL, 2019) que altera a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010a), e onde a partir do quinto ano após a publicação da lei, as empresas são obrigadas a destinar parte dos resíduos de mineração para a fabricação de materiais de construção.

No início de 2022, a presidência da república do Brasil sancionou a lei nº 14.299 (BRASIL, 2022) que propõe uma transição energética justa para a região carbonífera de Santa Catarina. A lei prevê a criação de um plano de transição energética justa (TEJ) alinhando as metas de neutralidade da emissão de carbono a impactos socioeconômicos e à valorização de recursos minerais e energéticos. O TEJ define também o funcionamento da termelétrica a carvão Jorge Lacerda até o ano de 2040, a partir da criação de um conselho para planejamento de ações de minimização dos impactos ambientais, econômicos e sociais na região sul catarinense.

O programa tem como objetivo preparar Santa Catarina ao provável encerramento, até 2040, da atividade da geração termelétrica a carvão mineral. Um conselho composto por representantes do governo, trabalhadores e empresas definirá o Plano de Transição energética Justa (TEJ).

O grupo deverá buscar recursos para o desenvolvimento de atividades que compensem o fechamento das minas de carvão e do reposicionamento de atividades econômicas. Também

poderá considerar o desenvolvimento tecnológico visando o uso do carvão mineral da região para outras finalidades ou ainda dar continuidade à geração termelétrica a carvão, mas com emissões de carbono iguais a zero a partir de 2050.

Muitos são os desafios para atribuir sustentabilidade ao carvão mineral, analisando pela ótica de biocapacidade que está relacionada com a capacidade produtiva de recursos renováveis de uma determinada área de terra e a acomodação dos resíduos gerados, medida em hectares globais (gha), existiriam duas principais rotas:

- Valorização dos rejeitos do carvão mineral, através da utilização desses materiais rejeitados como matéria prima para o desenvolvimento de produtos com valor agregado, a fim de reduzir a quantidade de rejeito depositado em aterros e assim gerar valor à indústria carbonífera.

- Redução da demanda pelo carvão mineral, como este não é um recurso renovável, a sua substituição gradual por recursos renováveis, para as diversas aplicações, energética, metalúrgica, cimenteira e agrícola, seria necessária para manter um sistema sustentável (BORGERT, 2022).

A gestão de rejeitos engloba, por exemplo, formas de redução, reutilização e disposição ambientalmente corretas, minimizando o passivo ambiental que a destinação irregular pode vir a causar (FRANKS *et al.*, 2011; MCLELLAN *et al.*, 2009; REDDICK; VON BLOTTNITZ; KOTHUIS, 2008; ZHU; CHERNI, 2009)

A preocupação para enfrentar esses desafios apresentados pela mineração de carvão em Santa Catarina é grande, pois exploram minérios com alto percentual de resíduos, sendo maior que o produto de interesse (carvão). As características produtivas, acabam por estabelecer uma significativa importância para a valorização dos resíduos com potencial de reutilização em outros processos e que atualmente são destinados a aterros industriais (como rejeito). Esta destinação em aterros acarreta para as empresas um monitoramento ambiental diário e gastos para transporte, deposição e controle.

Do ponto de vista energético, a reutilização destas matérias-primas é significativa, já que, para sua utilização, geralmente, se emprega uma quantidade de energia inferior comparado a extração de novos materiais, sem contar com os ganhos ambientais envolvidos nestes processos (RAUPP PEREIRA, 2006).

Pode-se notar também que a eficiência dos processos de concentração de carvão atualmente faz com que os rejeitos gerados contenham em média 1% de carvão, o que descarta

a possibilidade de futuramente voltar a explorar esta pequena fração residual carbonosa remanescente no rejeito.

Potenciais características fundamentais para a valorização destes resíduos, incluem as frações piritosas (OLIVEIRA *et al.*, 2016) e argilosas (ACORDI, 2022) que podem ser obtidas com a separação destes materiais no próprio processo de beneficiamento do carvão. Estes processos de separação podem proporcionar um significativo avanço técnico-econômico e ambiental.

Amaral (AMARAL, 2014) e Weiler, Amaral e Schneider (WEILER; FILHO; SCHNEIDER, 2014) estudaram a fração argilosa do resíduo de beneficiamento de carvão de uma mina de Santa Catarina e verificaram a presença majoritária de quartzo (SiO_2 , 50,3%), seguido pela alumina (Al_2O_3 , 22,7%). Os valores de ferro (Fe), enxofre (S) e perda ao fogo foram reduzidos substancialmente quando comparados ao resíduo bruto.

Ainda segundo Amaral (AMARAL, 2014) e Weiler, Amaral e Schneider (WEILER; FILHO; SCHNEIDER, 2014), de acordo com a norma NBR 10004 (2004a) a classificação do rejeito bruto é classe II-A (não inerte), apresentando quantidades acima do permitido para ferro e alumínio. No entanto, ao separar este rejeito em diferentes frações pode-se notar que a fração argilosa foi classificada conforme a NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a) como resíduo classe II-B (inerte). Estes fatores ratificam a importância da separação de frações residuais e, por isso, assim denominadas nesta Tese, para buscar diferentes destinos ambientalmente favoráveis.

Em termos de aplicação dos resíduos de mineração de carvão, na Europa e em todo o mundo, estão sendo desenvolvidos conceitos inovadores para gerenciamento e reciclagem. Uma solução potencial é utilizar o resíduo de carvão como matéria prima para produtos da construção sustentável e, como tal, contribuir para promover a economia circular nas áreas de mineração de carvão (VO *et al.*, 2022). Outros estudos sugerem a aplicação desse resíduo na produção de agregados para construção civil (KINUTHIA; SNELSON; GAILIUS, 2009; NIXON; GARTNER, 1980; SANTOS *et al.*, 2013), material para uso em substratos (CAÑIBANO, 1995), estruturas de pavimentos (MODARRES; RAHMANZADEH, 2014), fabricação de cerâmica (LEMESHEV *et al.*, 2004) e solos.

Spence, Wells e Dudley (SPENCE; WELLS; DUDLEY, 1993) sugerem como aplicações promissoras para construção civil os seguintes materiais: cimento com fibras, blocos

de solo estabilizado (tijolos, pavimentos), pozolanas, cimento (produzido em pequenas fábricas), além do estudo de resíduos como materiais de construção.

Apesar das pesquisas publicadas, ainda não há definição quanto a melhor forma de aproveitamento do resíduo resultante do processo de concentração do carvão, devido a diferenças quanto à composição, diferentes idades dos depósitos de rejeitos e formas de beneficiamento.

Contudo, comprova-se a importância deste estudo de caráter inovador, onde foi analisado o fluxo seletivo dos materiais residuais obtidos após o beneficiamento, de todas as seis mineradoras do sul de Santa Catarina que fornecem carvão para termoeletricità da região. Outra inovação deste estudo está na percepção de que os métodos de concentração do carvão vêm sofrendo avanços tecnológicos e, por este motivo, cada empresa possui seu método de beneficiamento com sequências diferentes para a concentração do carvão. Consequentemente ocorre a geração de resíduos em cada etapa, que atualmente são unificadas em um único rejeito e encaminhadas aos aterros controlados.

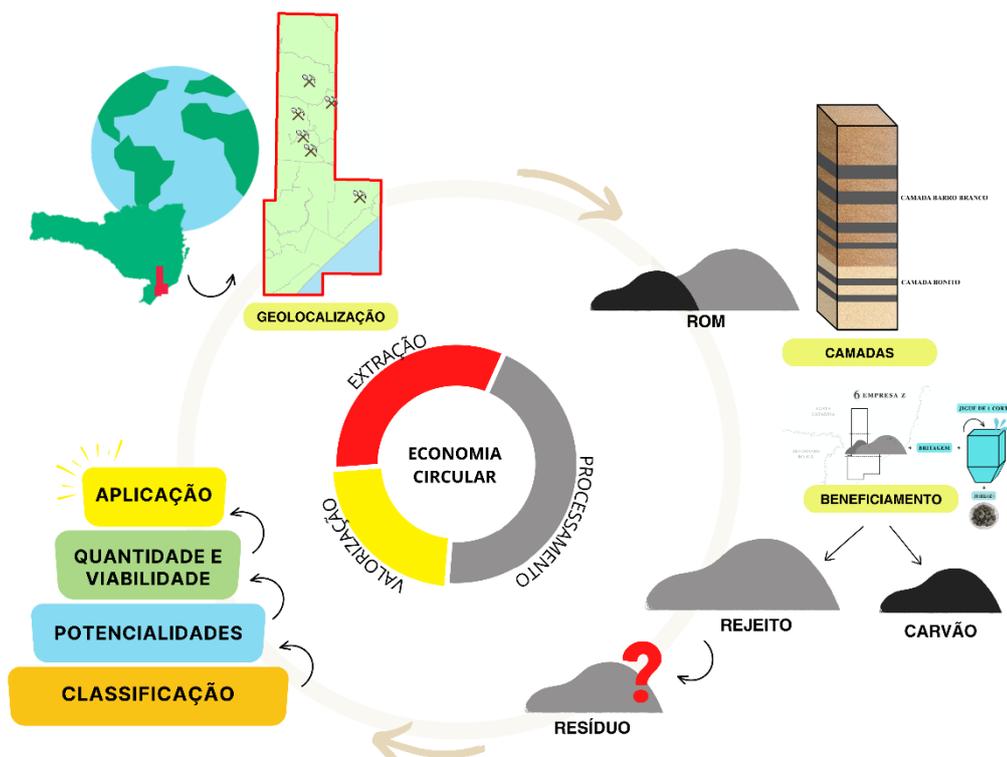
A inovação neste estudo também está na forma da amostragem dos materiais a serem estudados, atualizando a utilização da nomenclatura aplicada a décadas de estudos dos rejeitos de carvão, sendo elas R1 (piritosa), R2 (argilosa) e R3 (carbonosa), e trata os resíduos gerados como recursos minerais secundários provenientes de determinada geolocalização e etapa de beneficiamento, para assim buscar possíveis aplicações como um subproduto.

Para organizar o estudo das frações residuais coletadas foi aplicado a sistemática CPQvA (RAUPP PEREIRA, 2006) que **C**aracteriza, **P**otencializa, **Q**uantifica/**V**iabiliza e sugere **A**plicações dos resíduos para alcançar a sustentabilidade econômica e ambiental, além de trazer aspectos e objetivos da economia circular.

A proposta deste estudo é representada resumidamente na Figura 1-1. Buscou-se, por meio de reflexões e revisão da literatura, estabelecer fluxos seletivos para uso das frações residuais contidas nos diferentes materiais gerados na segregação do carvão energético da mineração da Bacia Carbonífera Catarinense.

O estudo inicia com a amostragem de frações residuais geradas em mineradoras do Sul Catarinense identificando suas caracterizações geológicas, beneficiamentos de origem e aplicação com auxílio da sistemática CPQvA, buscando identificar novas formas de valorização de resíduos com potencial de aplicação no desenvolvimento sustentável da economia regional do extremo sul catarinense.

Figura 1-1 – Diagrama esquemático do desenvolvimento deste estudo.



Fonte: Autor (2022).

Na indústria de mineração a aplicação do conceito de Economia Circular (EC) possui grande potencial pois busca minimizar os desperdícios de recursos e poluição ambiental propondo também resolver os desafios de escassez de recursos minerais e assim, aumentar a taxa de valorização de resíduos e o desenvolvimento sustentável (ZHAO *et al.*, 2012).

O desenvolvimento de atividades de mineração sustentáveis, deve estudar a identificação dos recursos minerais possíveis e potencializar recursos econômicos, desde o início da exploração mineral, focando-se em soluções eficazes no tratamento e na não geração de DAM (drenagem ácida de mina), valorização das frações residuais resultantes da concentração do carvão, segurança nos trabalhos e processo de reabilitação da área minerada (MINALLIANCE, 2012).

Uma economia "mais circular" tem-se mostrado um conceito operacional para mudança de paradigma e resolução de problemas ambientais e sociais, decorrentes do modelo tradicional de economia linear de "extração, produção e eliminação" (ECO.NOMIA, 2022). Neste sentido, a valorização de resíduos por meio da sistemática CPQvA busca reutilizar e dar um destino mais nobre a estes materiais, que dependendo das suas características atribuídas pela condição

natural geológica e pela tecnologia de beneficiamento aplicada, podem substituir matérias-primas tradicionais comumente comercializadas para diversos processos produtivos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Valorizar de forma sistêmica, utilizando a ferramenta CPQvA, frações residuais de rejeitos de carvão mineral a partir da identificação de características físico-químicas potenciais, que são atribuídas por diferentes aspectos de geolocalização e de operações de beneficiamento aplicadas na obtenção de carvão energético da região sul catarinense.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o enquadramento legal do rejeito bruto, a fim de sustentar a proposta de valorização em desenvolvimento e a sua eventual aplicabilidade, com base nas diferentes fontes alternativas minerais caracterizados pelas frações residuais;
- Identificar através da caracterização destes resíduos as potencialidades que os diferenciam tanto em aspectos de geolocalização da região sul de Santa Catarina, quanto em aspectos físico-químicos (também atribuídos pelo tipo de beneficiamento utilizado);
- Quantificar as diferentes frações identificadas pelas possíveis potencialidades de valorização, quanto à geolocalização e ao processo de beneficiamento utilizado;
- Verificar a viabilidade de possíveis propostas de valorização destes resíduos considerando fatores de sustentabilidade econômica e ambiental para a região sul de Santa Catarina, que permitam o desenvolvimento de aplicações efetivas de reutilização destes materiais.

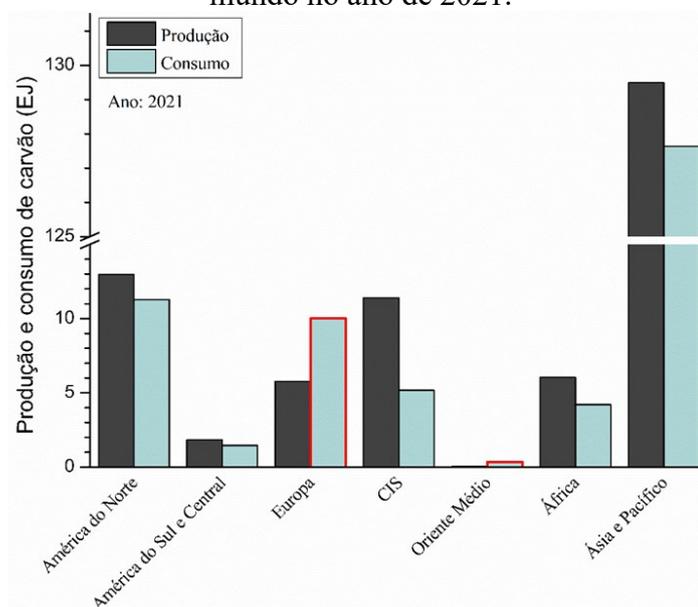
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo é composto por uma revisão da literatura com informações necessárias para o desenvolvimento da tese. Está dividido em tópicos relacionados à formação geológica do carvão, diferentes processos de beneficiamento utilizados, rejeito gerado com a concentração do carvão e valorização de resíduos do beneficiamento de carvão.

2.1 FORMAÇÃO GEOLÓGICA

A extração e o consumo de carvão (Figura 2-1) segue plena atividade em boa parte no mundo. A Europa e o Oriente Médio consomem maior quantidade de carvão do que produzem, por isso precisam importar esse recurso natural. A Comunidade dos Estados Independentes (CIS) formada por 11 repúblicas que antes integravam a extinta União Soviética junto com a Ásia e Pacífico, África e Américas do Norte e do Sul produzem mais do que consomem.

Figura 2-1 – Gráfico comparativo entre a produção e o consumo de carvão em regiões do mundo no ano de 2021.



Fonte: Construído pelo autor (2022), baseado em (BRITISH PETROLEUM, 2021).

O carvão mineral (Figura 2-2) é uma mistura de hidrocarbonetos formada pela decomposição de matéria orgânica, durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão (ANEL, 2008). É depositado em bacias na ausência de ar atmosférico,

concentra carbono nos restos vegetais devido a perda de hidrogênio e nitrogênio das matrizes orgânicas, no processo de carbonificação (VO *et al.*, 2022).

O carvão é constituído por matéria orgânica (Carbono, C; Hidrogênio, H; Oxigênio, O; Nitrogênio, N e Enxofre, S) e matéria mineral (quartzo, sulfetos, carbonatos, argilominerais etc.). Pode-se definir também, que a composição do carvão comercializado é formada por umidade, carbono fixo, material volátil e cinzas.

Uma curiosidade bem interessante é que o carvão fóssil é impropriamente chamado de carvão mineral. Pela sua natureza é uma rocha orgânica e não apresenta predominância de estrutura cristalina, portanto não podendo tecnicamente ser classificada como um mineral (WILLIAMS *et al.*, 2000). A designação imprópria de “carvão mineral” tem, origem meramente comercial, portanto não científica, um contraste com o “carvão vegetal”.

A formação do carvão se dá a partir da matéria orgânica de vegetais, depositadas em pântanos que juntamente aos movimentos tectônicos levaram ao soterramento, em alguns casos a grandes profundidades (RUIZ, 2009).

Segundo Schopf (1956) o carvão é uma rocha combustível composta por mais de 50% de peso e mais de 70% do volume de material carbonoso. Segundo a ISO 11760 (“ISO 11760: Classification of coals”, 2018) o carvão é uma rocha sedimentar carbonosa derivada de restos vegetais, com matéria mineral associada, correspondendo a um teor de cinzas inferior ou igual a 50% de sua massa (base seca) (WILLIAMS *et al.*, 2000). A cinza é uma parte não inflamável do carvão constituída e derivada de uma substância mineral (KIJO-KLECZKOWSKA *et al.*, 2022). O carvão é composto basicamente por três frações, inertes que dão origem a cinzas, fração piritosa e fração carbonosa na qual as minerações buscam através do beneficiamento sua concentração. A aplicação mais adequada para o carvão é determinada pelo grau de carbonificação e o seu percentual de cinzas (WILLIAMS *et al.*, 2000).

Devido origem de sua matéria orgânica o carvão é classificado em dois tipos diferenciáveis: carvões sapropélicos e carvões húmicos. Carvões sapropélicos são caracterizados por enriquecimento em esporos e algas. Já os carvões húmicos são formados a partir de resíduos de plantas terrestres, que se acumularam na forma de turfeiras em áreas alagadas (pântanos) este, correspondem a cerca de 90% de todos os depósitos conhecidos (SIMÃO, 2016).

Devido ao ambiente deposicional dos carvões, estes podem ser diferenciados em carvão límnico e parálico. O carvão límnico é aquele considerado como tendo sido depositado

em regiões sem nenhuma conexão hidrológica com o mar (ambiente continental, água doce, nível d'água controlado localmente). Já o carvão parálico é um dos principais locais de formação de turfeiras (formação de 90% dos carvões no mundo), pode ocorrer do acúmulo significativo de turfa em vários ambientes distintos relacionados a contextos marinhos costeiros (ambiente litorâneo continental, lagunar ou deltaico e caracterizado por ocasionais incursões marinhas; nível do mar) (GUSTAVO SIMÃO, 2012) (DIESSSEL, 1970). Os ambientes parálicos são controlados por dois mecanismos, as transgressões e as regressões marinhas, os quais irão provocar variações significativas na composição dos depósitos de carvão (GUERRA-SOMMER; SCHMIDT; KLEPZIG, 2019). A Figura 2-2 esquematiza a classificação do carvão citada e apresenta sua composição de forma geral.

Figura 2-2 – Classificação do carvão quanto a origem da matéria orgânica, ambiente deposicional relacionando com a composição de carvão retirada do ROM de uma mineração do sul de Santa Catarina.



Fonte: Autor (2022).

Conforme Taylor et al. (1998) é raro encontrar carvões que possuem carácter inteiramente parálico ou límnico sendo, pelo contrário, frequente a ocorrência de tipos transicionais. Diessel (1992) sugeriu que a caracterização dos depósitos de carvão deve ser realizada tendo como suporte a relação existente entre os sistemas de deposição e os diferentes tipos de ecossistemas palustres, o que lhe permitiu agrupá-los em três sistemas: costeiros, deltaicos e fluviais.

Os sistemas costeiros apresentarem-se em climas tropicais e subtropicais e são protegidos por barras de areia e praias. Nestes sistemas é possível ocorrer o desenvolvimento de pântanos de vegetação herbácea, cujas características dependem da influência das marés (GUERRA-SOMMER; SCHMIDT; KLEPZIG, 2019).

Os sistemas deltaicos são divididos em sistemas de deposição distintos, as planícies inferior e superior do delta. Estes sistemas possuem estreita relação com o mar, mas, podem igualmente desenvolver-se em zonas interiores, as chamadas bacias intramontanhosas associadas a ambientes lacustres. Nas planícies inferiores dos deltas, os ecossistemas palustres são formados por pântanos de floresta, onde o fornecimento de matéria mineral é bastante elevado, e os depósitos de carvão associados a estes sistemas são representados por camadas finas e lateralmente descontínuas. Já na transição para a planície deltaica superior é possível o aparecimento de pântanos elevados de floresta, onde em matéria mineral é bastante reduzido.

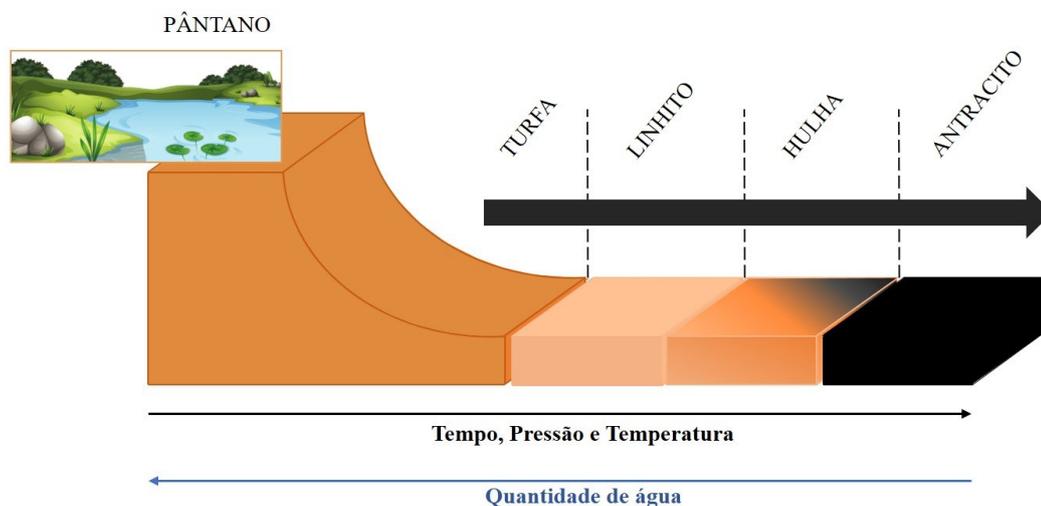
As planícies superiores do delta estão associados a superfícies abandonadas, o que permite que as plantas se desenvolvam de forma significativa, tornando o ambiente favorável para a formação de depósitos de turfa espessos e contínuos (SOUSA; LEMOS DE RODRIGUES; DINIS, 2012).

Já os sistemas fluviais desenvolvem-se, normalmente, em depressões intramontanhosas estreitas e delimitadas por falhas, em rios e nas planícies aluviais de rios, por este motivo resultam na formação de camadas de carvão com uma geometria e qualidade bastante variadas (GUERRA-SOMMER; SCHMIDT; KLEPZIG, 2019).

O processo de transformação da matéria orgânica de origem vegetal em turfa e, posteriormente, em carvão é, comumente, designado por carbonificação (Figura 2-3), e tem diferentes estágios denominados de; turfa, linhito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso, antracito e grafite. Nesta transformação ocorrem mudanças químicas, bioquímicas e físicas como por exemplo: diminuição no conteúdo de água e porosidade, aumento da densidade, condensação de moléculas orgânicas, polimerização; aromatização, perda de grupos funcionais como (-OH, e -CH₃) (SIMÃO, 2016).

O primeiro estágio da formação do carvão é a turfa, inicialmente esta, passa por um processo de alteração bioquímica, realizado por ação de bactérias, sendo parcialmente decomposta. Com o progressivo aumento do soterramento, ocorre um aumento progressivo na temperatura e na pressão, provocando alterações geoquímicas no sistema. Estes processos são conhecidos como carbonificação (SUÁREZ-RUIZ; CRELLING, 2008).

Figura 2-3 – Estágios da matéria orgânica durante o processo de carbonificação.



Fonte: Autor (2022).

Hagemann e Hollerbach (1980) fizeram uma estimativa de que uma camada de material vegetal de 2 m de espessura, acumulada em ambiente de pântano, fica reduzida a 30cm no estágio de turfa e a 10 cm no estágio de carvão.

Segundo Lemos et al. (2012) com a evolução da carbonificação a turfa se transforma, primeiro, em “carvão de grau inferior”, depois em “carvão de grau médio” e, posteriormente, em “carvão de grau superior”, podendo, ainda, evoluir para formas já fora do âmbito do carvão, tais como a semigrafite e a grafite.

À medida do grau de carbonificação a que o carvão foi submetido durante a sua evolução na série natural de linhitos a antracitos é chamada de "rank". Para determinar o “rank” de um carvão é necessário determinar alguns parâmetros como: umidade de equilíbrio, poder calorífico, matéria volátil, carbono fixo total, teor de hidrogênio e reflectância da vitrinita (SIMÃO, 2016).

De forma resumida, pode-se caracterizar a diagênese pela ação combinada de processos biológicos, químicos e físicos que levam ao desenvolvimento de uma grande variedade de produtos degradados da matéria orgânica vegetal, que são conhecidos como os macerais no carvão (GUERRA-SOMMER; SCHMIDT; KLEPZIG, 2019).

Analisando microscopicamente o carvão (densidade relativa entre 1,2 e 1,7g/cm³), verifica-se que este é formado, por uma mistura complexa de componentes orgânicos chamados

macerais (plantas carbonificadas) e de matéria inorgânica. Os macerais tem origens distintas e por isso, podem ser divididos em três grupos: vitrinita, liptinita e inertinita (ICCP, 1971).

A vitrinita resulta da carbonificação de substâncias húmicas, os quais são originados principalmente de lignina de paredes celulares (madeira, raiz e casca). A liptinita é resultante da carbonificação de porções das plantas que são relativamente ricas em hidrogênio (cutículas e esporos) já a inertinita é derivada das mesmas substâncias que formam a vitrinita, porém submetidas a um processo de oxidação (incêndios florestais) antes da deposição em ambiente pantanoso, esse maceral é relativamente inerte a queima (ICCP, 1971).

Taulbee (1989) em seus estudos, por meio de uma série de processos de separação, quantificou a densidade dos diferentes macerais, sendo que os mesmos apresentam valores de densidade em torno de; liptinita 1,0- 1,25g/cm³, vitrinita 1,28-1,33g/cm³ e inertinita 1,34-1,45g/cm³.

A matéria inorgânica que forma o carvão é o seu conteúdo mineral, não combustível. Ele é constituído de minerais detríticos ou autigênicos introduzidos no carvão nas primeiras fases de carbonificação. Os minerais detríticos são transportados ao pântano pelo ar ou pela água (quartzo, carbonato, ferro, minerais de argila e minerais acessórios, relacionados às rochas da área de origem). Minerais autigênicos são introduzidos na turfeira durante ou após a deposição da matéria orgânica, ou durante a carbonificação (calcita, ankerita, siderita, sulfetos de ferro, em especial pirita e minerais de sílica na forma de quartzo). O enxofre ocorre em quase todos os carvões, presente em menor quantidade na fração orgânica do carvão e em maiores ocorrências na fração inorgânica, principalmente na forma do mineral pirita. A pirita pode estar presente como um mineral detrítico primário ou como autigênico (pirita secundária), resultante da redução do enxofre em águas marinhas (SIMÃO, 2016).

2.1.1 Bacia carbonífera catarinense

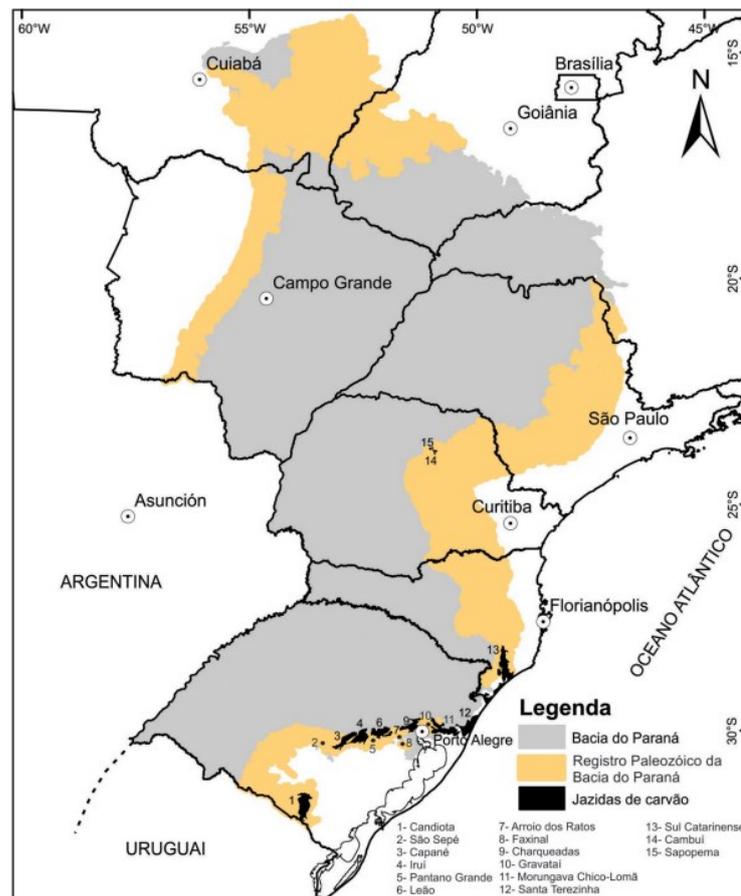
No Brasil, ocorrências de maior importância de carvão gonduânicos estão registradas nas bacias sedimentares do Paraná e Parnaíba, jazidas que têm sido exploradas por cerca de 160 anos. A Bacia do Paraná é a única bacia que tem uma sucessão portadora de carvão importante do ponto de vista econômico (CAGLIAR et al., 2019).

Na Bacia do Paraná as ocorrências de carvão situam-se na sua faixa leste de afloramento e concentram-se na Formação Rio Bonito (Permiano Inferior) do Grupo Guatá. A

formação Rio Bonito é subdividida nos membros Triunfo (inferior), Paraguaçu (médio) e Siderópolis (superior), que são associados a ambientes flúvio-deltaicos, marinho transgressivo e marinho litorâneo, respectivamente (SCHNEIDER *et al.*, 1974). Em conjunto, estes membros refletem as condições ambientais de suas deposições (SUFFART; CAYE; DEEMON, 1977).

Tais ocorrências encontram-se nos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Figura 2-4). As maiores reservas conhecidas situam-se no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, na jazida sul catarinense (CAGLIAR *et al.*, 2019).

Figura 2-4 –Delimitação das jazidas carboníferas localizadas na borda da bacia do Paraná considerando as áreas de ocorrências de camadas de carvão com espessuras superiores a 50 cm. Adaptado de Aboarrage e Lopes (1987).



Fonte: Cagliari et al. (2019).

A Bacia Carbonífera de Santa Catarina situa-se no flanco sudeste do estado de Santa Catarina, com direção norte-sul de aproximadamente 100 km de comprimento e 20 Km de largura média, desde o sul de Araranguá até Lauro Müller (GUERRA-SOMMER; SCHMIDT;

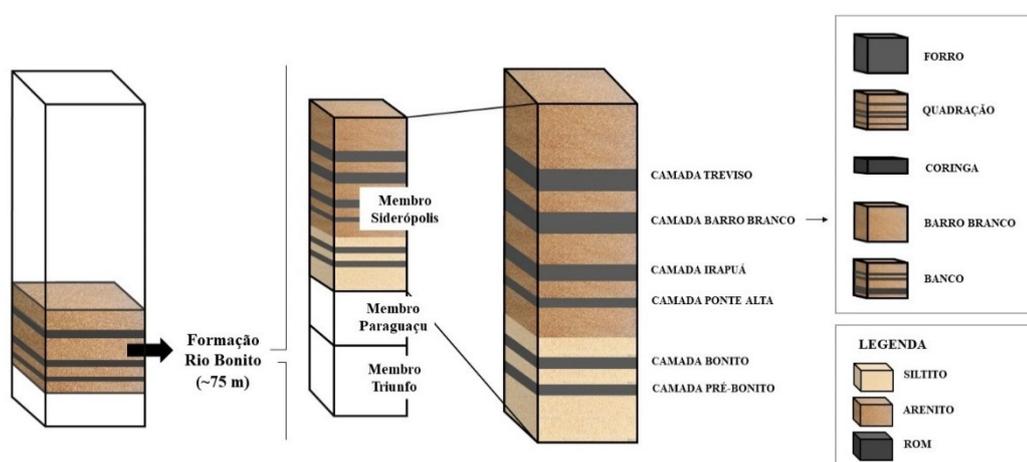
a espessos pacotes de arenitos quartzosos com siltitos e folhelhos carbonosos intercalados (KALKREUTH *et al.*, 2010a).

2.1.2 Camadas de Carvão da Bacia Carbonífera Catarinense

Parte das camadas de carvão de Santa Catarina são coqueificáveis e já produziram fração metalúrgica para a siderurgia nacional. Hoje as carboníferas catarinenses só produzem carvão para fins energéticos (CE – 4.500 kcal/kg) e pouco carvão industrial (GOMES; CRUZ; BORGES, 2003).

As camadas Barro Branco e Bonito são as mais expressivas em Santa Catarina. De acordo com os critérios de Holz et al. (2010) as camadas localizadas nos estados de Santa Catarina e Paraná ocorrem no membro Siderópolis da Formação Rio Bonito (Figura 2-6) e estão incluídas na sequência de terceira ordem de idade Artinskiana.

Figura 2-6 – Camadas estratigráficas da formação Rio Bonito.



Fonte: Autor (2022).

A camada Barro Branco é considerada a mais importante da Jazida Sul Catarinense e atinge uma superfície de 2000 km². Esta camada apresenta, em média, cerca de 2 m de espessura, sendo que nas bordas da bacia carbonífera a espessura é bastante reduzida (REDIVO, 2002). Pode ser dividida, no geral, em três diferentes subcamadas, que possuem variações de cor, textura, estrutura, composição mineralógica entre outros. As subcamadas são chamadas de

Banco na base, Quadração na porção média e o Forro no topo (Figura 2-6) (KALKREUTH *et al.*, 2010b).

A camada de Barro Branco ocorre ao longo de uma faixa norte-sul em uma distância de cerca de 55 km. A espessura da camada Barro Branco varia de 1,70 a 2,27 m, com valor médio de 1,80 m. No entanto, a espessura líquida do carvão limpo é reduzida para 0,47 a 1,48 m, devido a quantidades substanciais de carvão impuro e minerais não carbonosos. Também são comuns camadas de pirita de vários centímetros de espessura (KALKREUTH *et al.*, 2010b).

Essa camada tem sido objeto de muitos estudos, dada sua ampla distribuição e características do carvão. Todavia, a única contribuição à caracterização da biomassa que deu origem à turfeira foi efetuada por Bortoluzzi *et al.* (1978) a partir de amostras procedentes da mina de céu aberto de Siderópolis.

Os dados palinológicos permitem inferir uma associação vegetal de tipo floresta pantanosa como formadora da biomassa da turfa da camada Barro Branco. A biomassa era composta principalmente por plantas gimnospérmicas (grupo de plantas com sementes que não apresentam frutos que a envolve) (GUERRA-SOMMER; SCHMIDT; KLEPZIG, 2019).

A Camada Bonito encontra-se na base do Membro Siderópolis é oriunda de mangue, formados após uma regressão marinha (KALKREUTH *et al.*, 2010b). É constituída de dois leitos de carvão chamados de Bonito Superior com espessura de 1,1 metros e Bonito Inferior separados pelo arenito Bonito. O arenito Bonito possui granulometria fina, cor cinza esbranquiçado, geralmente formado por mica e variedades de cálcio sendo frequentemente piritoso. Na parte inferior da camada Bonito, ocorrem numerosos leitos de carvão separados por intercalações de folhelhos predominantemente carbonosos (SUFFART; CAYE; DEEMON, 1977).

Na camada Bonito, a turfeira se instalou sobre uma planície marinha regressiva sendo recobertos por sedimentos de energia moderada a baixa, neste carvão se espera encontrar alguma influência salobra (SUFFART; CAYE; DEEMON, 1977).

Os dois leitos da camada Bonito (inferior e superior), podem ser encontrados juntos próximo ao Oceano Atlântico e atinge 3,4 metros de espessura na mina subterrânea de Bonito, próxima à cidade de Lauro Müller, SC (REDIVO, 2002).

O carvão catarinense, apresenta alto teor de cinza e significativas concentrações de alguns elementos traço que são considerados como possíveis causadores de impacto ao meio ambiente, como As, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Ni, Pb, Tl, V e Zn (MILTIZAREK, 2019).

2.2 BENEFICIAMENTO DO CARVÃO

Para obtenção do carvão é necessário o processamento do minério, também chamado de beneficiamento, sendo este um conjunto de operações realizadas com a matéria-prima bruta (ROM, do inglês: “Run-of-Mine”) com o objetivo de obter carvão energético (VALADÃO; ARAUJO, 2012).

Este conjunto de operações pode incluir: fragmentação, separação por tamanho, concentração, separação sólido/líquido (recuperação da água utilizada e disposição do rejeito) e operações auxiliares tais como transporte, estocagem, amostragem etc. (VALADÃO; ARAUJO, 2012).

Os principais objetivos da fragmentação são: separar os materiais de valor daqueles sem valor (resíduo ou rejeito) e, atingir as especificações exigidas para a aplicação desejada. A separação ocorre por métodos diretos ou indiretos. A concentração por métodos indiretos considera propriedade diferenciadora intrínseca dos materiais/minerais tais como densidade (meio denso, jigagem, espirais, mesas, ciclone), condutividade, susceptibilidade magnética ou propriedades superficiais (flotação, aglomeração oleosa) (VALADÃO; ARAUJO, 2012).

No início da atividade de extração do carvão, na época de Brasil-Império, o trabalho era realizado de forma braçal, com a escolha manual do minério sendo realizada majoritariamente por mulheres. O grau de mecanização foi aumentando gradativamente ao longo do século XX, assim como os volumes de carvão e rejeito produzidos (BELLOLI; QUADROS; GUIDI, 2002).

A extração do carvão ROM é realizado nas minas de subsolo ou na superfície (céu aberto), quando extraído do subsolo, este é transportado por correias para o estoque na superfície. O carvão ROM do sul de Santa Catarina, possui propriedades inviáveis para a sua utilização direta, por isso deve passar pelo beneficiamento para concentrar o carvão (CARNIATO, 2005). As diferenças no processo de concentração é justificada de acordo com a camada explorada o que vai interferir também no material descartado (rejeito) (REDIVO, 2002).

Os equipamentos existentes para separação dos grossos de carvão (entre 50,8 e 2,0 mm) se restringem aos jigues e em meio denso. Para a concentração dos finos (2,0 a 0,5 mm) e ultrafinos (abaixo de 0,5 mm) de carvão são utilizados ciclones, cilindros a meio denso, mesas concentradoras, espirais, jigues, flotação entre outros (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Nas atividades de extração mineral são gerados estéreis e rejeitos. Os estéreis compõem os materiais de cobertura, camadas intermediárias ou circundantes que são extraídas para se ter acesso ao ponto de interesse para mineração. Os rejeitos são a somatória dos sólidos das frações inorgânicas minerais derivadas dos diferentes processos de beneficiamento aplicados (AMARAL, 2014).

No final dos anos 70, o setor carbonífero nacional, adotou modelos de lavra e beneficiamento de tradicionais produtores de carvão da época, EUA, Alemanha, Polônia e Inglaterra, sem uma adaptação a realidade do carvão nacional, que é caracterizado por um elevado percentual de rochas, intercaladas às lâminas de carvão (SCHNEIDER, 2006).

Na região sul de Santa Catarina existem três tipos de carvão: Barro branco, Bonito e o Irapuá, cada um possui propriedades químicas distintas, como a umidade, a cinza, o enxofre, o poder calorífico e a matéria volátil. As mineradoras deste estudo, suprem as necessidades do Complexo Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, com capacidade de geração de 857 MW. Em virtude das limitações das usinas termoeletricas e das normas ambientais, o carvão utilizado deve satisfazer vários critérios químicos e de composição (CARNIATO, 2005).

Desta forma, após a extração, o ROM segue para etapa de britagem com o objetivo de promover a separação entre a matéria carbonosa e a matéria mineral. Se a britagem não for eficiente influenciará diretamente no teor de enxofre (pirita) e na sua recuperação, pois na hora do beneficiamento os nódulos de enxofre não conseguem se desprender dos grãos de carvão, arrastando-os para os rejeitos (LEONARD J. W.; MITCHELL D. R., 1989).

2.2.1 Jigue

O carvão britado, é transportado para o jigue (Figura 2-7) e neste é injetado água através de bombas. A jigagem é um processo de separação hidráulica que consiste na repetida expansão e contração vertical de um leito de partículas pelo movimento pulsante de água. O resultado é a separação das partículas em camadas ou estratos de densidades crescentes desde o topo até a base (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Figura 2-7 – Jigue (a esquerda) seguindo a direita pelo elevador de canecos por onde sai o rejeito na concentração de carvão de uma mineradora do sul de Santa Catarina.



Fonte: Autor (2020).

Nas empresas analisadas neste estudo, encontramos a utilização de jigues de 1 corte (saída de carvão), 2 cortes e até 3 cortes. O jigue é um equipamento hidráulico com motores e cilindros, que separa por gravidade o carvão lavado do rejeito, sua função é movimentar a água para cima e para baixo junto com o carvão, proporcionando a separação do carvão do rejeito por gravidade. Como na passagem pelo jigue ocorre normalmente perdas de carvão energético, em situações específicas utilizam-se ciclones de meio denso (sistema helicoidal que atua também por separação por gravidade) os quais possuem a forma de cilindro na parte superior e de cone na inferior. Nesta operação o carvão e a água são introduzidos tangencialmente na seção cilíndrica junto com ar (LEONARD J. W.; MITCHELL D. R., 1989).

Nos processos em que é utilizada a água, esta arrasta uma certa quantidade de carvão fino para uma bacia de decantação. Este carvão é reaproveitado utilizando o chamado circuito de finos, resultando um carvão fino com umidade elevada (TSAI, 1982). Devido às características do carvão da região, as mineradoras são obrigadas além de beneficiar o carvão bruto, importar carvões já beneficiados de outras jazidas e misturar os diferentes tipos, de maneira a obter um composto aceitável para atender as especificações da usina termoeletrica e das leis ambientais. Após a mistura do carvão, este é transportado até a usina pela ferrovia.

Com a exploração do carvão da camada Bonito, que se encontra finamente dispersa de material mineral, o beneficiamento por meio de jigues não apresenta concentração do carvão eficiente. Com isso, as empresas da região passaram a utilizar o processo de meio denso para um maior rendimento na concentração do carvão desta camada e após verificaram também

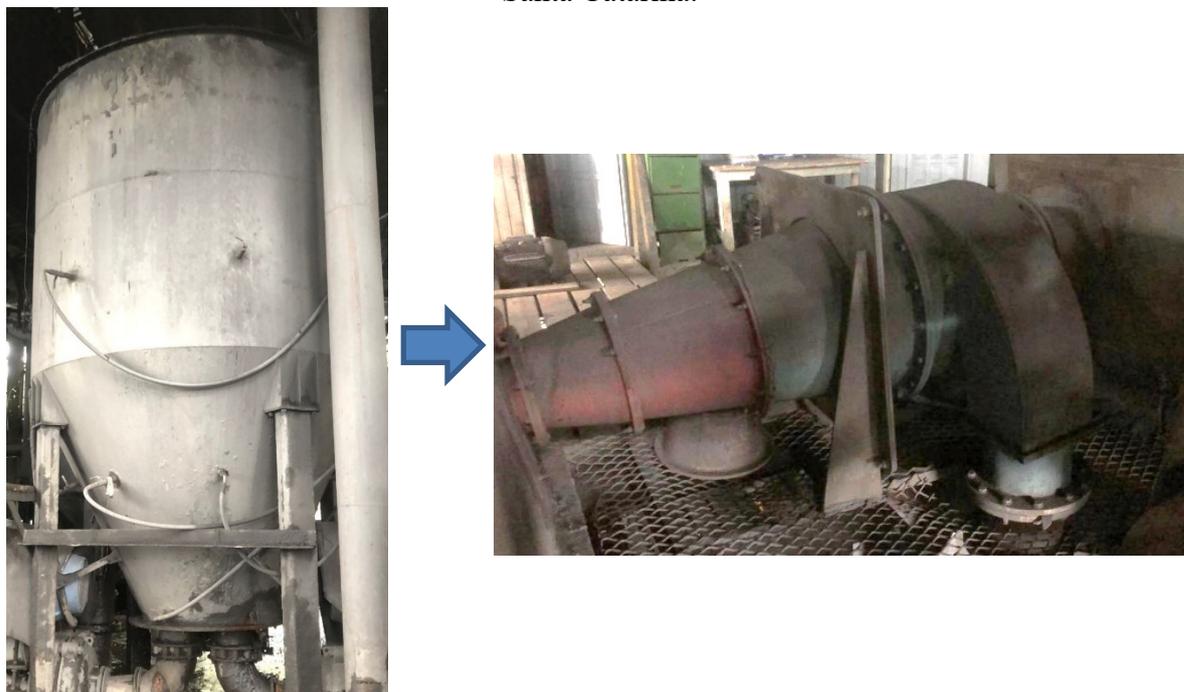
eficiência deste para a concentração de carvão da camada Barro Branco (GUSTAVO SIMÃO, 2012).

2.2.2 Meio Denso

O beneficiamento de carvão por meio denso consiste na separação dos minerais de diferentes densidades contidos em um dado minério, através de um meio com densidade intermediária à dos minerais, de forma que aqueles com densidade inferior (carvão) ao meio flutuem e os com densidade superior afundem. Desde 1858, estudos e utilizações de diferentes materiais foram sendo patenteadas e utilizados para promover a separação dos minerais tais como: hidrocarbonetos clorados, leito de areia hidraulicamente dilatado, cloreto de cálcio, suspensões de argilas, gesso e pirita, suspensão de barita e argilas, galena, sais inorgânicos como cloreto de cálcio e cloreto de zinco, líquidos orgânicos como bromofórmio e tetrabromoetano, mas os melhores e mais usados industrialmente são: magnetita, ferro-silício e galena (AQUINO *et al.*, 2007).

As três mineradoras da região que utilizam o processo de meio denso usam magnetita para promover a concentração do carvão (Figura 2-8). Considerando que a magnetita tem uma densidade de 5,0 a 5,2 g/cm³, permitindo a obtenção de uma polpa com densidade máxima de 2,5 g/cm³, sua utilização como meio denso fica restrita apenas à separação de minerais de baixa densidade, tais como: grafita, gipsita e, principalmente, carvão (AQUINO *et al.*, 2007). Na Figura 2-8 a direita, pode-se observar o tanque de meio denso onde é adicionada a solução de água e magnetita juntamente com o ROM e à esquerda o ciclone de meio denso onde ocorre a separação rejeito x carvão, através da força centrífuga que ocorre no ciclone.

Figura 2-8 – Meio Denso (a esquerda) e ciclone de meio denso de uma mineradora do sul de Santa Catarina.



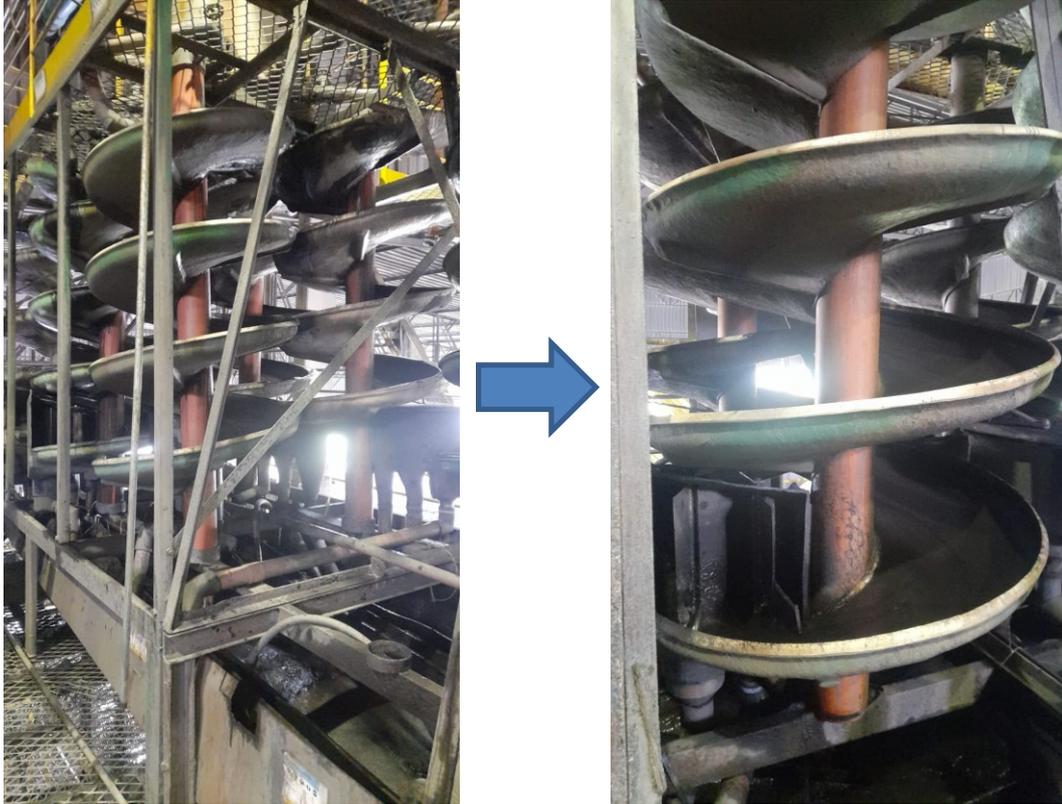
Fonte: Autor (2020).

2.2.3 Espirais e Flotação

Para concentração de carvão no circuito de finos utilizam-se processos de espirais (ciclones) e flotação.

O funcionamento das espirais (Figura 2-9) está baseado na diferença de densidade existente entre o carvão e o rejeito, utilizando-se de um meio fluido (água) para efetivar a separação/concentração dos produtos. Na parte externa da espiral, se concentra o material menos denso, ou seja, mais leve (carvão), já na parte interna da espiral se concentra o material mais denso (rejeito) (RONCONI; SCHNEIDER, 2014).

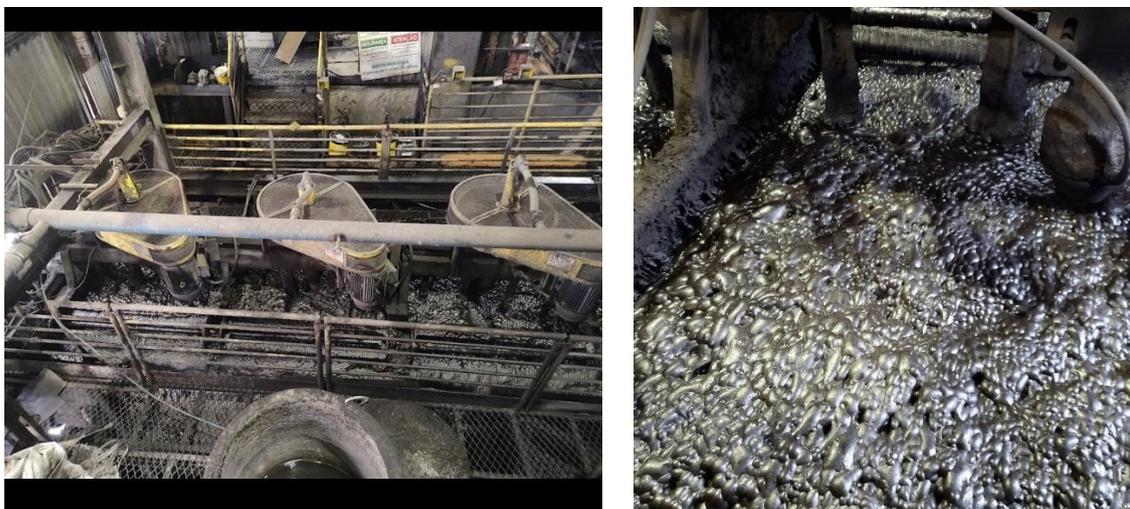
Figura 2-9 – Processo por espirais de uma mineradora do sul de Santa Catarina mostrando no detalhe (a direita) uma das espirais da operação de beneficiamento.



Fonte: Autor (2020).

A flotação de carvão foi definida por Gupta et al. (2009) como sendo o processo no qual partículas finas de carvão são separadas seletivamente da matéria mineral associada, numa polpa aquosa, onde as partículas de carvão fino se aderem a bolhas de ar. Este processo pode ser observado na Figura 2-10 onde está sendo apresentado fotografias do processo de uma mineradora do sul de Santa Catarina.

Figura 2-10 – Processo de Flotação de uma mineradora do sul de Santa Catarina com o detalhe (a direita) da espuma resultante.



Fonte: Autor (2020).

De forma resumida, a operação de flotação (figura 2-10) consiste em fazer passar um fluxo de bolhas de ar através de uma polpa de minério e água, mantida em suspensão sob agitação, com isso tem-se a separação de minerais hidrofóbicos dos hidrofílicos, obtendo-se dois produtos, o flotado (carvão) e o deprimido (rejeito). As partículas hidrofóbicas se aderem seletivamente às bolhas de ar, flutuam e são removidas da suspensão. As partículas hidrofílicas ficam na polpa.

Em teoria o carvão como sendo hidrofóbico, não precisaria de aditivos (espumante, coletor ou modificadores) para realizar a flotação, mas na prática usam-se reagentes reforçadores da hidrofobicidade os quais se espalham sobre a superfície da partícula de carvão e aumentam o grau de hidrofobicidade, favorecendo a flotação. São usados para este fim, geralmente, hidrocarbonetos como o diesel e o querosene (RUIZ, 2009).

2.2.4 Mesa de Ar

Dentre as seis mineradoras deste estudo uma delas possui lavra a céu aberto e isso só é possível quando a camada de carvão está aflorando ou próxima a superfície. A lavra consiste na remoção da camada estéril (superior), deixando a camada de carvão ao tempo, onde então,

extrai-se o carvão. Nesta empresa a concentração do carvão acontece por meio de mesas de ar sem adição de água.

Este processo de beneficiamento é composto por uma plataforma vibratória que tem algumas aberturas pelas quais passa o ar produzido pelo ventilador. Basicamente a aplicação de um fluxo de ar contínuo ascendente, movimenta por vibração as partículas e as separa com base na gravidade específica dos constituintes minerais. O fluxo de ar exerce uma força de pressão ascendente sobre as matérias-primas, o que provoca a elevação de partículas com baixo teor de cinzas (carvão). No entanto, as partículas mais densas (rejeito) assentam sobre a mesa e são expostas a uma maior inércia sendo empurradas ao longo da largura da mesa. Assim, a concentração do carvão se dá quando a camada superior, mais leve, continua a se mover sobre a camada mais lenta de partículas pesadas, sendo removida na abertura superior à dos pesados (MAHMOODABADI, 2015).

2.3 REJEITOS DE CARVÃO

Segundo Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM, 2001) e considerações conceituais entre rejeito (material em fim de vida) e resíduo (material passível de valorização) declaradas pela PNRS. Esses materiais denominados de rejeitos, podem ser classificados em três tipos de resíduos: piritosos – nódulos e pirita, xistoso - matéria carbonosa e argiloso – folhelhos, siltitos e arenitos, além dos finos de carvão. As características de cada uma das frações residuais do resíduo de carvão dependerão do processo de beneficiamento adotado por cada mineradora.

Após o beneficiamento do carvão, em média 60 – 70% do material é descartado e disposto em módulos de rejeitos. Esses módulos são caracterizados por conter rochas sedimentares (folhelhos, siltitos e arenitos) associadas ao carvão mineral e nódulos de pirita (dissulfetos de ferro – FeS_2) (KALKREUTH *et al.*, 2010b) ocupando grandes áreas e gerando elevadas vazões de drenagem ácida de minas (DAM).

A DAM é um efluente formado pela oxidação de sulfetos metálicos, como a pirita, quando em contato com a água e o oxigênio. Devido as suas características, acarreta na mobilização e solubilização de metais pesados, sendo a principal responsável pela

contaminação dos aquíferos e do solo (E. ANGIOLETTO, E. CARVALHO, F. BIANZINI *et al.*, 2016).

Segundo Angioletto (E. ANGIOLETTO, E. CARVALHO, F. BIANZINI *et al.*, 2016) após gerada, a DAM é um efluente de difícil controle e pode ocorrer por dezenas e até mesmo centenas de anos. Assim, a maneira mais fácil de mitigar a DAM é a sua não geração.

Conforme o Plano Nacional de Mineração – 2030, o grande desafio para o setor carbonífero nacional é a produção e uso limpo do carvão mineral por meio de:

- Desenvolvimento de tecnologias limpas na cadeia produtiva;
- Desenvolvimento tecnológico e inovação aplicado à cadeia produtiva carbonífera, em especial para geração termelétrica, siderúrgica e carboquímica;
- Desenvolvimento de tecnologias para recuperação do passivo ambiental da bacia carbonífera de Santa Catarina.

Vários são os riscos decorrentes dos rejeitos de carvão mineral:

- Erosão e instabilidade geotécnica do declive da pilha de resíduos (YU *et al.*, 2011);
- Combustão espontânea de ganga de carvão e acidentes de explosão (CIESIELCZUK; KRUSZEWSKI; MAJKA, 2015) (MISRA; SINGH, 1994);
- Liberação de metais e geração de ácidos (DAM), que podem afetar o solo e a qualidade das águas subterrâneas e superficiais (E. ANGIOLETTO, E. CARVALHO, F. BIANZINI *et al.*, 2016) (ZHAO *et al.*, 2008);
- Geração de poeira que causam a poluição do ar e ainda podem acusar alterações nos ecossistemas e perturbações nos habitats (N. ADIBEE, M. OSANLOO, 2013) (ZHAO *et al.*, 2008);
- Impacto visível na estética da paisagem (BIAN *et al.*, 2009);
- Ocupam uma grande área física e modificam o relevo e a paisagem (AMARAL FILHO *et al.*, 2013);
- Diminuição da biodiversidade nas regiões com depósito de rejeito e a interação entre as pessoas e o meio ambiente torna-se insustentável (SUN *et al.*, 2010).

O grande desafio para o setor carbonífero mundial é a produção e uso limpo do carvão, baseado em um circuito fechado (reutilização/circularidade) em vez de circuito aberto ou linear (TAHA *et al.*, 2017). O circuito aberto ou fluxo unidirecional é caracterizado pelo processo “recursos naturais → produtos → rejeitos”. Em contrapartida, o circuito fechado caracteriza-se por “recursos → produtos → recursos renováveis (materiais/resíduos passíveis de serem

valorizados)”, caracterizado essencialmente por alto nível de utilização do recurso e baixo índice de poluição (HAIBIN; ZHENLING, 2010).

Por isso, além dos trabalhos realizados com objetivo de tratar ou minimizar a geração de DAM, ganham destaque os estudos que buscam a máxima utilização energética do carvão contido nos rejeitos (resíduo xistoso) e o aproveitamento da fração rica em pirita (resíduos piritosos) para o desenvolvimento de outros produtos (AMARAL FILHO *et al.*, 2013).

Vários são os estudos relacionados a utilização destes materiais, mas pouco se faz na prática pois, a viabilidade e potencialidades destes resíduos ainda não despertam interesse para o setor industrial. Assim, com a realização deste trabalho, o gerenciamento de recursos minerais secundários ganha uma nova abordagem a partir da separação seletiva de frações residuais formadas na própria planta de beneficiamento do carvão energético da região sul catarinense que aplicam processos do tipo jig, meio denso, espiral e flotação.

O gerenciamento e aproveitamento destas frações remanescentes do ROM (fração argilosa e fração piritosa), após a retirada da fração energética, são largamente debatidos mundialmente. As características mineralógicas dos resíduos de carvão dependem principalmente da localização das jazidas (local da extração) (SKARŻYŃSKA, 1997). Sendo que a geração de resíduos pode ser reduzida em 10% pela simples reutilização como aterros subterrâneos de área mineradas podendo oferecer apoio terrestre, não apenas reduzindo o risco de subsidência de superfície, mas também proporcionando uma abordagem amigável ao ambiente descartando os resíduos perigosos das minas (JACKSON *et al.*, 2017; ZHENGFU *et al.*, 2010).

2.4 VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE CARVÃO

A partir do banco de dados Scopus, investigou-se possíveis aplicações sugeridas na literatura para os rejeitos de mineração de carvão no Brasil, bem como extraiu-se características importantes dos materiais para discussão dos tópicos abordados nesta tese. Os principais artigos foram selecionados a partir das seguintes palavras-chave: “coal mining waste,” “coal mining tailing,” “coal mining residue” e “coal gangue”. Os artigos mais recentes dos últimos cinco anos que estudaram resíduos da região de estudo foram avaliados e descritos. Devido ao baixo número de trabalhos correlatos ao tema de interesse na base Scopus, trabalhos desenvolvidos de outras regiões foram adicionados para ratificar as diferentes possibilidades de aplicação destes materiais.

De maneira geral, as principais aplicações encontradas na literatura utilizando rejeitos da mineração foram para materiais cimentícios, cerâmicos em geral, compósitos, tratamento de efluentes e uso como insumos agrícolas ou de solo.

Na área dos materiais cimentícios, Mejia-Ballesteros et al. (2019) estudaram o efeito de adições minerais, como calcário, cinza de casca de arroz e rejeitos da mineração em formulações cimentícias para melhorar as propriedades de estruturas naturais reforçadas com cimento. Os rejeitos de mineração de carvão foram ativados termicamente em um forno mufla a 600 °C por 2 h. A substituição de 25% do cimento por minerais alterou a microporosidade dos produtos. A incorporação de resíduo melhorou o desempenho em termos de microporosidade, sendo que o diâmetro médio dos poros do produto formado foi 31,3% menor que o do cimento de referência.

De Oliveira et al. (2021) avaliou o uso de quatro argilas caulínicas e um argilito (resíduos de mineração de carvão) como materiais cimentícios suplementares (SCMs). Os resultados mostraram que o resíduo de mineração de carvão obteve resultados semelhantes aos das argilas mais puras quando calcinado a 800 °C (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

O uso de resíduos da mineração de carvão também tem sido relatado em cimentos alcalinamente ativados. Estes cimentos, também chamados de materiais álcali ativados ou geopolímeros, são geralmente compostos de uma mistura de pós de aluminossilicatos, tais como cinzas volantes e escória granulada de alto forno e soluções alcalinas. Frasson et al. (2019) estudou o efeito de diferentes resíduos de mineração de carvão do estado de Santa Catarina nas propriedades mecânicas e no desenvolvimento microestrutural de materiais álcali ativados. Resíduos de mineração de carvão ativados termicamente a 700°C e solução alcalinas de NaOH e silicato de sódio foram utilizadas. Os resultados obtidos apresentaram excelente desempenho mecânico, com resistência à compressão superior a 60 MPa. No entanto, a adição de metacaulim e cimento Portland comum foi necessária para aumentar o desempenho mecânico. Em termos composicionais, o principal gel formado a base de sódio, alumino-silicatos nos produtos hidratados foi o N-A-S-H, com pontos de ligação de Fe (FRASSON; PINTO; ROCHA, 2019).

Malacarne et al. (2021) investigaram a influência de materiais locais de baixo teor como substitutos de clínquer em cimentos. Resíduos de mineração de carvão (35% em peso de caulinita) foram testados e comparados com materiais mais puros, como argila natural (83% de caulinita). Os resultados mostraram que a finura das argilas calcinadas e do calcário influenciou a demanda hídrica das pastas cimentícias de forma mais significativa do que as composições

mineralógicas. O maior teor de caulinita nas argilas naturais resultou em maior atividade pozolânica, fases do tipo carboaluminato e maior resistência à compressão do que as do cimento contendo resíduos de mineração de carvão. Mesmo com o desempenho reduzido do cimento com resíduo em relação às argilas naturais, as amostras atingiram os requisitos de resistência à compressão da norma brasileira NBR 16697 para cimento pozolânico classe 32 com resistência mínima aos 7 dias ($\geq 20,0$ MPa), a 28 dias ($\geq 32,0$ MPa) e 91 dias (≥ 40 MPa) (MALACARNE *et al.*, 2021). Salvi Malacarne *et al.* (2021), também estudaram cimentos com uma avaliação do ciclo de vida usando diferentes materiais argilosos, incluindo resíduos de mineração de carvão. Os resultados não mostraram influência significativa no impacto do transporte de materiais até 500 km, demonstrando viabilidade das alternativas avaliadas, apesar das grandes distâncias de transporte no Brasil.

A resistência à compressão de tijolos produzidos pela substituição de areia natural por resíduos da mineração de carvão foi avaliado por Silva *et al.* (2022), os quais mostraram que a resistência à compressão dos tijolos produzidos variou de 4,99 MPa a 16,27 Mpa, sendo que a maior resistência com a presença de rejeitos foi de 15,79 MPa utilizando 90% de rejeitos e 10% de cal hidratada (DA SILVA *et al.*, 2022).

Mejia-Ballesteros *et al.* (2021) estudaram a durabilidade de compósitos à base de cimento e fibras naturais em relação à adição de resíduos da mineração. As fibras foram submetidas a um tratamento de hornificação composto por quatro ciclos de umedecimento/secagem. A substituição parcial do cimento por resíduos de mineração de carvão e o uso de fibras tratadas termicamente melhoraram as propriedades mecânicas dos compósitos. A composição química e o teste de Frattini demonstraram a formação de materiais pozolânicos a partir dos resíduos de mineração.

GRYCZAK *et al.*, estudaram o uso de resíduos de Polietileno de baixa densidade (LDPE) como composto para mitigar os impactos ambientais dos resíduos de mineração de carvão. O material foi desenvolvido utilizando percentuais de 0-80% em peso de resíduo em substituição ao PEBD. As amostras obtidas foram testadas quanto à formação de drenagem ácida e liberação de contaminantes. Os resultados dos compósitos com 20% em peso de LDPE mostraram um aumento de 50% no valor de pH do lixiviado em comparação com o lixiviado dos resíduos. As concentrações de ferro, alumínio e sulfato, além dos efeitos ecotoxicológicos nos organismos testados foram menores nos lixiviados dos materiais compósitos obtidos. Esta redução pode ser explicada pela natureza hidrofóbica da matriz polimérica e das propriedades físicas do

compósito obtido. Estas propriedades contribuíram para um melhor revestimento das partículas de resíduos de carvão, bloqueando o contato com a água e reduzindo os riscos ambientais (GRYCZAK *et al.*, 2020).

Como visto anteriormente, a extração e beneficiamento de carvão mineral é uma importante atividade econômica da região sul de Santa Catarina. Os impactos ambientais em áreas de mineração estão principalmente relacionados ao descarte dos rejeitos com altas concentrações de pirita. Estes materiais em contato com água e ar sofre oxidação e forma a drenagem ácida de minas (DAM, podendo lixiviar para os recursos hídricos, restringir o uso da água e do solo e causar ameaças à fauna e à flora (ANDREOLA *et al.*, 2022). A DAM é caracterizada por valores de pH baixos ($\text{pH} < 3,0$) e altas concentrações de metais como Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Pb e sulfatos (GEREMIAS *et al.*, 2012). Seu tratamento é geralmente feito através de uma pré-correção de pH, com posterior utilização de resinas iônicas, colunas de filtração, processos de adsorção, coagulação, floculação e flotação. Porém, todos estes são processos caros e que, desta forma, acabam exigindo o desenvolvimento de novas alternativas com melhor custo-benefício para o setor carbonífero.

A utilização de óxidos de metais obtidos por processo de calcinação de rejeitos da mineração de carvão para tratamento de DAM foi estudada por Geremias *et al.* (2010). Os resultados mostraram que a capacidade máxima de adsorção de H_3O^+ foi de 316 mmol kg^{-1} , tendo remoção de 100% de Al (III), 100% de Fe (III) e 89% de Mn (II) (GEREMIAS; FÁVERE; PEDROSA, 2010). Em outro trabalho, Geremias *et al.* (GEREMIAS *et al.*, 2012) avaliou a eficácia do tratamento da DAM com resíduos de carvão calcinados a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1h usando *Allium cepa* L. como bioindicador. O bioindicador foi exposto a amostras de DAM com e sem tratamento, assim como a água mineral como controle negativo (NC). Ao final do período de exposição, a inibição do crescimento radicular foi medida e a concentração efetiva média foi determinada. Os resultados mostraram que o tratamento de DAM com os resíduos calcinados resultou em aumento do pH e na remoção expressiva do Al, Fe, Mn e Zn. O uso de resíduos de mineração de carvão calcinado associados a testes toxicológicos em *Allium cepa* L. pode representar um sistema alternativo para o tratamento e o biomonitoramento de substâncias perigosas já que após o tratamento, nenhuma toxicidade foi detectada (GEREMIAS *et al.*, 2012).

Weiler *et al.* (2020) obteve tecnossolos a partir de resíduos de carvão e compostos orgânicos oriundos de resíduos urbanos em Moçambique, África. O crescimento de plantas e

as características químicas do tecnossolos produzidos foram avaliados. Nas condições experimentais avaliadas, o crescimento da alfafa nos tecnossolos que receberam 2,5% de matéria orgânica foi semelhante às plantas cultivadas no solo agrícola fertilizado utilizado como controle. Ao usar 5% de matéria orgânica o crescimento das plantas foi ainda superior. Os nutrientes no tecido vegetal e a fertilidade do solo foram considerados adequados. Em relação aos problemas relacionados a presença de pirita, houve uma redução tanto na pirita sulfurada, quanto no potencial de geração de ácido. Em relação aos metais presentes no tecido vegetal (brotos), todos os tratamentos apresentaram concentrações abaixo das concentrações máximas toleráveis para alimentação de gado. Estes resultados indicam que os tecnossolos podem melhorar a gestão de resíduos no setor mineral e de saneamento (WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2020).

Alguns estudos relatam que os rejeitos da mineração de carvão podem ser divididos em três frações residuais, sendo elas R1 (rica em pirita), R2 (rica em minerais argilosos) e R3 (rica em carbono). Machado de Oliveira et al. (2019) apresentou uma rota de beneficiamento para a fração rica em pirita (R1) baseada na lixiviação do material em água e mecanismos de decantação e suspensão. Os resultados mostraram que o processo de beneficiamento aumentou o teor de pirita da fração R1 gerando um resíduo sólidos com alto poder calorífico de 2339,00 kcal/kg e outro rico em óxido de ferro. Após a remediação por destilação simples, os efluentes do processo de beneficiamento apresentaram pH e teores de metais pesados compatíveis com a resolução brasileira, além de não inibir o crescimento radicular de *Allium cepa* L (MACHADO DE OLIVEIRA *et al.*, 2019). Isto demonstra que possíveis tratamentos do resíduo gerado podem ser necessárias dependendo da aplicação requerida.

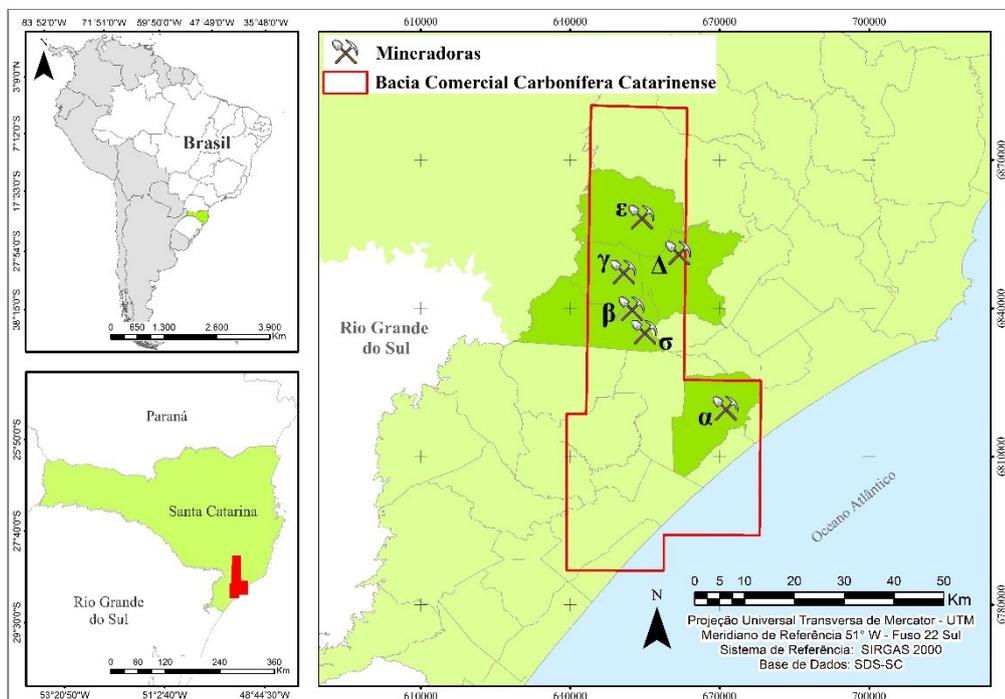
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A definição dos materiais de estudo parte da designação de quais as empresas mineradoras na região que integram o grupo de fornecedores da cota energética do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo – SC.

Foram identificadas seis mineradoras localizadas na região do extremo sul do estado de Santa Catarina, Figura 3-1. Todas estão localizadas entre a formação da Serra Geral e a região litorânea numa área com aproximadamente 2000 Km², bacia carbonífera catarinense.

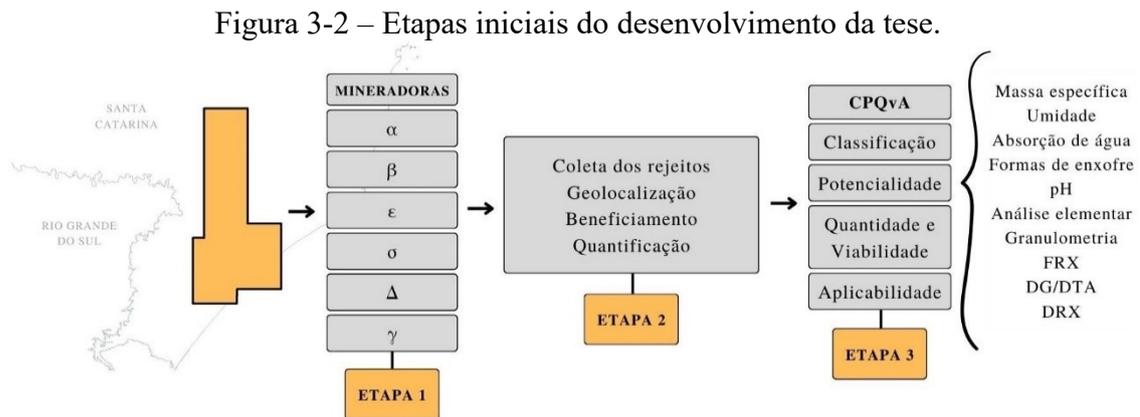
No contexto geológico, a área de estudo onde estão inseridas as minerações analisadas é a borda sul-sudeste da Bacia do Paraná que é formada por uma grande bacia intracratônica disposta na parte central-leste da Plataforma Sul-Americana, que corresponde a unidade geotectônica do sudoeste do Supercontinente Gondwana (KALKREUTH *et al.*, 2010b).

Figura 3-1 – Divisão geográfica da bacia carbonífera catarinense de acordo com a geolocalização e localização das empresas onde foram realizadas as coletas das frações residuais.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 3-2 esquematiza as etapas envolvidas neste estudo, sendo: definição das mineradoras; geolocalização e processo/tecnologia de beneficiamento, quantificação e coleta dos resíduos gerados e análises com aplicação da sistemática e valorização de resíduos “CPQvA”.



Fonte: Autor (2022).

3.1 MATERIAIS

Vinte e quatro (24) frações residuais foram coletadas e codificadas. Os códigos seguem a seguinte ordem: camadas, beneficiamento, empresa e indicação da ordem de descarte/corte (está de forma numérica). Para identificar as camadas foram utilizadas as siglas BB para camada Barro Branco, BO para camada Bonito e RE para antigos depósitos de rejeitos. O beneficiamento está indicado como jigue (Ji), meio denso (Md), mesa de ar (Ma), britador (Br), ciclone (Ci), flotação (Fl) e bacia de decantação (Bd). Na sequência é apresentado a empresa por letras gregas α , β , γ , Δ , ϵ e σ . Essa codificação está apresentada na Tabela 3-1. Para facilitar ainda mais sua identificação, foi atribuída a cada mineradora uma cor específica conforme segue: Empresa α : tons de amarelo; Empresa β : tons de cinza; Empresa γ : tons de vermelho; Empresa Δ : tons de magenta; Empresa ϵ : tons de verde; Empresa σ : azul.

As mineradoras foram analisadas em termos de geolocalização, do processo de extração e beneficiamento do carvão mineral, bem como, dos depósitos de rejeitos com quantidade, características, tratamento e deposição do material.

Conforme observação nas diferentes visitas técnicas realizadas, apesar das mineradoras obterem diversas frações residuais por meio dos processos de beneficiamento, as

mesmas acabam misturando todas elas e realizando o depósito na forma de rejeito em um único aterro industrial.

As amostras foram coletadas representando onze (11) resíduos da camada Barro Branco (BB), que ocorre em toda bacia e caracterizada por grande extensão lateral, seis (6) resíduos da camada Bonito (BO) e sete (7) resíduos de mineradoras que rebeneficiam rejeitos de carvão de depósitos antigos.

Tabela 3-1 – Identificação das 24 frações residuais coletadas a partir de: camada, processo de beneficiamento e empresa mineradora (e cor associada).

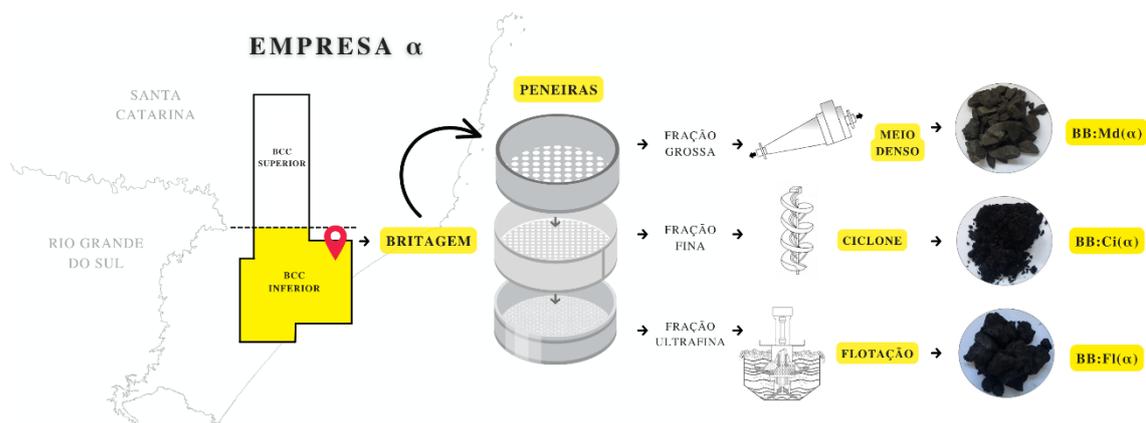
Camada de carvão extraída	Processamento de beneficiamento	Empresa mineradora	Codificação
Barro Branco	Meio-Denso	α ●	BB:Md(α)
Bonito	Meio-Denso	γ ●	BO:Md(γ)
Bonito	Meio-Denso	ε ●	BO:Md(ε)
Bonito	Jigue	γ ●	BO:Ji(γ) - 1
Bonito	Jigue	γ ●	BO:Ji(γ) - 2
Bonito	Jigue	γ ●	BO:Ji(γ) - 3
Rejeito	Jigue	β ●	RE:Ji(β) - 1
Rejeito	Jigue	β ●	RE:Ji(β) - 2
Rejeito	Jigue	β ●	RE:Ji(β) - 3
Rejeito	Jigue	β ●	RE:Ji(β) - 4
Rejeito	Jigue	β ●	RE:Ji(β) - 5
Bonito	Jigue	ε ●	BO:Ji(ε)
Barro Branco	Jigue	ε ●	BB:Ji(ε) - 1
Barro Branco	Jigue	ε ●	BB:Ji(ε) - 2
Rejeito	Jigue	σ ●	RE:Ji(σ)
Rejeito	Jigue	β ●	RE:Bd(β)
Barro Branco	Mesa de Ar	Δ ●	BB:Ma(Δ) - 1
Barro Branco	Mesa de Ar	Δ ●	BB:Ma(Δ) - 2
Barro Branco	Mesa de Ar	Δ ●	BB:Ma(Δ) - 3
Barro Branco	Flotação	α ●	BB:Fl(α)
Barro Branco	Britador	Δ ●	BB:Br(Δ)
Barro Branco	Ciclone	Δ ●	BB:Ci(Δ) - 1
Barro Branco	Ciclone	Δ ●	BB:Bd(Δ)
Barro Branco	Ciclone	α ●	BB:Ci(α)

Fonte: Autor (2022).

Optou-se por coletar os resíduos sólidos como gerados (em frações), com o objetivo de respeitar as diferenças entre as empresas (características relacionadas à geolocalização, entre os processos de beneficiamento (características tecnológicas) e, conseqüentemente, associar estas às características das 24 frações residuais coletadas (ou agrupamentos seletivos destas).

A mineradora α (alfa), está localizada no terço médio da bacia carbonífera catarinense e extrai carvão da camada barro branco (BB). Para concentração do carvão, possui uma planta de beneficiamento (meio-denso, ciclone e flotação) gerando 3 frações residuais identificados como: BB:Md(α), BB:Ci(α) e BB:Fl(α). Na Figura 3-3 podemos observar a representação do beneficiamento e os resíduos obtidos.

Figura 3-3 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora α (amarela) e as frações residuais geradas.



Fonte: Autor (2022).

Após a extração do ROM, o minério passa pelo processo de britagem e separação em peneira. A fração grossa é encaminhada para separação gravimétrica de carvão por meio denso (usando magnetita) o que resulta na primeira fração residual do beneficiamento da empresa α , BB:Md(α).

Já a fração fina é beneficiada por meio do processo de ciclones, do qual resulta a fração residual BB:Ci(α). A fração da britagem classificada pela mineradora como ultrafina é processada por flotação/filtro prensa e gera a fração residual BB:Fl(α).

A mineradora β (beta) trabalha com o rebeneficiamento de antigos depósitos de rejeito de carvão onde, a concentração do carvão é realizada por jigagem. Segundo a empresa β , é

possível concentrar 10% de carvão energético do tipo CE 4500 (poder calorífico 4500 Kcal/Kg). Os 90% restantes voltam a ser rejeito e são encaminhados para aterros controlados.

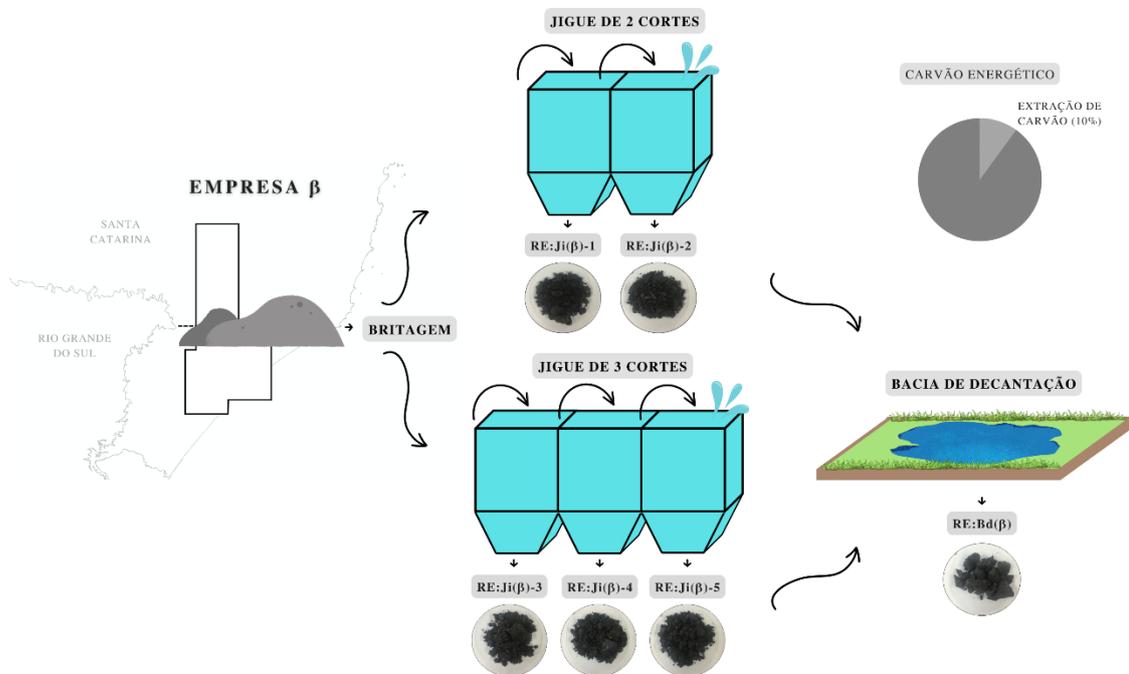
A concentração do carvão é realizada em jigues, gerando 6 frações residuais identificadas por: RE:Bd(β), RE:Ji(β)-1, RE:Ji(β)-2, RE:Ji(β)-3, RE:Ji(β)-4, RE:Ji(β)-5. A Figura 3-4 mostra de forma representativa o processo de beneficiamento praticado pela empresa.

Observa-se que na concentração de antigos depósitos, ocorrem o uso de duas rotas de beneficiamento, uma rota com jigue de dois cortes, onde no primeiro corte é gerada a fração residual RE:Ji(β)-1 e no segundo corte a fração residual RE:Ji(β)-2.

Para a rota com o jigue de três cortes são gerados no 1º, 2º e 3º passe, respectivamente, as frações residuais RE:Ji(β)-3, RE:Bd(β)-4, RE:Ji(β)-5.

A água de lavagem usada no beneficiamento junto com os finos do processo é encaminhada para a bacia de decantação gerando a fração residual RE:Bd(β).

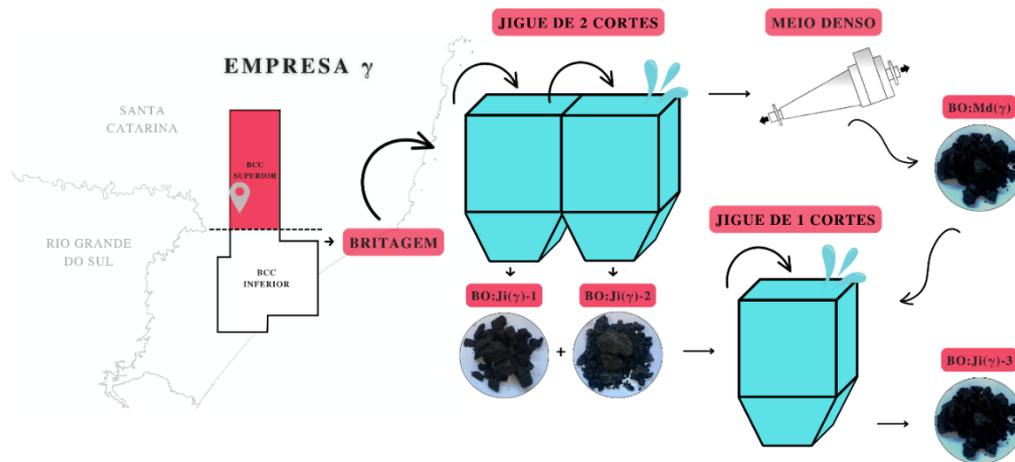
Figura 3-4 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora β (cinza) e as frações residuais geradas.



Fonte: Autor (2022).

Na mineradora γ (gama) foram coletadas frações residuais $BO:Md(\gamma)$, $BO:Ji(\gamma)-1$, $BO:Ji(\gamma)-2$ e $BO:Ji(\gamma)-3$ que podem ser visualizados na Figura 3-5.

Figura 3-5 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora γ (vermelha) e as frações residuais geradas.



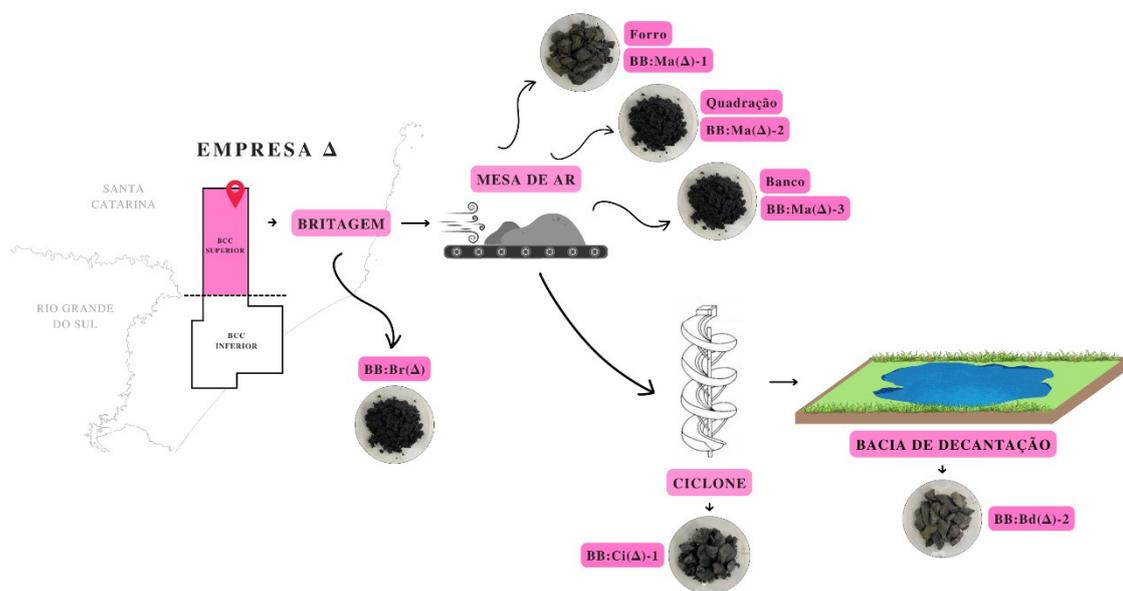
Fonte: Autor (2022).

A mineradora γ possui duas plantas de beneficiamento. No beneficiamento principal são geradas 3 frações residuais, sendo: $BO:Ji(\gamma)-1$, $BO:Ji(\gamma)-2$ e $BO:Md(\gamma)$. As frações residuais $BO:Ji(\gamma)-1$ e $BO:Ji(\gamma)-2$ foram coletados, respectivamente, no primeiro e segundo descarte do jigüe. Já a fração residual $BO:Md(\gamma)$ foi coletada após o beneficiamento por meio-denso do lavador principal. A alimentação do beneficiamento secundário é composta pelas frações residuais $BO:Ji(\gamma)-1$ e $BO:Ji(\gamma)-2$ e $BO:Md(\gamma)$ submetidas à relavagem por jigüe, resultando numa única fração residual identificada como $BO:Ji(\gamma)-3$.

A mineradora Δ (delta) é a única com mineração a céu aberto (camada Barro Branco, BB) e beneficiamento a seco. A camada BB apresenta razoável uniformidade, podendo ser subdividida em Forro, Quadração e Banco. No processamento a seco por mesa de ar, foram coletadas 3 frações residuais identificadas como $BB:Ma(\Delta)-1$ (originária da subcamada Forro), $BB:Ma(\Delta)-3$ (originária da subcamada Banco), $BB:Ma(\Delta)-2$ (originária da subcamada Quadração). O $BB:Br(\Delta)$ (originária dos finos da subcamada Quadração) é majoritariamente formada por argilas que são descartadas no processo de britagem antes da separação por mesa de ar.

A fração de finos resultante da mesa de ar é destinada a uma planta de concentração de carvão a úmido. Nesta planta foram coletadas duas frações residuais identificadas como BB:Ci(Δ)-1 e BB:Bd(Δ). A fração residual BB:Ci(Δ)-1 possui um maior tamanho de partícula. Já a fração residual BB:Bd(Δ) foi coletada de uma bacia de decantação de finos. A Figura 3-6 apresenta as 6 frações geradas na mineradora delta.

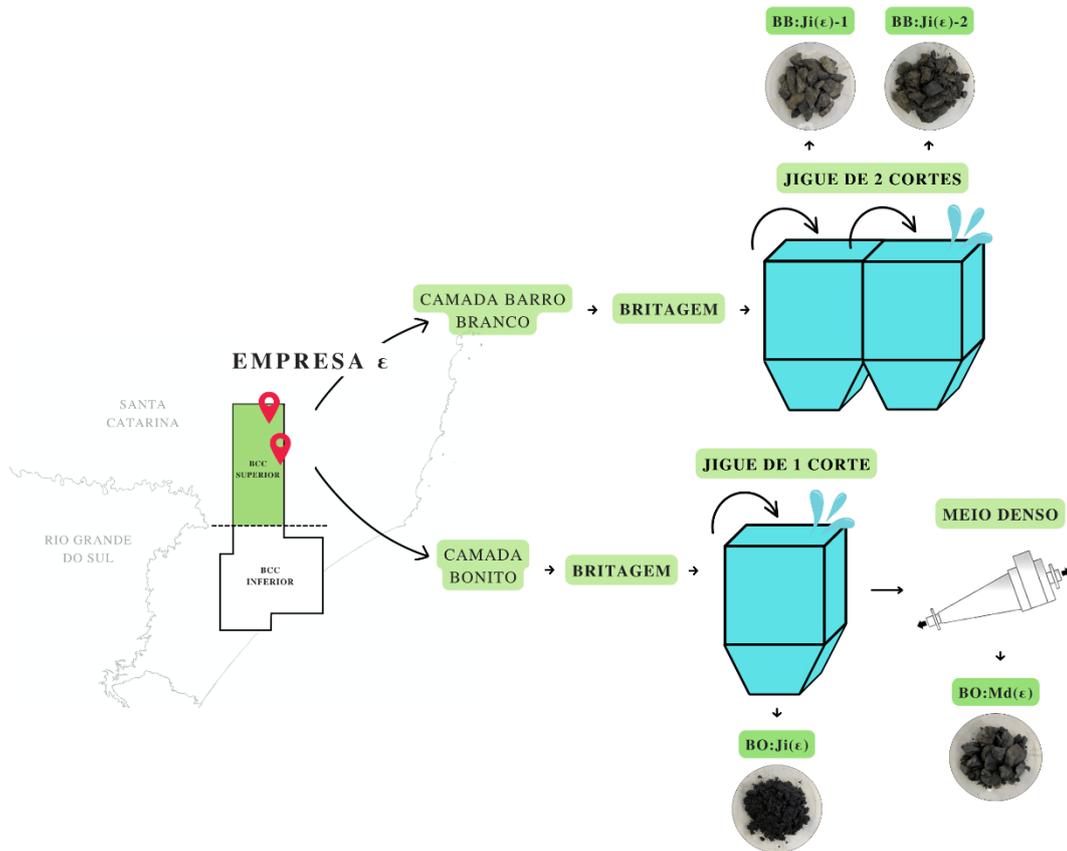
Figura 3-6 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora Δ (magenta) e as frações residuais geradas.



Fonte: Autor (2022).

A mineradora ϵ (épsilon) possui duas jazidas de extração: mina Bonito, que extrai carvão da camada Bonito, e mina G, onde a extração é realizada da camada Barro Branco. A Mina Bonito possui o beneficiamento realizado por jigue e meio denso onde foram coletadas as frações residuais BO:Ji(ϵ) e BO:Md(ϵ), respectivamente. Na mina G as frações residuais coletadas são do beneficiamento por jigue de dois descartes identificadas como BB:Ji(ϵ)-1 e BB:Ji(ϵ)-2. A Figura 3-7 apresenta as 4 frações geradas na mineradora épsilon.

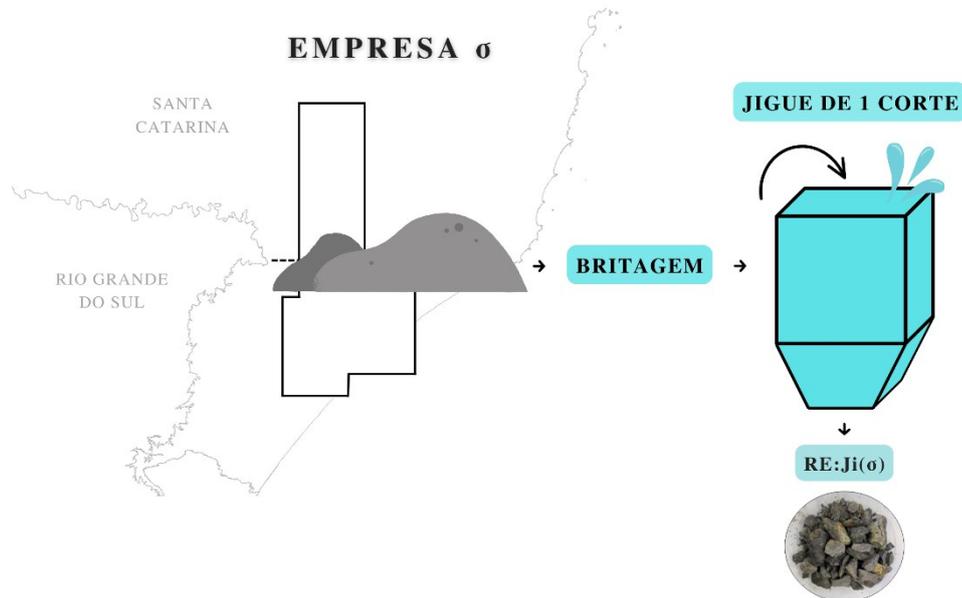
Figura 3-7 – Representação do beneficiamento resultando em quatro frações residuais resultantes da concentração do carvão da empresa épsilon (ϵ).



Fonte: Autor (2022).

A mineradora σ (sigma) extrai carvão da camada Bonito e realiza a concentração do carvão por jig, resultando em uma única fração residual identificada como $RE:Ji(\sigma)$, a qual é representada na Figura 3-8.

Figura 3-8 – Representação esquemática do beneficiamento da mineradora σ (azul) e a fração residual gerada.



Fonte: Autor (2022).

3.2 MÉTODOS

A inserção do conceito de economia circular baseia-se numa abordagem sistêmica, para manter o fluxo circular dos recursos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável com o princípio de reutilização de resíduos em outros processos produtivos, a partir de mudanças de padrões de produção e consumo de aspectos econômicos, sociais e ambientais. O propósito da economia circular está em estimular práticas de gestão e de criação de valor para os resíduos gerados, estimulando novas oportunidades para as empresas com objetivos de manter a harmonia com o meio ambiente, principalmente através dos resíduos desviados de aterro e da redução no uso de novas matérias-primas.

Para que se tenha a valorização de resíduos de forma efetiva é preciso estabelecer análises de incertezas técnicas, econômicas e ambientais. Raupp-Pereira (2006) desenvolveu a sistemática de valorização CPQvA, uma estratégia para valorização de resíduos estruturada, sobre uma base de correlação de quatro critérios sistemáticos. De forma abreviada CPQvA (Figura 3-9), estabelece um guia sistêmico multicritério da definição do melhor caminho para

valorização de resíduos por meio da: C – Classificação, P – Potencialidade, Qv – Quantidade/viabilidade e A – Aplicabilidade.

Figura 3-9– Sistemática CPQvA para a valorização de resíduos.



Fonte: Autor (2022).

3.2.1 Classificação

Seguindo a sistemática CPQvA, representada na Figura 3-9, o primeiro item a ser avaliado para valorização de resíduos é o seu enquadramento ambiental.

A **Classificação** é realizada para enquadramento de acordo com a norma NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a). Com esta análise os resíduos são classificados em dois grupos: perigosos (classe I) e não-perigosos (classe II), sendo ainda este último grupo subdividido em não inerte (classe II-A) e inerte (classe II-B). De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil e a Lei 12.305 (BRASIL, 2010b), quando o resíduo é classificado como perigoso este fica impossibilitado de ser valorizado (assim como o rejeito) e não pode ser recuperado ou reutilizado, tendo necessariamente que ser disposto em aterro industrial controlado.

Dentro desta classificação, Classe I são os rejeitos que possuem uma dessas características: inflamabilidade; corrosividade (mistura com água na proporção 1:1 em peso produzir solução que apresente pH < 2 ou > 12,5); reatividade; toxicidade e/ou patogenicidade.

As definições de rejeito e resíduos sólidos são descritas na Lei 12.305 (BRASIL, 2010b), como segue:

“Art. 3º. XV - rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada; XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;

Neste sentido, apesar de ser comumente chamado de rejeito, estes materiais oriundos da mineração de carvão podem ser reclassificados como resíduos ao longo do trabalho para que possa ter uma destinação adequada, que podem incluir a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético.

3.2.2 Potencialidades

A **potencialidade** dos resíduos, denominados neste trabalho por frações residuais, foram avaliadas para as 24 frações residuais por meio de análises físico-químicas, conforme descrição da Figura 3-9.

Para a determinação da massa específica das 24 frações residuais de carvão foi utilizado o picnômetro de gás hélio modelo ULTRAPYC 1200e (Quantachrome Instruments, USA). Os materiais foram previamente secos em estufa até massa constante e posteriormente foram cominuídos até obter material passante em peneira de 16 mesh (1,18 mm). Após permanência em estufa por um período de 12 h com temperatura constante de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, foram acondicionadas em dessecador até a estabilização da temperatura ambiente.

Figura 3-10 – Ensaio de caracterização realizados nas 24 frações residuais.



Fonte: Autor (2021).

Para determinação do tamanho de partículas das 24 frações residuais foi utilizado a norma NBR NM 248 (2003). A análise granulométrica foi feita por meio de separação em peneiras com aberturas de malha de: 150 μm ; 300 μm ; 600 μm ; 1,00 mm; 1,18 mm; 2,00 mm; 2,36 mm; 4,75 mm; 6,35 mm; 1,25 cm; 1,60 cm e 2,50 cm.

As diferentes frações residuais foram secas em estufa na temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante e o ensaio foi realizado em duplicada com 500 gramas de cada material/ensaio. Cada uma das diferentes frações, foram submetidas a agitação mecânica em mesa vibratória por um período de 15 minutos de forma a permitir a separação prévia dos diferentes tamanhos de partículas. Em seguida, foi determinada a massa do material retido em cada peneira e calculado o percentual referente a cada faixa granulométrica estabelecida pelo conjunto de peneiras utilizado.

A secagem em estufa das frações residuais foi utilizada para determinação da umidade com temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante.

A norma NBR NM 30 (2001) foi utilizada para determinar a capacidade de absorção de água na condição saturada com superfície seca das diferentes frações residuais. Estas análises foram realizadas conforme tamanho de partícula de origem de cada material sem qualquer descarte. O resultado da capacidade de absorção foi obtido em percentual de acordo com o aumento de massa da amostra em relação à sua massa no estado seco.

Para determinação do potencial hidrogeniônico (pH) dos rejeitos solubilizados, foi utilizado o medidor de pH modelo AK95 (AKSO, Taiwan). Para a análise, 4,0 gramas de cada fração residual (como gerado, sem secagem) foram misturadas com 100 ml de água deionizada em um Becker. Durante 15 minutos, a mistura ficou sob agitação em agitador magnético, seguido de 5 min de descanso. A leitura do pH foi realizada em três momentos: imediatamente após o procedimento de coleta/preparação (dentro de um período 24 h), após 12 meses de acondicionamento em recipiente fechado e a terceira análise após 36 meses da coleta/armazenamento.

Para determinação da composição química das frações residuais foi utilizada a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX), modelo EDX 7000 (Shimadzu, Japão), seguindo o método semiquantitativo de óxidos para amostras sólidas em pó. Todas as amostras foram desagregadas com auxílio de almofariz e pistilo de porcelana até se tornar passante em peneira de 230 mesh (62 μm). Nesta etapa preparatória, separou-se 2 gramas das 24 amostras das frações residuais para a realização de perda ao fogo (PF). Todos os ensaios foram realizados em duplicata até 950°C, seguindo a norma ASTM D7348 (ASTM D7348, 2007), a fim de eliminar os materiais orgânicos e a água de constituição presentes. Após a realização da PF, as cinzas foram moídas e prensadas em forma de pastilhas, para posterior realização da análise química.

A caracterização mineralógica foi realizada por difração de raios-x (DRX). O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-X, modelo LabX XRD 6100 (Shimadzu, Japão) com radiação Cu, voltagem do tubo de 40 kV e corrente de 30 mA, leitura entre 4° e 70° (2 θ) e velocidade 0,02°/s. A identificação das fases cristalinas presentes foi realizada por meio do software X'Pert High Score Plus. Para esta análise as frações residuais foram desagregadas manualmente em almofariz e pistilo de porcelana até tornar-se passante em malha de abertura 62 μm (230 mesh) e, analisadas na forma de pastilhas de aproximadamente 1 grama de amostra em pó prensada. O método permite identificar, de maneira qualitativa, os minerais constituintes nas amostras através da determinação das distâncias interplanares das células cristalinas, que são constituídas por planos definidos, diretamente relacionados com o raio atômico de cada um dos átomos e seu tipo de ligação. O ensaio resulta em um gráfico de intensidade que permite a comparação dos picos adquiridos com padrões difratométricos de fases individuais disponibilizadas pelo ICCD (*International Center for Diffraction Data* com sede nos EUA).

Para análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) foi utilizado o equipamento STA 449 F3 (NETZSCH, Alemanha) em duas etapas. A primeira etapa foi realizada com taxa de aquecimento de $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ em atmosfera inerte (N_2) e 80 ml/min de fluxo, com aproximadamente 70 mg de material onde determinou-se as perdas mássicas de desidroxilação por variação da temperatura. Para segunda etapa, as mesmas frações residuais foram pesadas novamente e reconduzidas para análise térmica em atmosfera oxidante (oxigênio), em cadinho de alumina, onde foi determinado perdas mássicas por combustão. O experimento foi realizado de 30 a 1100 $^{\circ}\text{C}$ para todas as amostras.

As formas de enxofre foram obtidas por análises de enxofre total, realizada via analítica instrumental, de enxofre sulfático e pirítico. Essa determinação foi realizada por meio de análise elementar por combustão, conduzido em equipamento modelo CHN 628 SERIES SULFUR (LECO, EUA), onde 0,20 g do material foi colocado no equipamento e queimado até temperatura de 1350 $^{\circ}\text{C}$. Enxofre pirítico foi determinado utilizando uma amostra de 2 g de material, o qual adicionou-se ácido clorídrico. O material obtido das lavagens com ácido foi utilizado para a determinação desse tipo de enxofre por meio do titulante dicromato de potássio. O enxofre sulfático foi obtido a partir do filtrado do ensaio com ácido clorídrico. Como o enxofre total é o somatório do enxofre orgânico com o enxofre pirítico e sulfático; o enxofre orgânico foi obtido pela diferença.

Para determinação da análise elementar foi utilizado o analisador elementar LECO CHN628 Series, segundo a norma ASTM D 5373 (2021), este ensaio envolve a determinação do percentual em massa do carbono bem como enxofre, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio (usualmente estimado por diferença).

3.2.3 Quantidade/viabilidade

A grande quantidade de rejeito (65% do ROM extraído) gerado com a concentração do carvão em Santa Catarina, deixa claro que a mineração de carvão é uma fonte geradora significativa de impactos ambientais, pois os rejeitos possuem efeitos característicos adversos no solo, na água e no ar. A ocupação e subvenção da terra, poluição do solo e recursos hídricos e destruição de habitats de vegetação e vida selvagem são alguns desses impactos (AMIRI *et al.*, 2022).

Desta forma, ressalta-se ainda mais a importância do desenvolvimento de estudos com base na viabilidade de aplicação destas frações residuais como matéria prima ou fonte secundária de recursos minerais (subproduto).

Oliveira (OLIVEIRA, 2017) aprofundou cada critério estabelecido por Raupp-Pereira (2006) dentre eles, a avaliação do critério quantidade/viabilidade (Qv) envolvendo sete importantes ações que norteiam a utilização de um resíduo como matéria prima: identificar a sazonalidade do processo produtivo; avaliar o limite de tolerância composicional; verificar a necessidade de adequação do gerenciamento do resíduo sólido industrial (RSI) pela empresa geradora; conhecer os quantitativos de RSI gerado e produto candidato, entre outros.

3.2.4 Aplicação

A aplicabilidade, como o último critério sistêmico e que estabelece o propósito da valorização, consiste na avaliação de possíveis alternativas de aplicação, de acordo com os resultados dos critérios anteriores, fundamentação teórica e de experiências estabelecidas no desenvolvimento de outros trabalhos de pesquisa. O desempenho do produto deve ser avaliado por meio da comparação com produtos comerciais, a fim de verificar se o produto candidato à aplicação atende às exigências, normas e requisitos do mercado consumidor (OLIVEIRA, 2017).

As possibilidades de aplicação do resíduo (ou potenciais frações residuais) em diferentes produtos foram citadas ao longo do trabalho, porém, grande quantidade de resíduos/rejeitos são depositadas diariamente, o que acaba por evidenciar também a necessidade de uma efetiva aplicação destes materiais.

Ressalta-se que, através da sistemática CPQvA, este estudo foca nas particularidades das frações residuais resultantes do beneficiamento do carvão, buscando, através das suas características, identificar potenciais propriedades que permitam a efetiva aplicação destes materiais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se inicialmente os resultados acerca do critério de Classificação (C) das frações residuais coletadas, caracterização física e química destes materiais (Potencialidade, P), aspectos referentes à quantidade e viabilidade de valorização dos resíduos (critério Qv) e, por fim, alguns trabalhos de pesquisa (Aplicabilidade, A), resultantes do desenvolvimento da abordagem desta tese.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES RESIDUAIS

Durante as atividades de mineração de carvão, grandes quantidades de pó de carvão, cinzas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e metais são liberados no meio ambiente, sendo a exposição a estes compostos, um dos mais importantes riscos ocupacionais para a saúde dos trabalhadores (LEÓN-MEJÍA *et al.*, 2011, 2014). O descarte de resíduos de mineração de carvão representa preocupações ambientais significativas devido à sua influência potencial em solos e sedimentos, águas superficiais e subterrâneas do entorno. Seus potenciais impactos incluem poluição do ar causada por emissões de gases e partículas; poluição do solo, da superfície e das águas subterrâneas causadas pela mobilização de partículas sólidas, lixiviação de elementos perigosos, dissolução de minerais neoformados e deposição de partículas atmosféricas; e deterioração da vegetação causada pela drenagem ácida da mina (DAM). Estes impactos podem causar efeitos na saúde do ser humano quando as partículas são inaladas, as águas contaminadas são consumidas e quando as terras contendo contaminantes são usadas para a agricultura. Minerais como epsomita, jarosita, hematita e outros são os mesmos comumente associados à DAM, na qual a oxidação de sulfetos desempenha um papel importante. Rejeitos de minas descobertos podem resultar em estresses ambientais, como acidificação severa e lixiviação de metais pesados em cursos d'água adjacentes e formação de DAM (FARIAS, 2002).

A oxidação de sulfetos nos materiais residuais de carvão gera ácido sulfúrico, que ataca agressivamente os aluminossilicatos. Este processo de intemperismo solubiliza quantidades consideráveis de Al, Fe, Mg e K na água (RIBEIRO *et al.*, 2013).

Portanto, os diferentes estágios da mineração e do uso do carvão afetam o meio ambiente de alguma forma. As pilhas de rejeitos de minas de carvão são exemplos de habitats recém-

estabelecidos que diferem dos ecossistemas naturais. A mineração de carvão pode liberar substâncias perigosas (As, Cd, Hg) e elementos críticos (Ga, Sc, Zr, Nb) no ecossistema. As áreas de mineração de carvão do extremo sul catarinense, apresentam, quanto aos possíveis riscos dos elementos presentes no solo e ao fracionamento/espeiação química, elementos perigosos como Hg, Pb, Zn, Cd (GONÇALVES *et al.*, 2021).

Metais tóxicos e metaloides como Cd, Cr, Pb e Hg são problemáticos devido ao seu potencial de acumulação no solo ao longo do tempo. O chumbo pode causar problemas neurológicos, imunológicos, cardiovasculares, renais e reprodutivos. O mercúrio pode danificar a função cerebral e renal, enquanto o Cádmio e o Cromo são considerados cancerígenos. Estes metais, tais como Pb, podem ser observados perto de minas de carvão (DUAN *et al.*, 2021).

A exposição ocupacional a resíduos de mineração de carvão a céu aberto, como partículas de poeira, metais pesados e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) tem sido estudada nos últimos anos devido a possibilidade de causar danos ao DNA e instabilidade genômica, associando estes distúrbios as etapas iniciais do desenvolvimento de câncer e outras doenças (ESPITIA-PÉREZ *et al.*, 2018, 2016).

A rota predominante de exposição de resíduos de mineração de carvão é através da inalação crônica de misturas complexas, como metais pesados, cinzas, ferro, HAPs e enxofre. Esta inalação pode resultar em distúrbios pulmonares, incluindo simples pneumoconiose, fibrose maciça progressiva, bronquite, perda de função, enfisema e até câncer. A exposição a resíduos de mineração de carvão pode resultar em um aumento da exposição genotóxica em trabalhadores de mineração de carvão, sendo uma consequência de danos oxidativos resultantes da exposição a misturas de resíduos de carvão contendo vestígios de ferro, enxofre, cinzas de carvão, metais pesados e PAHs (LEÓN-MEJÍA *et al.*, 2011, 2014).

A presença de metais pesados em tecidos de *Hypsiboas faber* coletados em áreas de mineração de carvão tem sido relatada por alguns autores, com ordem de concentração $Fe > Cu > Al > Zn > Rb > Mn > Br$, independentemente do órgão avaliado. Além da presença de metais, o índice de dano ao DNA é significativamente maior em espécimes coletados nas áreas poluídas. Sendo assim, os resíduos da mineração de carvão da Bacia do Carvão Catarinense podem ser considerados genotóxicos para anfíbios e podem ter impacto adverso sobre outros animais selvagens (ZOCHE *et al.*, 2013).

Um aumento da concentração de metais em camundongos que consomem suco de vegetais cultivados em hortas em depósitos de resíduos de carvão também tem sido relatado, o

que leva a conclusões de que pessoas que consomem vegetais cultivados sobre resíduos de carvão podem ingerir quantidades significativas de substâncias químicas. Isto pode representar um risco para a saúde, uma vez que essas plantas contêm metais essenciais e tóxicos em uma ampla gama de concentrações.

Apesar da possibilidade de contaminação dos vegetais em solos contaminados (ZOCHE *et al.*, 2017), podem-se citar estudos que fazem formulações com outros materiais residuais e que mantêm os níveis de contaminação aceitáveis e sem a geração de impactos ambientais (QUADRO *et al.*, 2019). Além disso, o uso como insumos agrícolas podem ser destinados para plantações que não sejam para fins alimentícios, (QUADRO *et al.*, 2019).

Na ausência de medidas de controle, a exposição de resíduos de minas de carvão ao intemperismo poderia gerar drenagem de minas ácidas (AMD). Uma possível forma de estabilização/solidificação destes compostos são as aplicações em materiais cerâmicos cimentícios ou sinterizados. Pois concentrações de metais pesados em matrizes cimentícias com abaixo dos níveis padrão indicados pela Agência de Proteção Ambiental, contendo resíduos de carvão são encontrados em concretos (MODARRES *et al.*, 2018). Tais fatores dão indicativos de potencialidade do uso destes materiais em elementos construtivos.

A classificação dos resíduos da mineração de carvão desta tese foi realizada com base na literatura e na classificação da fração residual BB:Md(α), por ser a primeira a ser coletada, sendo também representativa devido a grande quantidade gerada. Fazendo-se a caracterização ambiental, seguindo as normas NBR 10004 (2004), NBR 10005 (2004b) e NBR 10006 (2004c) a amostra residual foi classificada como não perigosa e não inerte (classe II-A).

Uma das características de periculosidade é a corrosividade. Neste quesito, por meio de medidas de pH (Figura 4-1), observou-se que nenhuma amostra apresentou valores menores do que 2 ou maiores do que 12,5 após a coleta. Este intervalo de pH é referente aos limites normativos estabelecidos para a corrosividade na norma NBR 10004/2004. O teste de corrosão mostrou que o pH na água na razão 1:1 da fração residual BB:Md(α) foi de 3,75, classificando-o como não corrosivo e não perigoso (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a).

Os resultados de lixiviação e solubilização da fração residual BB:Md(α) são apresentados juntamente com outras amostras da literatura e principais normativas nacionais e internacionais na Tabela 4-1. Observa-se que o extrato lixiviado não apresentou concentrações acima do limite máximo permitido, segundo o anexo F da NBR 10004 classificando os resíduos

como não perigosos - classe II. Nos resultados obtidos no extrato solubilizado, manganês, selênio e sulfato mostraram concentrações acima do máximo permitido no Anexo G da NBR 10004, caracterizando os resíduos como não inertes - classe II-A. Estes resultados mostram que a fração residual não é perigosa, permitindo, portanto, de forma representativa, estabelecer o conceito de material passível de classificação (resíduo) e, assim, tornando possível a continuidade da sistemática de valorização de resíduos de acordo com os critérios CPQvA.

Tabela 4-1 – Resultados dos testes de lixiviação e solubilização da fração residual BB:Md(α) e de diferentes rejeitos de mineração de carvão.

Elementos	Fração residual BB:Md(α) (mg/L)	(MOD ARRES <i>et al.</i> , 2018)	Limites de lixiviação EPA/EUA (mg/L)	Limites de lixiviação Brasil (mg/L)	Testes de solubilização deste trabalho (mg/L)	Limites de solubilização Brasil (mg/L)
Al	-	-	-	-	0,058	0,2
As	N.D.	-	5,0	1,0	0,001	0,01
Ba	0,026	-	100,0	70,0	0,006	0,7
Cd	N.D.	0,55	1,0	0,5	N.D.	0,005
Pb	N.D.	8,4	5,0	1,0	N.D.	0,01
Cl	-	-	-	-	21,08	250,0
Cu	-	0,69	-	-	N.D.	2,0
Cr	N.D.	6,58	5,0	5,0	N.D.	0,05
Fe	-	-	-	-	0,103	0,3
F	0,3	-	-	150,0	0,3	1,5
Mn	-	-	-	-	1,232	0,1
Nitrato	-	-	-	-	0,259	10
Ag	N.D.	-	5,0	5,0	N.D.	0,05
Se	0,012	-	1,0	5,0	0,012	0,01
Na	-	-	-	-	14,63	200
Surfactante	-	-	-	-	N.D.	0,5
Sulfatos	-	-	-	-	632,6	250
Zn	-	0,37	-	-	0,2	5,0
Ni	-	4,94	-	-	-	-

*N.D.: Não detectado.

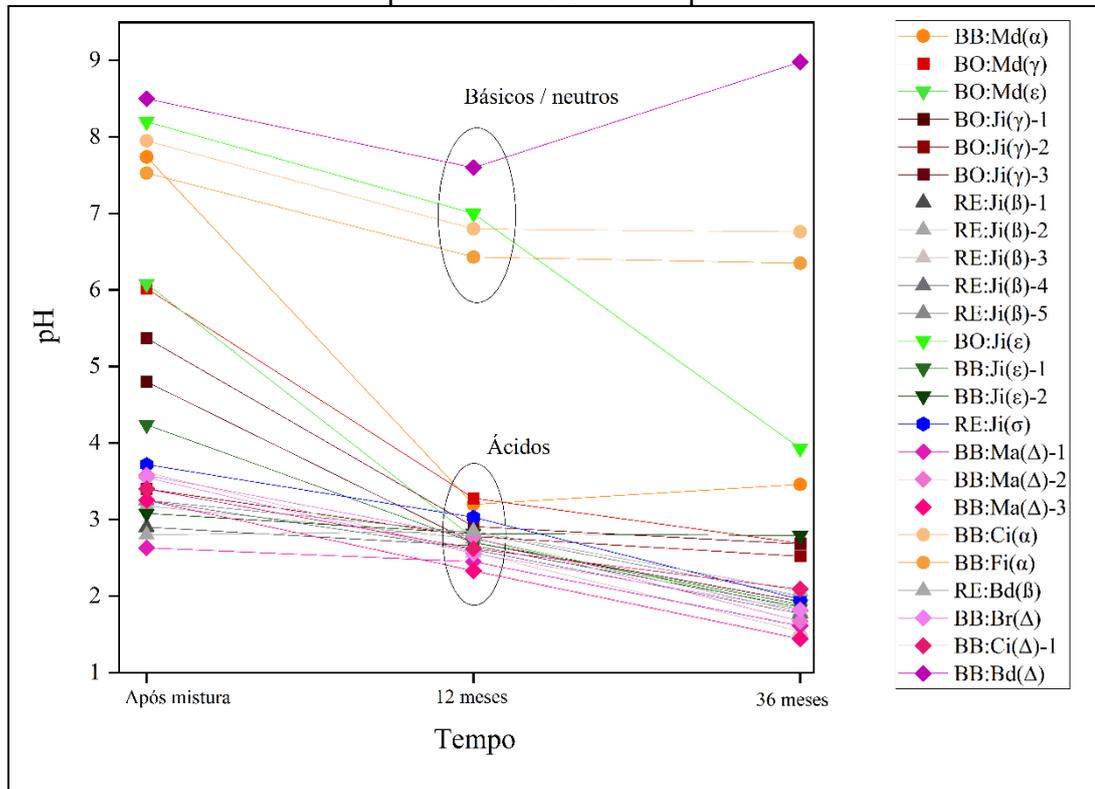
Quando comparado com a literatura e normativas, não houve parâmetros acima do permitido em relação aos limites de lixiviação padrão da EPA (agência de proteção ambiental) dos EUA. O rejeito de carvão sul catarinense, foi classificado como classe II-A (resíduo não

perigoso e não inerte), porém, quando apenas a fração argilosa do rejeito é submetida à classificação de acordo com a referida norma, o material passou a ser de classe II-B (resíduo não perigoso e inerte). As amostras de rejeito de carvão apresentaram Cr (cromo) e Pb (chumbo) acima do permitido pelas regulamentações brasileiras e americanas (MODARRES *et al.*, 2018).

O parâmetro sulfato ficou fora dos limites da norma, o que caracterizou o resíduo como classe II-A (não inerte). Os resíduos classe II-A podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (NRB 10004 ABNT, 2004).

Pode-se observar na Figura 4-1, que a maioria das frações residuais com o passar do tempo sofre acidificação. Analisando o pH dos rejeitos quando coletados, podemos observar que 5 destes, apresentaram pH maior que 7 caracterizando material básico BB:Md(α) – 7,74; BO:Ji(ϵ) – 8,2; BB:Ci(α) – 7,95; BB:Fl(α) – 7,53; BB:Ci(Δ)-1 – 8,5). Uma característica comum destes, é que são rejeitos finos, com exceção da amostra BO:Ji(ϵ). De forma geral os rejeitos finos passam por vários processos de lavagens para concentração do carvão, o que pode explicar maior concentração de argila e maior retirada de material piritoso, resultando um pH mais elevado. Duas frações residuais pertencentes a camada Bonito e resultante do beneficiamento por meio denso de diferentes empresas, apresentaram pH neutro (BO:Md(γ)- 6,02 e BO:Md(ϵ)- 6,08) e os outros 17 rejeitos apresentaram pH entre 5,37 e 2,63 classificados como ácidos. Fazendo uma relação entre pH das frações residuais classificadas como ácidas e a sua granulometria (Figura 4-2), pode-se perceber que essas frações são formadas por 70% de partículas superiores a 2,36 mm, com exceção da fração BB:Br(Δ). Analisando, em geral, o beneficiamento das mineradoras deste estudo, percebe-se que as primeiras frações residuais descartadas na concentração do carvão são formadas por materiais de maior tamanho de partículas, maior massa específica e com maior percentual de pirita, o que ajuda a justificar os valores de pH abaixo de 3,0.

Figura 4-1 – Potencial hidrogeniônico das amostras em 3 períodos diferentes: após coleta, 12 meses após coleta e 36 meses após coleta.



Fonte: Autor (2021).

Analisando o pH após 12 meses de armazenamento todas as frações residuais tiveram uma diminuição do pH, somente a fração RE:Ji(β) que teve um pequeno aumento (2,80 para 2,85) mas, após 36 meses de armazenamento, o pH diminuiu (2,80 < 2,85 > 2,06).

Após 36 meses de armazenamento pode-se observar que a tendência de acidificação continua onde 50% das frações apresentaram pH abaixo de 2 o que, conforme a norma NBR 10004 (2004) caracteriza um resíduo perigoso. A composição química das frações residuais neste período de armazenamento não foi alterada, o que justifica a alteração do pH possivelmente é a alteração da estrutura química dos rejeitos.

As observações do comportamento do pH levam à valorização dos resíduos logo após sua geração, pois ao longo do tempo tornam-se materiais não passíveis de reutilização, de acordo com a legislação brasileira.

4.2 POTENCIALIDADES

4.2.1 Umidade, massa específica e absorção

Para a caracterização das 24 (vinte e quatro) frações residuais coletadas nas 6 (seis) mineradoras, iniciou-se analisando a umidade dos materiais, massa específica real e absorção de água (Tabela 4-2).

Com análise dos resultados de percentual de umidade, percebe-se a seguinte relação: elevados percentuais estão relacionados com o processo de concentração de carvão que, por sua vez, estão relacionados com o tamanho de partícula resultante do processo de concentração de carvão de cada mineradora. Os maiores percentuais de umidade encontrados estão entre 65,26 e 14,30%, sendo o maior percentual associada à fração resultante do ciclone e àquela coletada na bacia de decantação da camada Barro Branco - BB:Bd(Δ).

As frações residuais consideradas finos nos processos analisados (BB:Ci(α), BB:Fl(α), RE:Ji(β), BB:Ci(Δ)-1 e BB:Bd(Δ), possuem comprovadamente os menores tamanhos de partículas (Figura 4-3 e 4-4) e maiores percentuais de umidade, importante ressaltar que estes materiais finos são encaminhados para os depósitos da forma de “lodo”. Relacionando-se o processo de beneficiamento e o percentual de umidade, fica claro que os maiores teores de umidade são determinados nas frações resultantes do: ciclone (BB:Ci(α), BB:Ci(Δ)-1, flotação (BB:Fl(α)); bacia de decantação (BB:Bd(Δ), (RE:Bd(β)). Torna-se importante ressaltar que essa relação pode ser correlacionada com a quantidade de energia necessária para uma eventual secagem destes materiais.

Para caracterização do carvão, uma das propriedades físicas mais importantes é a sua massa específica. A massa específica pode variar significativamente de um carvão para outro, pois, durante sua formação a matéria carbonosa se mistura à mineral (RUIZ, 2009).

Analisando a massa específica das frações residuais observamos uma variação de 2,14 a 3,18 g/cm³. Valores de massa específica de rejeitos de carvão entre 2,30 e 2,50 g/cm³, próximos aos deste estudo, são encontrados na literatura (SKARZYŃSKA, 1995). Para realizar correlações é importante considerar que o carvão tipicamente possui massa específica entre 1,30 e 1,50 g/cm³, a fração mineral que o acompanha entre 2,65 e 2,70 g/cm³ e a fração piritosa entre 4,90 e 5,10 g/cm³ (RUIZ, 2009). Também são encontrados valores de massa específica da fração argilosa contida em rejeitos de carvão de SC entre 2,50 e 2,70 g/cm³ (AMARAL, 2014).

Portanto, estas caracterizações/informações fortalecem a hipótese de que a maior parte destes materiais é formada por minerais argilosos. Porém, acredita-se que os valores de massa específica acima desta faixa, podem estar associados a presença de pirita.

Tabela 4-2 – Dados de umidade, massa específica e absorção dos rejeitos.

Camadas	Código do resíduo	Umidade (%)	Massa específica (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Barro Branco	● BB:Md(α)	3,98	2,54	3,2
	● BB:Ji(ϵ)-1	3,17	2,51	1,3
	● BB:Ji(ϵ)-2	4,59	2,38	1,2
	● BB:Ma(Δ)-1	6,71	2,77	7,3
	● BB:Ma(Δ)-2	6,04	2,33	4,9
	● BB:Ma(Δ)-3	1,25	3,18	2,8
	● BB:Br(Δ)	14,3	2,36	7,6
	● BB:Ci(α)	14,88	2,53	3,9
	● BB:Ci(Δ)-1	20,39	2,4	5,4
	● BB:Bd(Δ)	65,26	2,43	12,3
	● BB:Fl(α)	18,64	2,14	10
Bonito	● BO:Md (γ)	3,31	2,3	1,7
	● BO:Md(ϵ)	6,21	2,65	Nd
	● BO:Ji(γ)-1	2,94	2,61	Nd
	● BO:Ji(γ)-2	2,87	2,73	Nd
	● BO:Ji:(γ)-3	3,78	2,85	Nd
	● BO:Ji(ϵ)	16,3	2,64	Nd
Rejeito	● RE:Ji(β)-1	6,22	2,58	0,8
	● RE:Ji(β)-2	6,96	2,45	1,7
	● RE:Ji(β)-3	6,43	2,82	nd
	● RE:Ji(β)-4	10,89	2,5	2,3
	● RE:Ji(β)-5	9,9	2,43	3,3
	● RE:Bd(β)	20,42	2,38	9,4
	● RE:Ji(σ)	4,8	2,34	3,9

nd: não mensurado.

Fonte: Autor (2021).

É possível relacionar o teor de carbono de um resíduo conhecendo a sua massa específica, quanto menor a massa específica maior presença de carbono (VO *et al.*, 2022).

Sendo assim, a amostra BB:Fl(α) que possui menor massa específica entre as frações residuais, muito possivelmente se deve ao fato da maior presença de carvão finamente disperso, relacionado com o processo da etapa de flotação da camada Barro Branco, informação confirmada pela análise elementar CHNS/O (Tabela 4-5), bem como pela caracterização térmica (ver pág. 89). Essa mesma relação, pode ser feita para a fração residual, BB:Ma(Δ)-3, com maior massa específica ($3,18 \text{ g/cm}^3$), possuindo esse menor percentual de carvão. Com relação a composição química (Tabela 4-3) a maior massa específica também possui o maior percentual de ferro (Fe_2O_3) e isso se comprova em algumas frações (GUSTAVO SIMÃO, 2012). Nas frações de beneficiamento de antigos depósitos de rejeitos encontramos a maior massa específica com maior percentual de Fe_2O_3 (RE:Ji(β)-3).

As camadas de carvão apresentam a presença de pirita distribuída de forma distinta dentro da camada, este fato somado ao tipo de beneficiamento densimétrico, gera frações residuais com massa específica diferente, mas sempre indicando a presença de pirita nas frações mais densas e tendência a materiais carbonosos nas frações menos densa, esses materiais estão associados ao conteúdo do material beneficiado.

Ainda na Tabela 4-2, a análise de absorção realizada com as frações residuais mostra que as três frações com maior taxa de absorção são resíduos considerados finos (partículas de argilas possuem menor granulometria quando comparadas a siltes e areias) no beneficiamento, BB:Bd(Δ), BB:Fl(α) e RE:Bd(β) com respectivamente 12,3; 10,3 e 9,4%. Ressalta-se que as maiores taxas de absorção podem ser associadas à maior presença de conteúdo argiloso, uma vez que espaços existentes entre as camadas destes argilominerais podem ser ocupados por moléculas de água e outros íons nela dissolvidos (POZZI; GALASSI, 1994).

4.2.2 Composição química

Os resultados da composição química das frações residuais são apresentados na Tabela 4-3 e foram organizadas conforme a camada de extração do carvão (Barro Branco, Bonito e antigos depósitos de rejeitos). Os óxidos majoritários são: óxidos de silício (SiO_2 : varia de 49,77 a 8,20%), alumina (Al_2O_3 : 23,77 a 3,39%), enxofre (SO_3 : 10,78 a 0,13%), óxido de ferro (Fe_2O_3 : 46,68 a 2,87%) e potássio (K_2O : 4,54 a 0,34%) para todas as frações residuais. Outra percepção clara é que todos os resíduos possuem como maior percentual o silício, representado na forma de dióxido de silício (SiO_2) seguido do alumínio (Al_2O_3). A exceção é a fração residual

BB:Ma(Δ)-3 resultante do beneficiamento a seco por mesa de ar, proveniente da subcamada Banco da camada Barro Branco, possuindo 8,20% de SiO₂ e 3,30% de Al₂O₃. Esta fração possui o maior percentual de ferro (Fe₂O₃ - 46,68%) e perda ao fogo (41,05%) de todas as frações.

Analisando a perda ao fogo de todas as frações pode-se perceber uma variação de 15,25% para menor perda ao fogo e 41,05%, para fração com maior perda ao fogo. Esses percentuais são referentes à perda de água de constituição dos argilominerais, a hidratação do sulfato ferroso, oxidação de matéria orgânica (fração carbonosa ainda existente nas frações residuais), decomposição de carbonatos, como a calcita (CaCO₃) e decomposição da pirita, com início em 600°C (GOMES, 1986; PETERSON *et al.*, 2008). Essas reações estão presentes em todas as frações em maior ou menor percentual. Um conteúdo de material carbonáceo e volátil superior a 20% pode direcionar uma fração para combustão em leito fluidizado circulante (LI; WANG, 2019). Os maiores percentuais de perda ao fogo são da empresa Δ (delta) cujas frações residuais, (BB:Ma(Δ)-1 subcamada Forro, BB:Ma(Δ)-2 subcamada Quadração e BB:Ma(Δ)-3 subcamada Banco e BB:Ca(Δ)-1), dificilmente podem ser comparadas com as demais, pois se trata de uma lavra seletiva onde a camada Barro Branco aflora e sua extração se dá a céu aberto. Outra fração residual que também apresenta elevado percentual de perda ao fogo é a empresa α , BB:Fl(α), com 30,8 %. Contudo, percebe-se que todas as frações pertencem a camada Barro Branco.

Elevados percentuais de silício em conjunto com a presença de elementos como alumínio, cálcio, potássio, magnésio, manganês e sódio caracterizam os resíduos por ser uma fração argilosa e arenosa (NASCIMENTO *et al.*, 2002).

Tabela 4-3 – Composição química dos resíduos com os percentuais dos principais óxidos.

Camada	Amostra	Teor de óxidos (% em massa)											Outros	Perda ao fogo
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MgO	MnO	ZrO ₂			
Barro Branco	BB:Md(α)	●	49,62	20,82	0,60	6,69	1,52	2,83	1,60	0,00	0,01	0,06	0,20	16,04
	BB:Ji(ε)-1	●	44,61	20,55	0,13	12,76	0,35	2,66	1,38	0,00	0,02	0,06	0,15	17,33
	BB:Ji(ε)-2	●	47,00	23,77	0,14	5,96	0,43	3,18	1,58	0,00	0,02	0,04	0,22	17,66
	BB:Ma(Δ)-1	●	29,23	14,47	0,14	18,32	0,07	1,29	0,70	0,00	0,01	0,05	0,08	35,65
	BB:Ma(Δ)-2	●	40,38	17,96	0,13	12,54	0,00	1,79	1,04	0,00	0,01	0,05	0,09	26,02
	BB:Ma(Δ)-3	●	8,20	3,39	0,14	46,68	0,08	0,34	0,00	0,00	0,00	0,01	0,12	41,05
	BB:Br(Δ)	●	49,77	22,82	0,14	2,87	0,00	2,47	1,57	0,00	0,02	0,08	0,19	20,09
	BB:Bi(α)	●	36,73	16,11	1,89	11,28	7,65	2,32	1,35	0,00	0,04	0,05	0,23	22,36
	BB:Bi(Δ)-1	●	40,59	17,38	0,27	10,11	0,24	1,74	0,97	0,00	0,01	0,05	0,16	28,47
	BB:Bd(Δ)	●	47,87	22,03	1,19	3,20	0,97	2,25	1,37	0,72	0,01	0,06	0,13	20,20
BB:Fl(α)	●	41,15	20,15	0,34	3,08	0,96	1,99	1,03	0,39	0,01	0,04	0,07	30,8	
Bonito	BO:Md(γ)	●	36,36	12,74	10,78	8,39	6,40	3,89	1,06	0,47	0,16	0,04	0,18	19,54
	BO:Md(ε)	●	47,16	18,00	0,48	11,73	0,96	4,44	1,09	0,64	0,03	0,04	0,17	15,25
	BO:Ji(γ)-1	●	37,88	13,41	3,71	18,72	2,12	3,06	0,70	0,50	0,06	0,03	0,07	19,75
	BO:Ji(γ)-2	●	37,48	13,86	10,2	12,61	5,36	3,61	0,80	0,00	0,15	0,04	0,20	15,68
	BO:Ji(γ)-3	●	47,57	16,83	1,71	10,07	1,16	4,54	0,95	0,53	0,04	0,04	0,09	16,47
	BO:Ji(ε)	●	37,35	13,77	0,91	18,01	2,11	3,30	0,78	0,00	0,08	0,06	0,23	23,39
Rejeito	RE:Ji(β)-1	●	42,45	16,93	4,35	8,75	2,14	2,67	1,40	0,00	0,01	0,06	0,08	21,15
	RE:Ji(β)-2	●	40,50	18,14	4,30	9,85	2,62	2,61	1,33	0,00	0,02	0,07	0,16	20,4
	RE:Ji(β)-3	●	35,54	15,73	2,21	16,85	1,16	2,03	0,98	0,00	0,01	0,09	0,16	25,23
	RE:Ji(β)-4	●	45,27	16,93	3,05	5,36	1,76	2,47	1,23	0,00	0,01	0,07	0,16	23,68
	RE:Ji(β)-5	●	40,28	14,93	4,82	7,99	2,28	2,68	1,31	0,00	0,01	0,06	0,12	25,5
	RE:Bd(β)	●	43,20	17,22	0,78	8,54	0,66	3,13	1,32	0,00	0,01	0,05	0,18	24,91
	RE:Ji(σ)	●	39,34	15,26	2,50	10,67	5,04	3,47	0,98	0,50	0,09	0,00	0,18	22,00

Fonte: Autor (2021).

Os óxidos Fe₂O₃ e TiO₂ (dióxido de titânio) (TiO₂: 0,70 – 1,60%) são óxidos cromóforos e estão presentes em todas as frações residuais com exceção da amostra BB:Ma(Δ)-3 que não possui TiO₂, mas possui o maior percentual de ferro. O percentual de ferro aparece na FRX como Fe₂O₃, mas o ferro está intimamente ligado ao conteúdo pirítico do material (FeS₂), também caracterizada através da análise mineralógica (ver pág. 94).

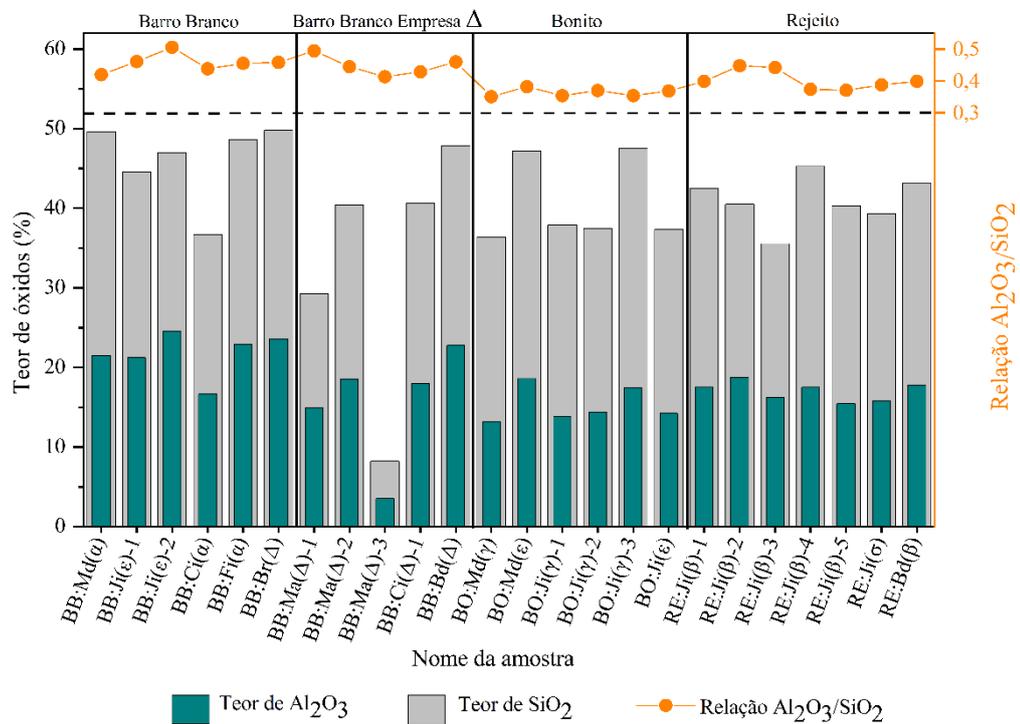
Com base na análise química, todas as frações residuais deste estudo apresentam um maior percentual de SiO₂ em relação a Al₂O₃. Com base na relação (Al₂O₃/SiO₂), três classes

são definidas. A primeira classe que é composta pelos maiores percentuais de SiO_2 onde a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 < 0,3$, na qual os principais componentes são o quartzo e o feldspato, por isso, atribui-se baixo teor de argilosos e de faixa granulométrica com maiores tamanho de partícula. Para a segunda classe a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ está entre $0,3 - 0,5$, composta principalmente por caulinita e ilita, além de uma pequena quantidade de quartzo, feldspato e calcita. Para a terceira classe ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 0,5$), a composição mineral é formada principalmente por caulinita com diâmetro fino (maior tendência em ser argiloso), por isso, possuem plasticidade e podem ser utilizadas como matéria-prima para fabricação de cerâmicas (LI; WANG, 2019). Analisando as camadas de carvão que originam as frações residuais, sabe-se que a camada Barro Branco é formada por leito de carvão betuminoso com alto teor de pirita, intercalados com siltitos e folhelhos carbonosos. Já a camada Bonito é formada por leitões de carvão separados por um leito de material estéril formado por siltitos, folhelhos e arenitos (KALKREUTH *et al.*, 2010a; SUFFART; CAYE; DEEMON, 1977).

Na Figura 4-2 são apresentados os teores de SiO_2 e Al_2O_3 e a razão entre estes nas frações residuais. Pode-se observar que a razão $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ possui variação entre 0,35 e 0,50.

Contudo, as frações residuais da camada Barro Branco possuem uma relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ que varia de $0,50 - 0,41$ e, por isso mesmo, se enquadram na segunda classe (caulinita e ilita) se aproximando da terceira classe possuindo assim uma tendência mais argilosa. As frações da camada Bonito ($0,38 - 0,35$) se enquadram também na segunda classe, mas, com uma aproximação para a primeira classe com tendência para ser um material arenoso (com mais sílica). Para as frações resultantes de rebeneficiamento de antigos depósitos de rejeitos, a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ é de $0,37 - 0,44$ se caracterizando como segunda classe (caulinita e ilita).

Figura 4-2 – Teor de óxidos de alumina e sílica e a razão Al_2O_3/SiO_2 das frações residuais.



Fonte: Autor (2021).

4.2.3 Determinação do teor de enxofre e análise elementar

O enxofre residual, após a análise de perda ao fogo, representado na forma (SO_3) estão presentes em todas as frações, isso se justifica, pelo fato de o carvão da região ser caracterizado como parálico (conexão com o mar) e por isso, possui percentuais mais elevados de enxofre devido à influência marinha e seus sulfatos. A sua presença se dá em menor quantidade na fração orgânica do carvão, já na fração inorgânica, se apresenta principalmente na forma do mineral pirita, sendo esta a maior ocorrência de enxofre em carvões. A pirita pode estar presente na forma de um mineral detrítico primário ou como autigênico (pirita secundária), resultante da redução do enxofre em águas marinhas (SIMÃO, 2016).

As frações residuais do beneficiamento do carvão ROM que apresentem conteúdo de $SO_3 > 6\%$, podem ter o enxofre recuperado através do processo de separação por gravidade (FAN; ZHANG; WANG, 2014). Assim, as frações residuais que se enquadram nesta situação são BO:Md(γ) ($SO_3 = 10,8\%$) e BO:Ji(γ)-2 ($SO_3 = 10,2\%$).

Os elementos mais comuns para o carvão da camada Bonito são Si, Fe, K, Al e S o que se confirma nas frações residuais desta camada (SIMÃO, 2016).

Para análise no enxofre presente nas frações residuais, é importante salientar que o enxofre no carvão aparece de 3 formas possíveis, na forma pirítica (mineral), sulfático e orgânica. O enxofre presente nas frações residuais (Tabela 4-3) refere-se ao enxofre pirítico (dissulfeto de ferro, Fe_2S), constatação obtida pelas análises de DRX, da forma mineral mais comum associado às jazidas de carvão do sul catarinense (INAP, 2009). O enxofre pirítico em contato com o O_2 e com H_2O origina o sulfato ferroso (FeSO_4) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4) produzindo a drenagem ácida de minas (DAM), que é um dos principais problemas ambientais da extração de carvão (WEILER; SCHNEIDER, 2019). O enxofre sulfático é encontrado em baixo percentual em rejeitos novos e é resultante da oxidação da pirita. Já o enxofre orgânico tem pouco efeito na formação da DAM e se encontra ligado quimicamente às moléculas de carvão (AMARAL, 2014; KALKREUTH *et al.*, 2010a).

A identificação dos tipos de enxofre, Tabela 4-4, foi realizada em 4 frações residuais (selecionadas para testes e estudos em aplicações), BB:Md(α), BB:Ci(α), BB:Fl(α) e BB:Bd(Δ), com resultados que mostram percentuais de enxofre pirítico presente nas amostras de 94%, 82%, 76% e 61%, respectivamente.

Tabela 4-4 – Determinação do teor de enxofre em frações residuais.

Determinação do teor de enxofre	Frações Residuais (%)			
	BB:Md(α)	BB:Ci(α)	BB:Fl(α)	BB:Bd(Δ)
Total	2,82	2,25	1,05	0,96
Pirítico	2,64	1,84	0,8	0,59
Sulfático	0,08	0,2	0,11	0,08
Orgânico	0,1	0,21	0,14	0,29

Fonte: Autor (2021).

Parte do enxofre presente nas frações residuais se encontra na forma de sulfato (SO_4) que é o enxofre mais difícil de ser removido nos processos de beneficiamento do carvão ROM por meios físicos (densidade ou lavagem), sendo este o enxofre orgânico ligado à estrutura do carvão (CALKINS, 1994).

A análise elementar de CHNS/O foi realizado também para algumas frações residuais, Tabela 4-5.

Tabela 4-5 – Análise elementar CHNS/O de algumas frações residuais.

Análise Elementar	Frações Residuais (%)			
	BO:Md(γ)	RE:Ji(β)-4	BB:Fl(α)	BB:Bd(Δ)
Umidade Higroscópica	2,24	2,65	1,42	1,97
Teor de Cinza	73,01	84,38	69,12	81,21
Enxofre Total	4,4	0,92	1,25	1,04
Carbono	16,74	5,03	21,84	8,49
Hidrogênio	1,51	1,61	2,03	1,82
Nitrogênio	0,57	0,44	0,7	0,5
Oxigênio	3,77	7,62	5,06	6,94

Fonte: Autor (2021).

Carbono, nitrogênio e hidrogênio estão presentes na matéria orgânica. O carbono tem origem dos carbonatos presente na matéria orgânica, o hidrogênio tem origem da água de constituição dos argilominerais e de hidratação do sulfato ferroso. O elevado percentual de cinzas (84,38 a 69,12%) dá-se pela origem das frações residuais analisadas no beneficiamento de concentrações de carvão a partir do ROM. Ainda em relação à análise elementar, como já comentado, pode-se observar que as frações BO:Md(γ) e BB:Fl(α), que possuem as menores massas específicas, 2,3 e 2,14 g/cm³, respectivamente, contém maior quantidade de carbono, nitrogênio e hidrogênio e podem ser aproveitadas em misturas com carvões de melhor qualidade ou outros resíduos industriais com potencial energético (BARBOSA *et al.*, 2009; HU *et al.*, 2006; MUTHURAMAN; NAMIOKA; YOSHIKAWA, 2010).

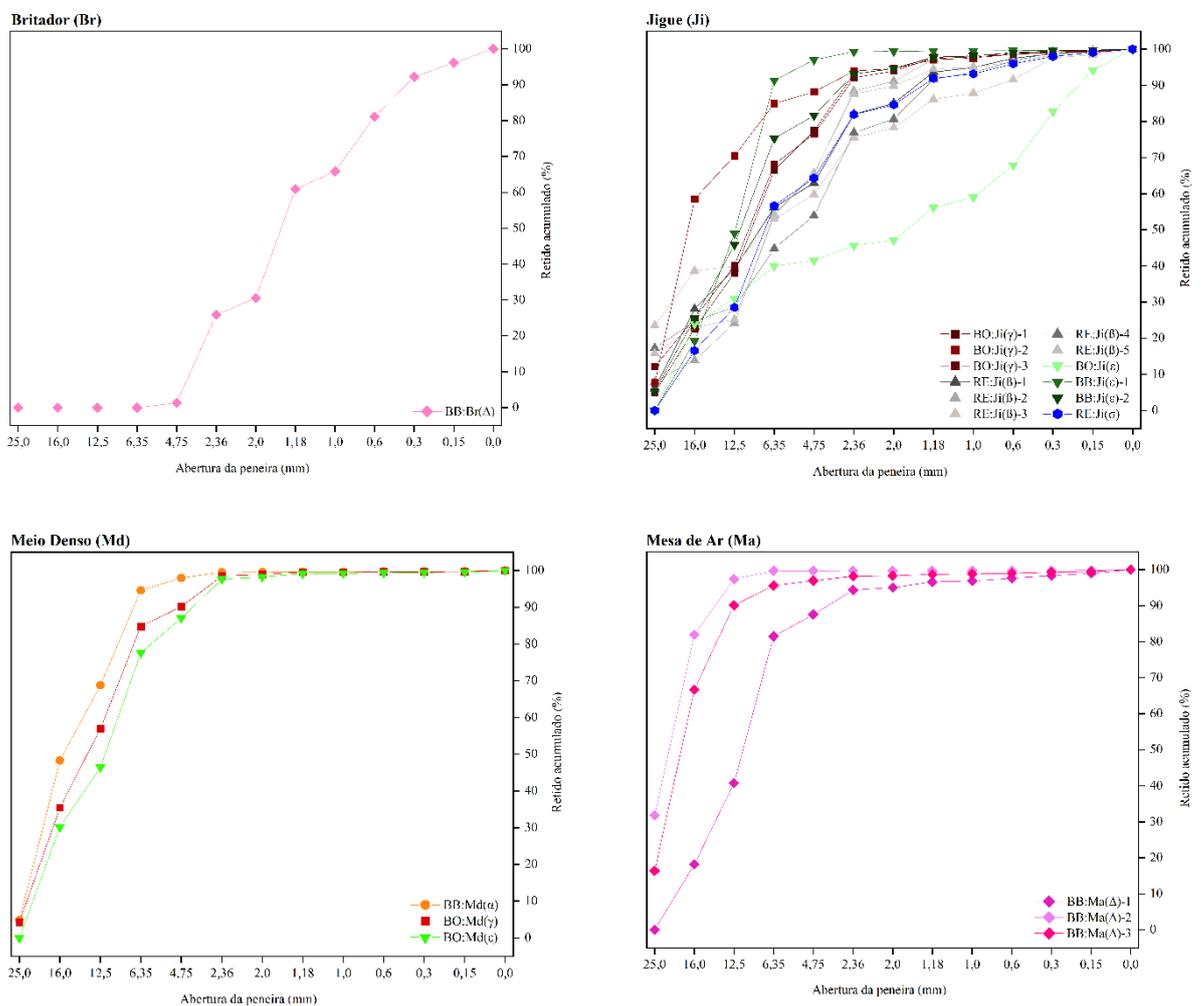
4.2.4 Análise Granulométrica

Como é de se esperar, o beneficiamento à qual o ROM é submetido está relacionado com o tamanho de partículas das frações residuais. Por este motivo, se faz uma análise a seguir da distribuição do tamanho de partículas, associado ao tipo de beneficiamento à qual o ROM foi submetido.

Inicia-se pelas frações residuais resultantes do beneficiamento realizado com as partículas consideradas grossas (entre 50,8 e 2,0 mm) (SAMPAIO; TAVARES, 2005). A Figura 4-3 apresenta a distribuição de tamanho de partículas das frações originadas por meio do britador, jigue, meio denso e mesa de ar.

Pode-se observar que cada empresa está sendo representada por cores que remetem a sua identificação (Tabela 3-1, pág. 60). Os tons de alaranjado se referem à empresa α , já a empresa β é representada por tons de cinza, tons de vermelho representam a empresa γ , tons de magenta a empresa Δ , a empresa ϵ é representada por tons de verde e por último a empresa σ é apresentada por azul.

Figura 4-3 – Distribuição granulométrica acumulada das frações residuais grossas resultantes do beneficiamento por britador, jigue, meio denso e mesa de ar.



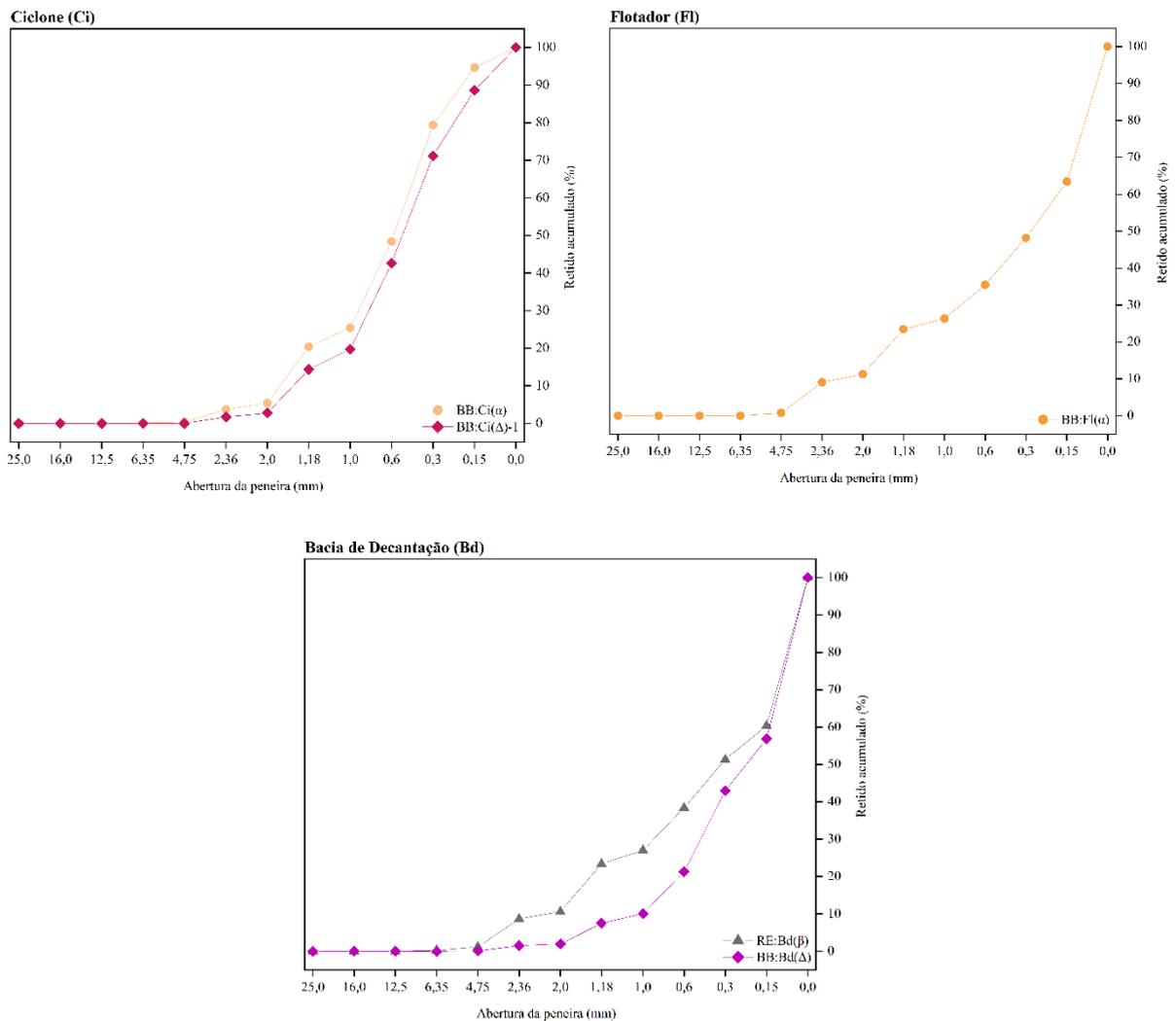
Fonte: Autor (2021).

As frações classificadas (SAMPAIO; TAVARES, 2005) como finos (2,0 a 0,5 mm) e ultrafinos (abaixo de 0,5 mm) do processo resultam da concentração do carvão por ciclone:

BB:Ci(α), BB:Ci(Δ)-1; Flotação: BB:Fl(α) e bacia de decantação: RE:Bd(β) e BB:Bd(Δ). A Figura 4-4 apresenta a distribuição granulométrica das frações consideradas finas.

Como já mencionado, essas frações finas são descartadas na forma de lama e apresentaram os maiores percentuais de umidade.

Figura 4-4 – Distribuição granulométrica acumulada das frações residuais resultantes do beneficiamento por ciclone, flotação e bacia de decantação.



Fonte: Autor (2021).

4.2.5 Análise Térmica

A caracterização térmica para as frações residuais é apresentada na sequência (Figuras 4-5 a 4-8). Os perfis térmicos obtidos foram agrupados por característica geológica das frações residuais:

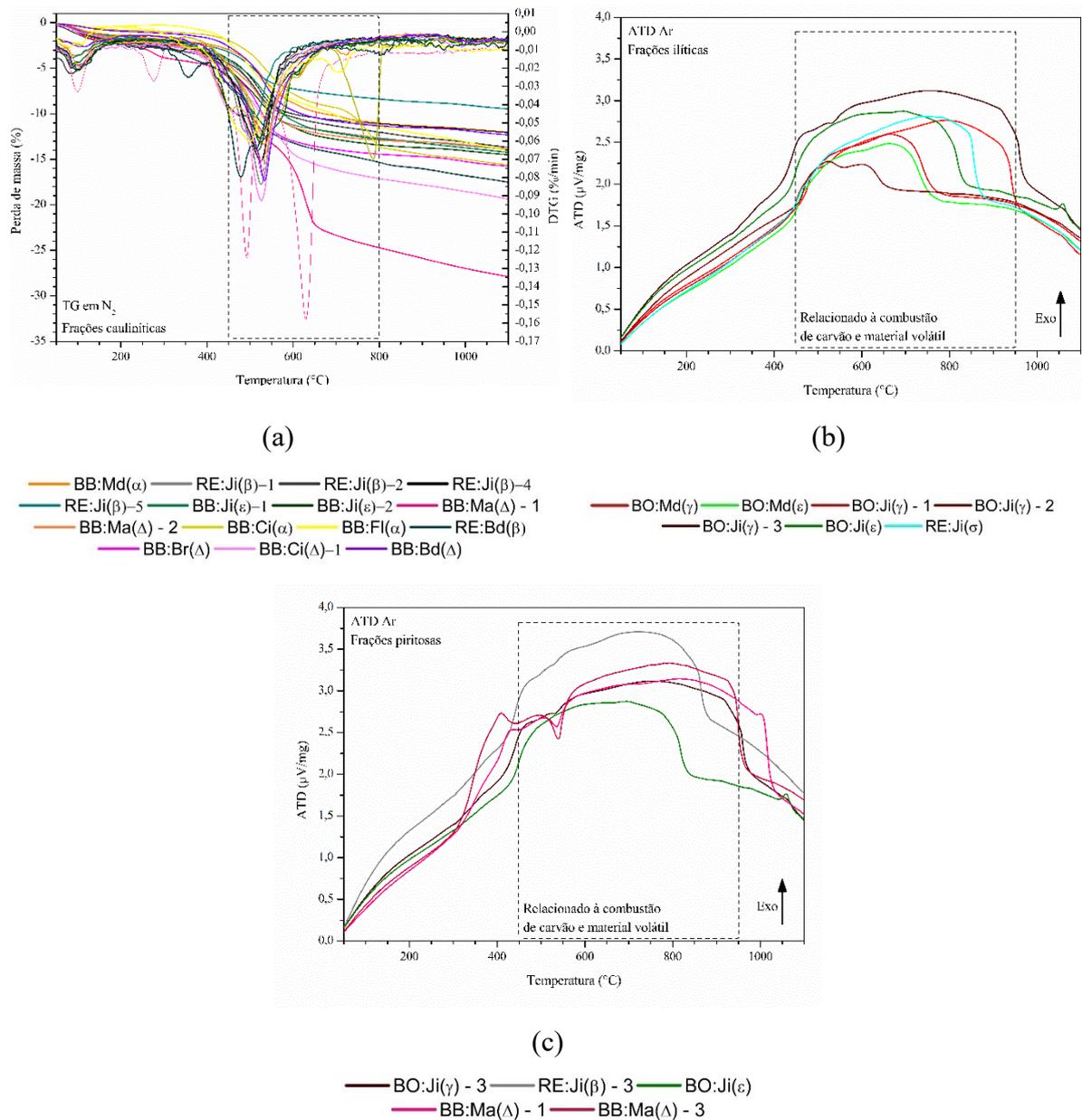
- Frações caulínicas: (BB:Md(α), BB:Ji(ϵ)-1, BB:Ji(ϵ)-2, BB:Ma(Δ)-1, BB:Ma(Δ)-2, BB:Ci(α), BB:Br(Δ), BB:Ci(Δ)-1, RE:Ji(β)-2, RE:Ji(β)-4, RE:Ji(β)-5, BB:Bd(Δ);
- Frações ilíticas: BO:Md(γ), BO:Md(ϵ), BO:Ji(γ)-1, BO:Ji(γ)-2, BO:Ji(γ)-3, BO:Ji(ϵ) e RE:Ji(σ);
- Frações piritosas: BO:Ji(γ)-3, RE:Ji(β)-3, BO:Ji(ϵ); BB:Ma(Δ)-1, BB:Ma(Δ)-3.

Nos gráficos são apresentados ainda as amostras obtidas a partir do rebeneficiamento de rejeito que foram inseridas nos termogramas.

Por consequência algumas amostras estão presentes em ambos os gráficos porque possuem picos pronunciados de argilas e também de material piritoso. Nos gráficos de análise térmica apresentados na sequência os eventos exotérmicos são representados para cima. Algumas amostras estão presentes em ambos os gráficos porque possuem picos pronunciados de argilas e também de material piritoso. Os eventos exotérmicos nos termogramas, estão representados para cima.

Apresenta-se primeiramente as análises termogravimétricas (TG) em atmosfera de nitrogênio seguido por TG em atmosfera de oxigênio e as análises térmicas diferenciais (ATD).

Figura 4-5 – Curvas de análise térmica TG e DTG das frações residuais classificadas como caulínicas, ílíticas e piritosas em atmosfera de nitrogênio com taxa de $20\text{ }^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ até à temperatura de $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

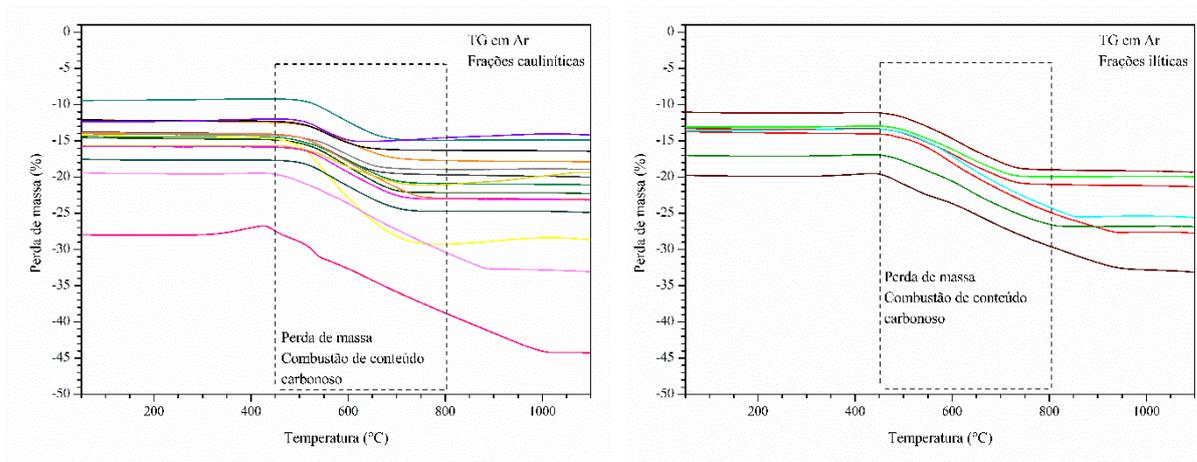


Fonte: Autor (2021).

De acordo com os gráficos de TG e DTG as frações caulínicas apresentam perda de massa entre as temperaturas 450 e $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (DE ALMEIDA AZZI *et al.*, 2016). As frações piritosas possuem como característica um pico de perda de massa por volta de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (PETERSON *et al.*, 2008).

Os termogramas obtidos em atmosfera de oxigênio apresentam o início da perda de massa a partir da perda de massa ocorrida anteriormente em atmosfera de nitrogênio, isso justifica a perda de massa no gráfico não iniciar no zero.

Figura 4-6 – Curvas de análise térmica (TG) das frações residuais classificadas como cauliniticas, ílíticas e piríticas em atmosfera de oxigênio com taxa de 20 °Cmin⁻¹ até a temperatura de 1100 °C.

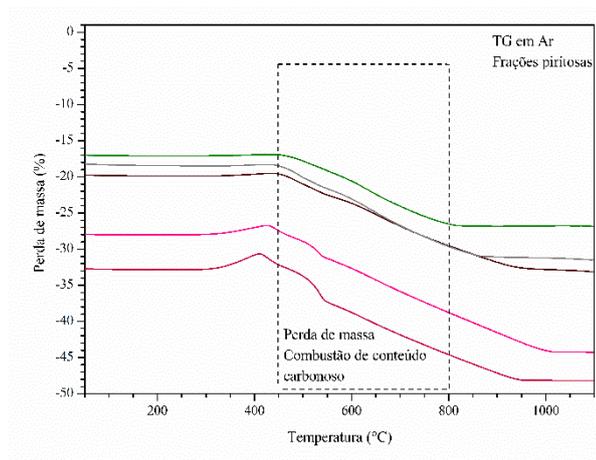


(a)

(b)

— BB:Md(α) — RE:Ji(β)-1 — RE:Ji(β)-2 — RE:Ji(β)-4
— RE:Ji(β)-5 — BB:Ji(ϵ)-1 — BB:Ji(ϵ)-2 — BB:Ma(Δ)-1
— BB:Ma(Δ)-2 — BB:Ci(α) — BB:Fi(α) — RE:Bd(β)
— BB:Br(Δ) — BB:Ci(Δ)-1 — BB:Bd(Δ)

— BO:Md(γ) — BO:Md(ϵ) — BO:Ji(γ)-1 — BO:Ji(γ)-2
— BO:Ji(γ)-3 — BO:Ji(ϵ) — RE:Ji(σ)



(c)

— BO:Ji(γ)-3 — RE:Ji(β)-3 — BO:Ji(ϵ)
— BB:Ma(Δ)-1 — BB:Ma(Δ)-3

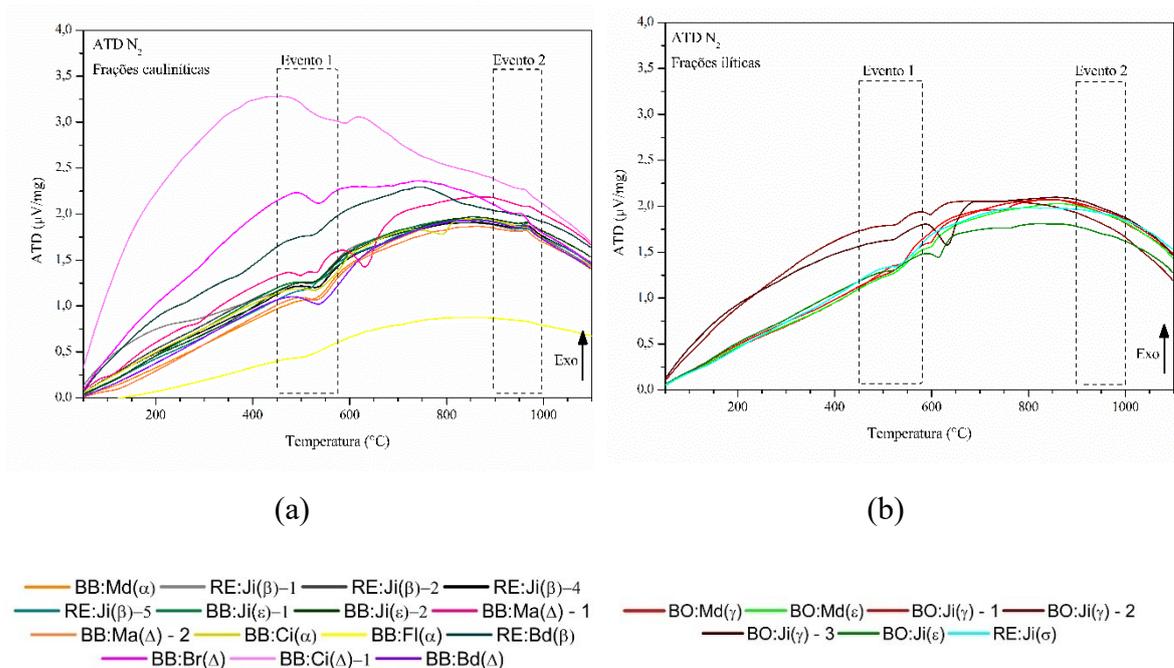
Fonte: Autor (2021).

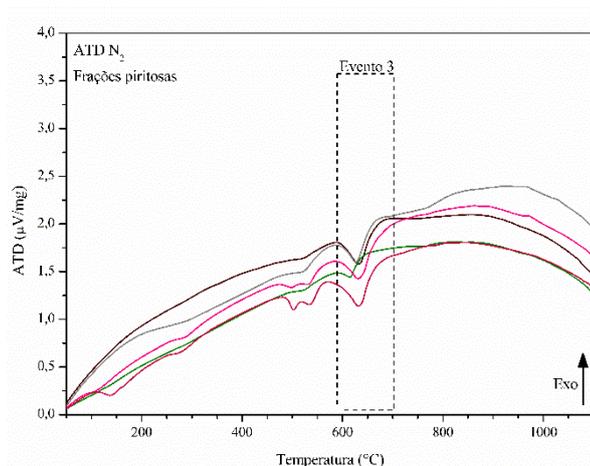
Segundo os perfis térmicos das frações caulíníticas, BB:Ma(Δ)-1 e BB:Ci(Δ)-1, em atmosfera inerte (N_2), Figura 4-5 (a), e em atmosfera oxidante (O_2), Figura 4-6 (a), apresentaram as maiores perdas de massa. Esta característica também foi verificada por análise química (rever Tabela 4-3, pág. 82) e de perda ao fogo destas frações. Essas pertencem à camada (Barro Branco), mesma empresa (Δ) e mesmo beneficiamento (mesa de ar), porém, a fração BB:Ma(Δ)-1, refere-se à subcamada Forro e a fração BB:Ma(Δ)-3, à subcamada Banco. Estas características associam estas subcamadas a maiores conteúdos de material carbonoso (KALKREUTH *et al.*, 2010b; ZHANG; LING, 2020). Para as demais frações caulíníticas, a perda de massa em atmosfera inerte ficou entre 10 e 20%. Já a perda de massa em atmosfera oxidante variou de 15 a 33%.

É possível verificar uma tendência de maior perda de massa para fração ílítica em atmosfera oxidante (Figura 4-6(b)) em comparação com a fração caulínítica.

Os perfis de análise térmica diferencial (ATD) das frações caulíníticas em atmosfera inerte (Figura 4-7 (a)), apresentam, devido à formação de metacaulinita, eventos endotérmicos (evento 1 do gráfico) entre 500 e 800°C (DE ALMEIDA AZZI *et al.*, 2016; NIETO; ABAD; AZAÑÓN, 2008; ZHANG; LING, 2020).

Figura 4-7 – Curvas de análise térmica (ATD) das frações residuais classificadas como caulíníticas, ílíticas e piríticas em atmosfera de nitrogênio com taxa de 20 °Cmin⁻¹ até a temperatura de 1100 °C.





(c)

— BO:Ji(γ) - 3 — RE:Ji(β) - 3 — BO:Ji(ϵ)
 — BB:Ma(λ) - 1 — BB:Ma(λ) - 3

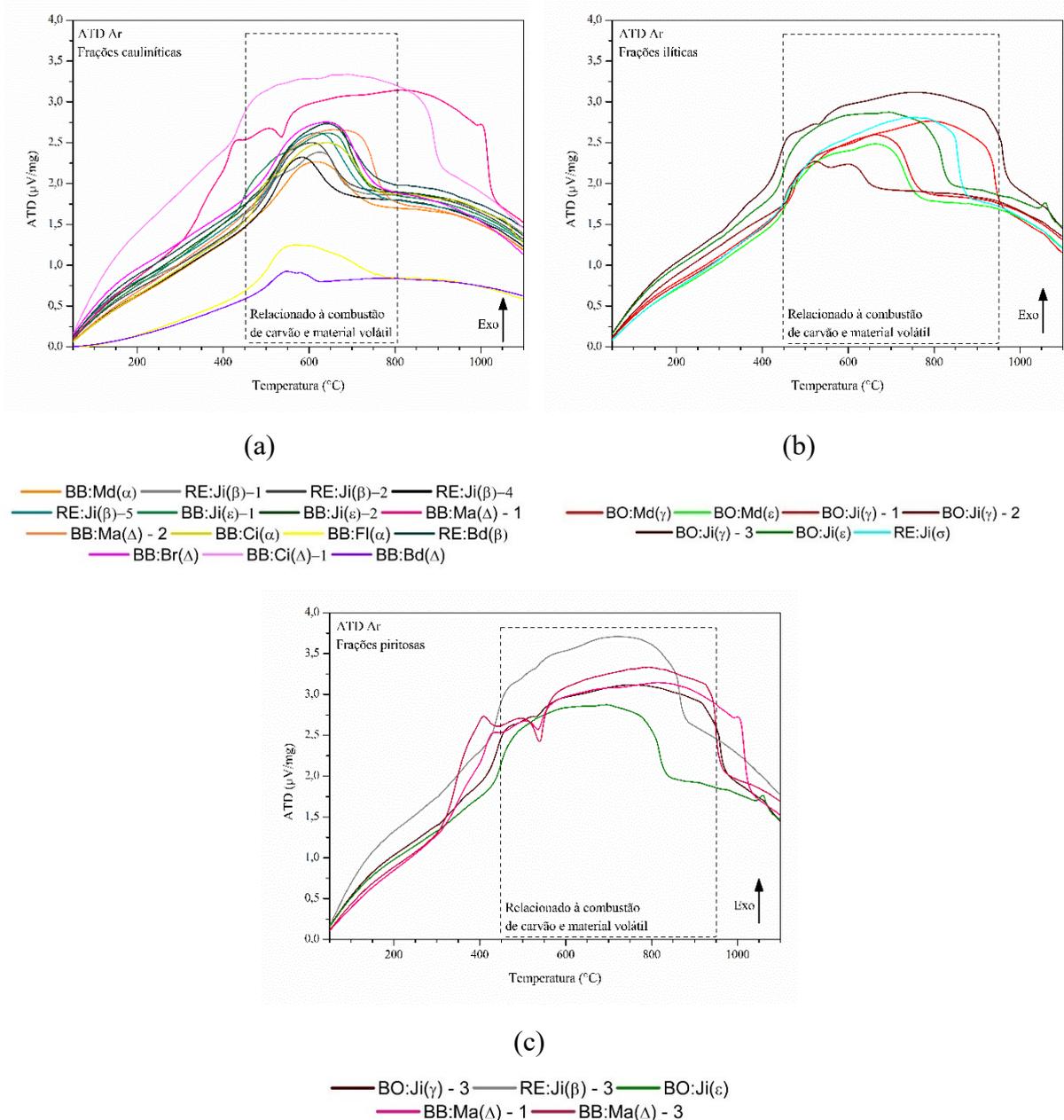
onte: Autor (2021).

Quando a temperatura aumenta, aproximadamente 965°C , verifica-se um evento exotérmico de formação da mulita (evento 2 do gráfico), que não está associado a perda de massa (BECKER *et al.*, 2017).

Os eventos identificados como 1 (formação da metacaulinita) e 2 (formação da mulita) são observados nas frações caulínicas (Figura 4-7(a)) provenientes da camada Barro Branco, mas pouco pronunciadas ou ausentes nas frações ílticas (Figura 4-7(b)) isso se deve, por conta da característica da formação geológica da camada de carvão por apresentar mais argilas do tipo íltica e menos argilas do tipo caulínica.

A reação endotérmica que aparece a partir de 600°C , indicada na Figura 4-7(c) como evento 3, acompanhada por uma perda de massa, pode ser relacionada com a decomposição da pirita (FeS_2) em pirrotita (FeS) e enxofre (S_2) (PETERSON *et al.*, 2008). Ressalta-se também que esta manifestação térmica não aparece em carvões com baixas concentrações ou ausência de pirita, podendo sim apresentar um deslocamento da temperatura para próximo de 550°C , Mukherjee e Srivastava (2006). Este pico endotérmico está presente em quase todas as frações, com presença mais acentuada nas frações classificadas como piritosas o que pode ser verificado na Figura 4-7 (c). Para a fração piritosa RE:Ji(β)-3, este pico endotérmico é acentuado. Esta fração é resultante do primeiro descarte do beneficiamento realizado por jigge de 3 três descartes densimétricos, comprovando a eficiência do equipamento utilizado para separar o material piritoso (mais denso) do concentrado de carvão (menos denso).

Figura 4-8 – Curvas de análise térmica (ATD) das frações residuais classificadas como cauliniticas, ílíticas e piríticas em atmosfera de oxigênio com taxa de $20\text{ }^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ até a temperatura de $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 4-8 (b), fração ílítica (camada Bonito) em atmosfera oxidante, é possível identificar eventos exotérmicos referentes a combustão do carvão entre aproximadamente 450 e 950°C e que está associado a perda de massa (NUNES; MARCÍLIO, 2015).

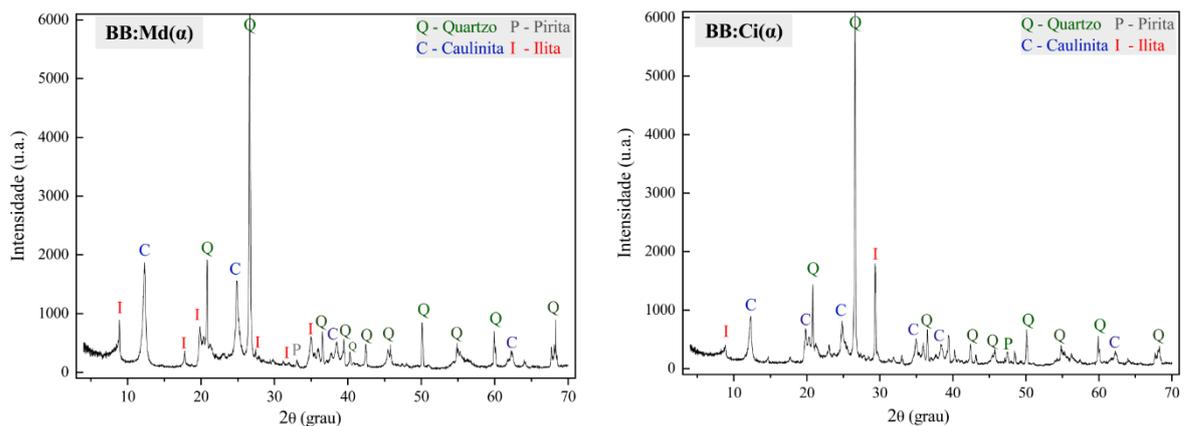
Duas tendências são observadas nos perfis térmicos em atmosfera oxidante, Figura 4-8, picos exotérmicos fechados perto de 600°C e picos exotérmicos alargados no intervalo

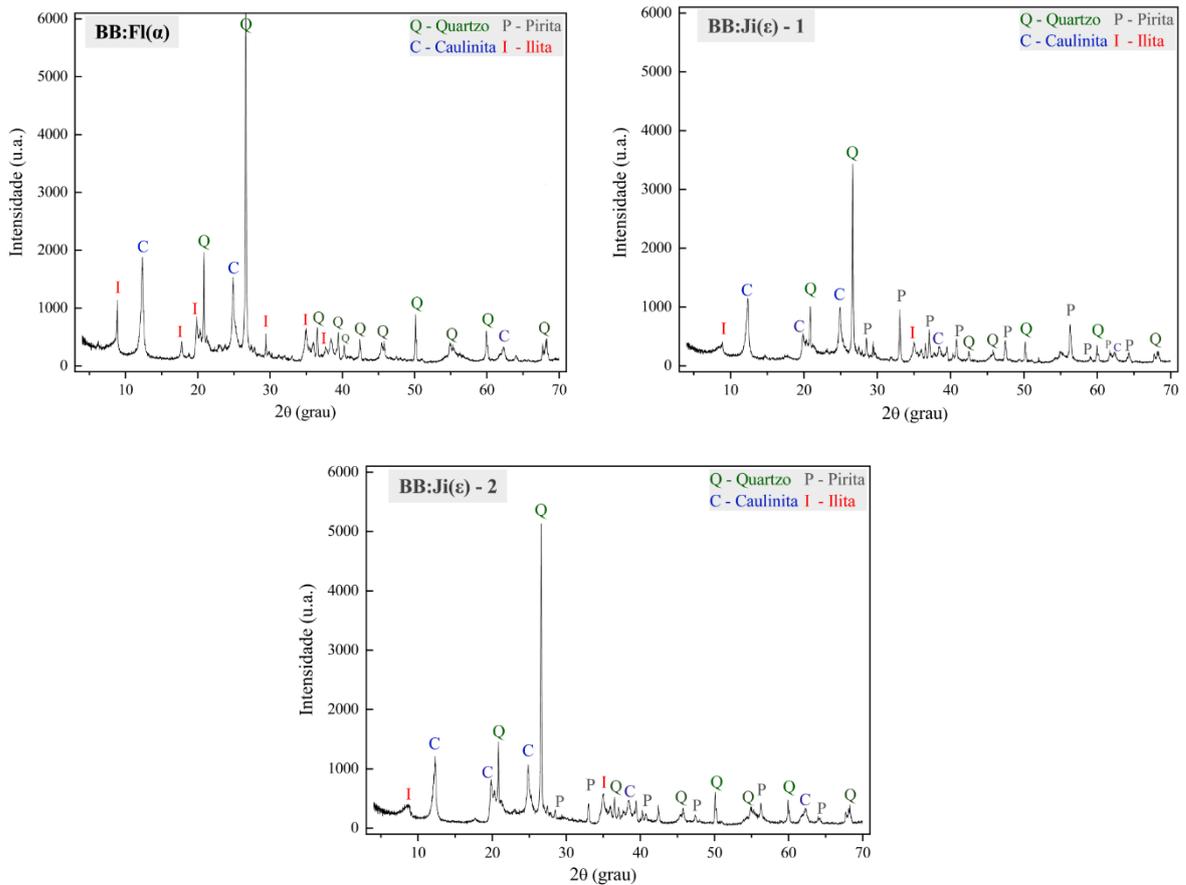
aproximado de 400 até 1000°C. Esses picos são referentes a mudança de energia devido a combustão de material carbonoso e volátil (ZHANG; LING, 2020) de forma mais concentrada na camada de carvão Barro Branco e de forma dispersa na camada de carvão Bonito sendo essa uma possível justificativa de acordo com as características geológicas de cada camada.

4.2.6 Análise Mineralógica

A caracterização do carvão se dá principalmente pela camada geológica de origem. Esta característica, torna-se muito mais relevante do que a região onde o material foi amostrado (KALKREUTH *et al.*, 2010b). Seguindo esta consideração, as fases mineralógicas são apresentadas nas Figuras 4-9, com as frações residuais resultantes da concentração do carvão da camada Barro Branco; Figura 4-10, com as aquelas resultantes da concentração do carvão da camada Barro Branco da empresa Δ que, por possuir lavra seletiva, apresenta características particulares; Figura 4-11, com as frações residuais provenientes da concentração do carvão da camada Bonito e por último, Figura 4-12, com as frações residuais da concentração do carvão do rebeneficiamento de antigos depósitos de rejeitos.

Figura 4-9 – Identificação das fases mineralógicas (DRX) das frações residuais resultantes do beneficiamento da camada Barro Branco: (BB:Md(α), BB:Ci(α), BB:Fl(α), BB:Ji(ϵ)-1 e BB:Ji(ϵ)-2).

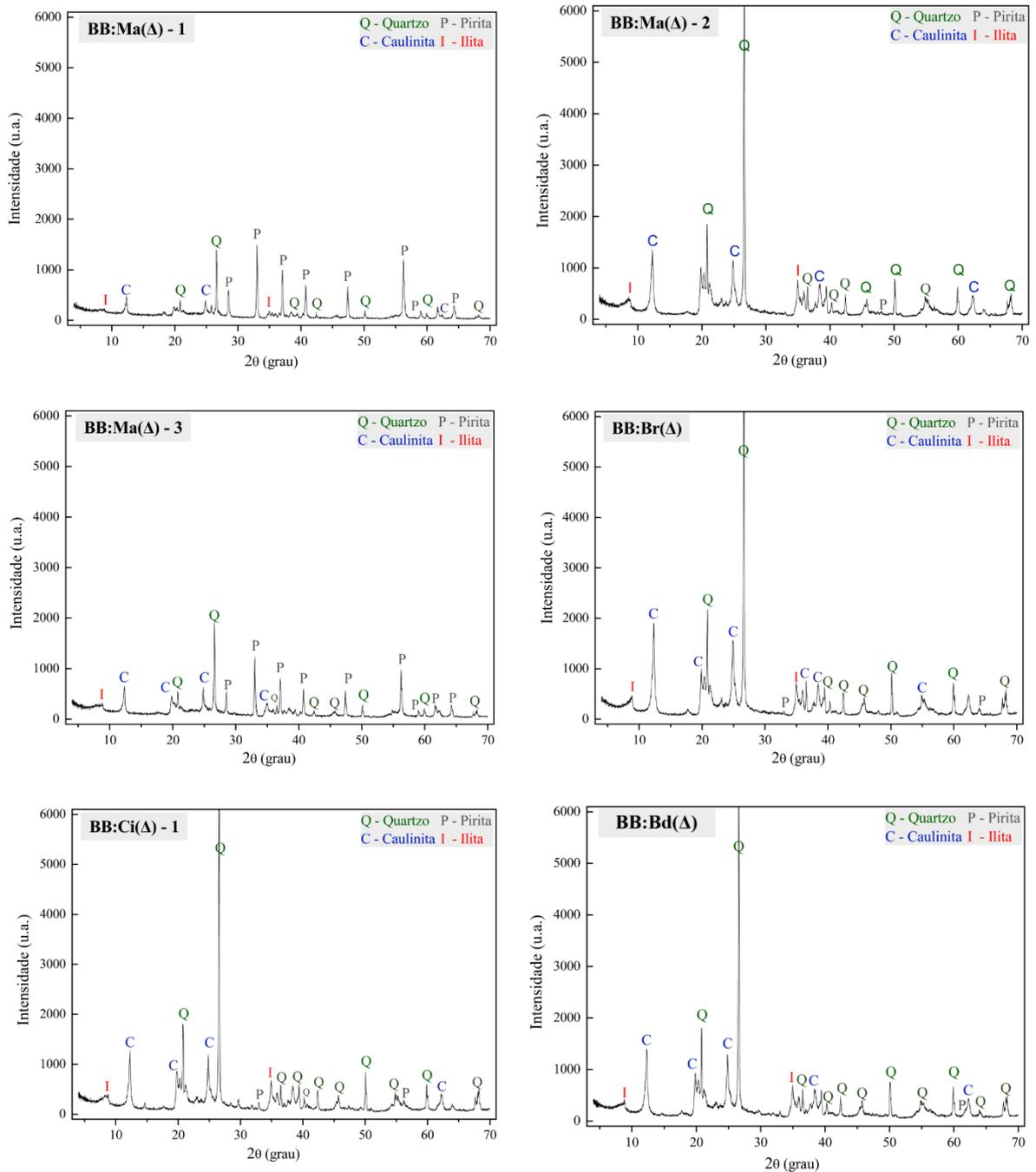




Fonte: Autor (2020).

Para a fração residual BB:Ji(ε)-1, caracteriza-se pela presença de pirita, o que pode ser justificado pelo beneficiamento. Essa fração é resultante do primeiro descarte realizado por jigue. Essa operação que separa o ROM em frações desimétricas, vai liberar no primeiro descarte a quantidade de material de maior densidade, caracterizando a maior presença de pirita. Outra fração da camada Barro Branco, que apresenta picos pronunciados de pirita, é a fração BB:Ji(ε)-2. Desta forma, pode-se associar esses resultados à maior presença de enxofre, principalmente de pirítico, nas camadas Barro Branco, em comparação a camada Bonito (KALKREUTH *et al.*, 2010b).

Figura 4-10 – DRX das frações residuais resultantes do beneficiamento da camada Barro Branco da empresa Δ : BB:Ma(Δ)-1, BB:Ma(Δ)-2, BB:Ma(Δ)-3, BB:Br(Δ), BB:Ci(Δ) e BB:Bd(Δ).

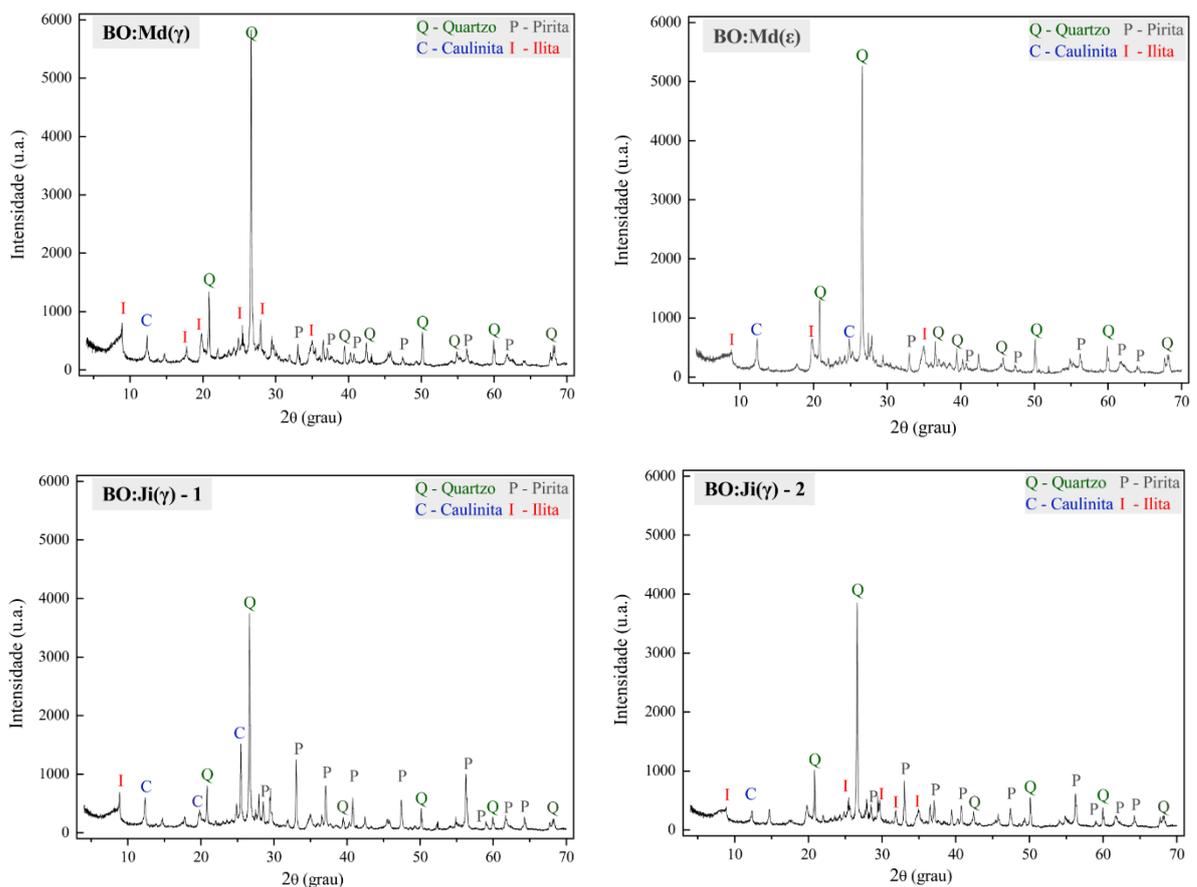


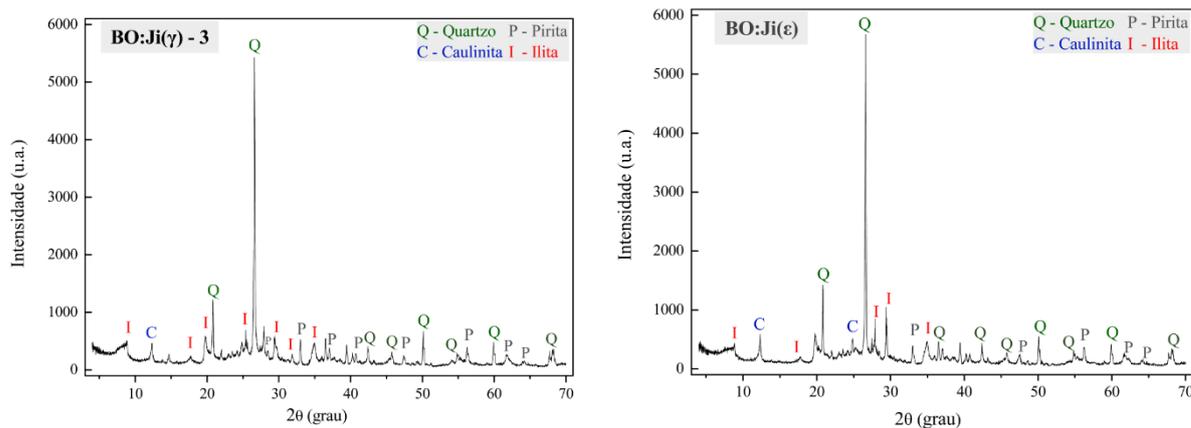
Fonte: Autor (2020).

As frações residuais BB:Ma(Δ)-1 e BB:Ma(Δ)-3 como já mencionado anteriormente, são extraídas em mineração a céu aberto, da camada Barro Branco, e beneficiadas a seco.

Ressalta-se que este tipo de lavra é denominado de seletiva, pois há uma caracterização visual do ROM que seleciona as camadas de interesse para a extração do carvão. Contudo, na caracterização mineralógica a fase pirita é identificada pela presença dos seus picos característicos. A qualificação pronunciada de pirita pode ser relacionada ao maior teor de carvão das subcamadas Forro e Banco da camada Barro Branco ao qual as frações BB:Ma(Δ)-1 e BB:Ma(Δ)-3, respectivamente pertencem (KALKREUTH *et al.*, 2010b). Da mesma forma, a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) pode ser associada a presença do mineral pirita, como os resultados de FRX de BB:Ma(Δ)-1 e BB:Ma(Δ)-3 com percentuais de 18,32 e 46,68%, respectivamente.

Figura 4-11 – DRX das frações residuais resultantes do beneficiamento da camada Bonito (BO:Md(γ), BO:Md(ϵ), BO:Ji(γ)-1, BO:Ji(γ)-2, BO:Ji(γ)-3 e BO:Ji(ϵ).





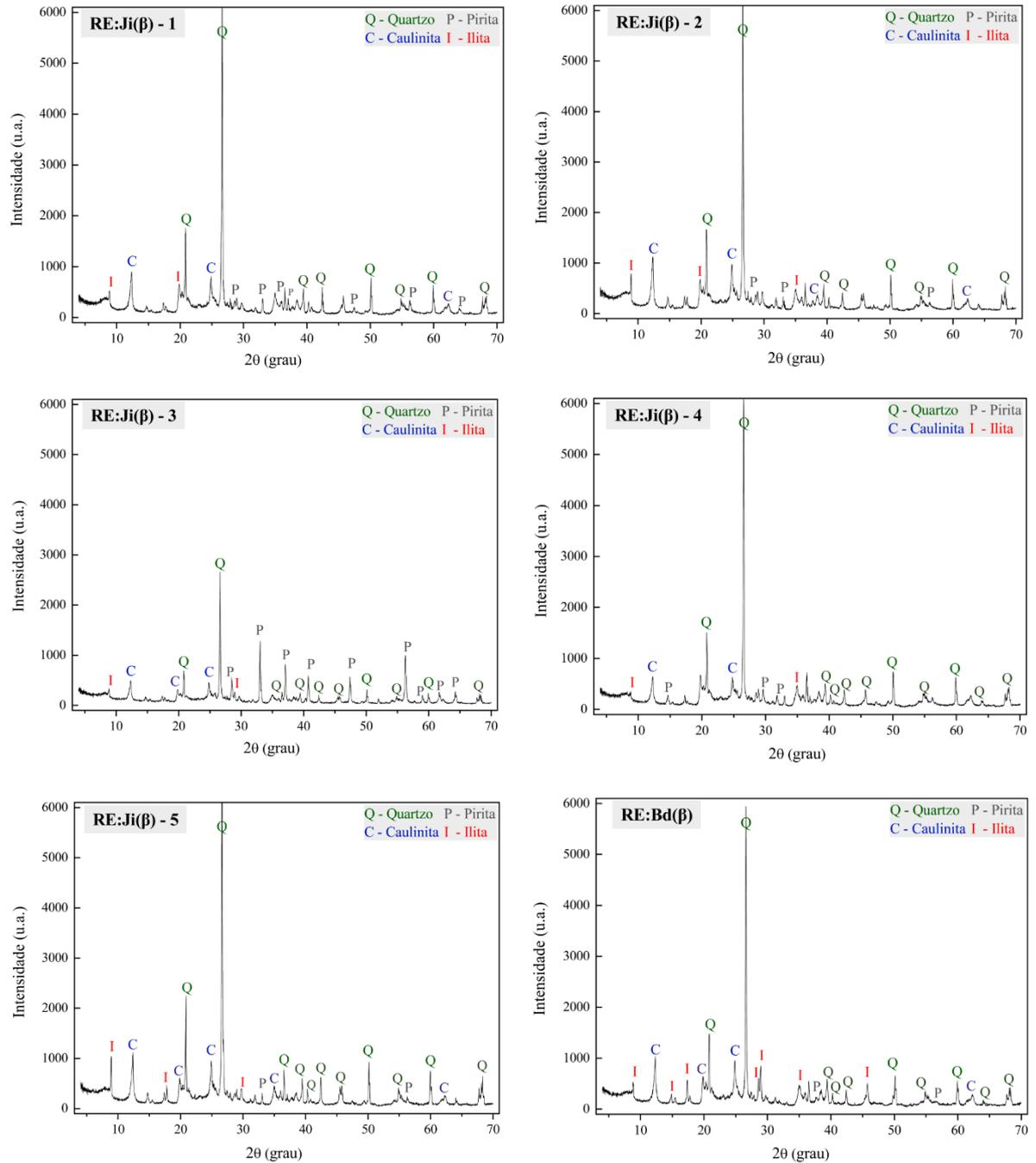
Fonte: Autor (2020).

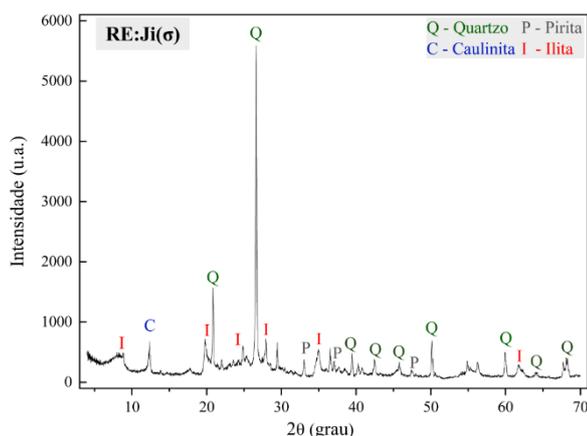
A composição química das frações residuais está de acordo com as análises térmicas e com as fases mineralógicas. A mineralogia é formada sobretudo pela presença de fases argilosas do grupo illita e caulinita. Todas as frações possuem a presença de quartzo. A presença de alumínio, identificado na forma de óxido pela análise química, está inserido na estrutura dos argilominerais, que geralmente se encontram na forma de caulinita (SANTOS, 1989; OLIVEIRA *et al.*, 2021; Kalkreuth *et al.*, (2010b).

A illita foi identificada na análise mineralógica e confirmada na análise térmica, sendo a sua presença mais constante nas frações resultantes do beneficiamento da camada Bonito. Característica de minerais pertencentes às rochas sedimentares ricas em óxido de silício e alumínio, geralmente hidratados, incluindo também quartzo, caulinita, feldspatos de potássio, mica, carbonatos e sulfetos (VO *et al.*, 2022).

As frações residuais BO:Ji(γ)-2, BO:Ji(γ)-1 resultantes do beneficiamento do carvão da camada Bonito apresentam picos pronunciados de pirita convergindo com a análise química onde os percentuais de Fe₂O₃ são, respectivamente, 12,61 e 18,73%.

Figura 4-12 – DRX das frações residuais do beneficiamento de antigos depósitos de rejeitos: RE:Ji(β)-1, RE:Ji(β)- 2, RE:Ji(β)- 3 RE:Ji(β)-4, RE:Ji(β)-5, RE:Bd(β), RE:Ji(σ).





Fonte: Autor (2020).

A fração RE:Ji(β)-3 possui também picos pronunciados de pirita na análise mineralógica que também podem estar associado ao elevado percentual de óxido de ferro (16,85%), conforme análise química (ver Tabela 4-3, pág. 82). As frações que rebeneficiam antigos depósitos de rejeitos, Figura 4-12, possuem características química, térmica e também mineralógicas que indicam serem originários da camada Barro Branco. Estas caracterizações mineralógicas são confirmadas com a análise térmica (evento 3), sendo este observado na maioria das frações.

RE:Ji(σ) é a única fração residual resultante do beneficiamento de antigos depósitos de rejeitos da empresa σ , e sua análise mineralógica apresenta picos dos minerais comuns aos rejeitos de carvão da região sul catarinense depositados em aterros. Contudo, percebe-se a importância destes materiais (frações residuais, passíveis de valorização) serem caracterizadas antes do descarte e direcionadas de forma seletiva para as diferentes aplicações.

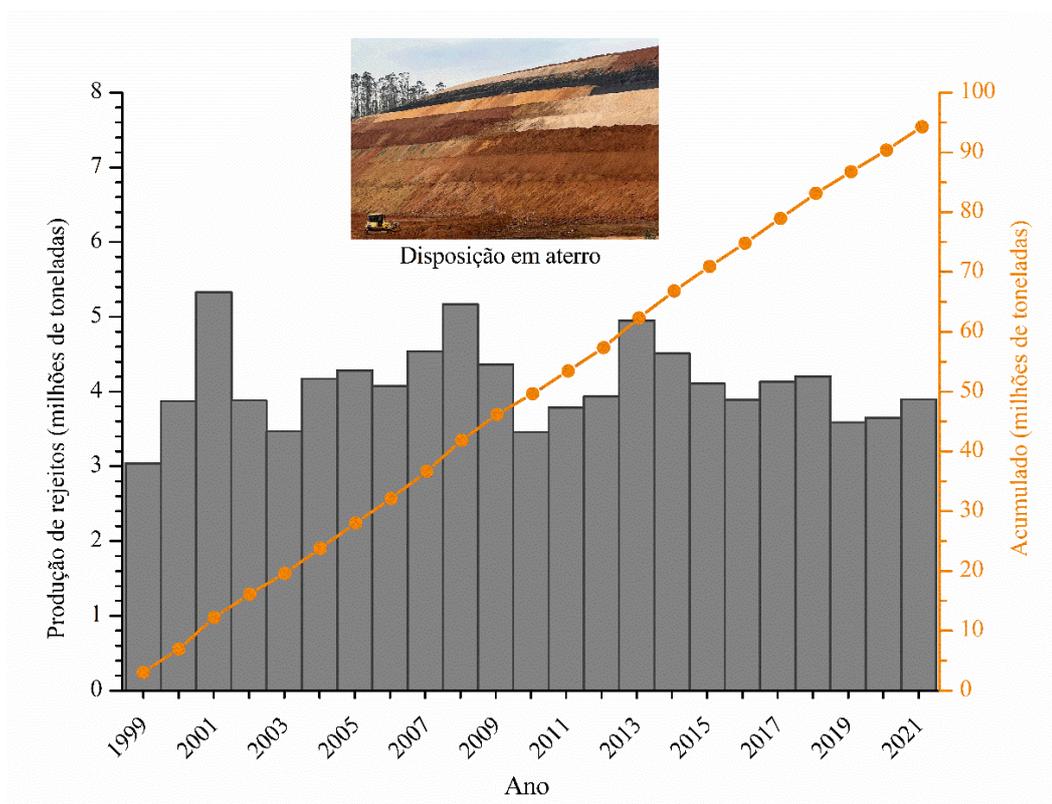
4.3 QUANTIDADE E VIABILIDADE

No Brasil, desde 1925, já foram extraídos e beneficiados quantidades próximas a 550 milhões de toneladas de ROM e, com esse dado, estima-se uma geração de rejeitos de aproximadamente 320 milhões de toneladas (SIECESC, 2020).

Em Santa Catarina, no ano de 2020, foram extraídos 5,6 milhões de toneladas de ROM e obtidos com o beneficiamento 2,1 milhões de toneladas de carvão e gerados 3,5 milhões de toneladas de rejeito. Esses valores indicam que 63% do ROM atualmente tem como destino final a disposição em aterros industriais, controlados como um material sem valor comercial.

Ainda com os dados estatísticos do SIECESC, a Figura 4-13 apresenta a produção de rejeito resultante da concentração do carvão em Santa Catarina, a partir do ano de 1999 até 2021, bem como a quantidade acumulada com o passar dos anos (SIECESC, 2020).

Figura 4-13 – Geração de rejeito em Santa Catarina em milhões de toneladas por ano versus quantidade acumulada.



Fonte: Autor (2022).

Os dados estatísticos do SIECESC (2020) também indicam que a extração de ROM no Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul entre 2010 e 2015 foi de aproximadamente 76 milhões de toneladas. Do total do ROM extraído 65% torna-se rejeito, correspondendo a 49,4 milhões de toneladas de rejeitos gerados e acumulados pela mineração de carvão no período (KALKREUTH *et al.*, 2010b).

Na Figura 4-14 pode-se perceber a grande quantidade de depósitos de rejeitos inativos (vermelho) e 8 depósitos ativos (verde), pertencente a BCC.

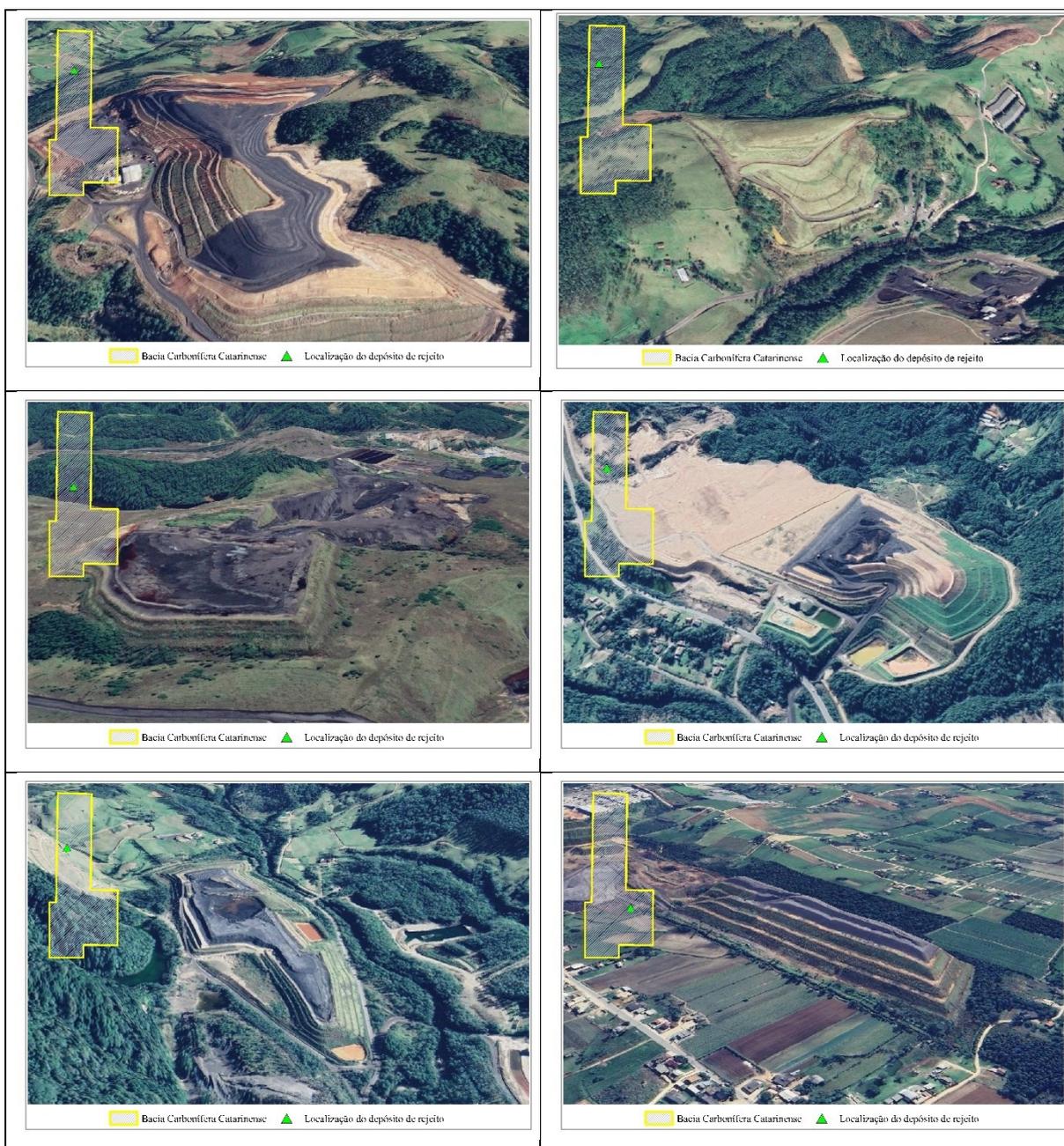
A área ocupada por rejeitos ativos são de aproximadamente 360 hectares e a área ocupada por rejeitos inativos de 1760 hectares (SIECESC, 2022). Com os dados obtidos das áreas ocupadas pelos depósitos de rejeitos e através da altura estimada de imagens aéreas disponíveis no google Earth (2022), este estudo realizou uma estimativa do volume de rejeitos em depósitos ativos da região de aproximadamente 58 bilhões m³.

Informações do setor mineiro da região, indicam que aproximadamente 65% do ROM extraído é depositado em aterro como rejeito, com custo mensal de transporte e espalhamento (deposição) de 210 mil reais, tendo ainda que ser somado o monitoramento mensal do depósito (incluindo técnicos e recuperação) de mais 50 mil reais, o que acaba por totalizar um custo mensal de cerca de 260 mil reais. Contudo, existe um grande interesse das mineradoras em transformar esse rejeito em materiais que possam ser classificados como resíduo e, conseqüentemente, valorizados a partir de ações estratégicas para combater os principais problemas relacionados, como: área física para deposição do rejeito, transporte/movimentação do rejeito, trabalhos de contenção e isolamento ou impermeabilização, maquinário para o devido espalhamento do rejeito, geração e tratamento da DAM. Ressalta-se também que todos estes custos/problemas dependem da taxa de aproveitamento (recuperação) do minério após o beneficiamento, o que é uma função intrínseca da qualidade do minério e das especificações do produto.

A localização dos depósitos ativos deve ser perto da extração do ROM para facilitar o transporte e diminuir custos de deposição. Novamente através da ferramenta google Earth os 8 depósitos de rejeitos ativos foram mapeados e apresentados nas imagens das Figuras 4-15.

Figura 4-15 –Depósitos de rejeitos ativos conforme sua localização na BCC.





Fonte: Autor (2022).

Estima-se que os depósitos de rejeitos como estes apresentados na Figuras 4-15, considerando o atual modelo de gestão dos resíduos sólidos industriais (neste caso, rejeitos de carvão), devem levar 660 anos para cessar a geração de acidez (AMARAL, 2014). De acordo com Amaral (2014), aproximadamente 60% da massa total do rejeito depositado pelas mineradoras corresponde à fração argilosa.

A partir destas quantidades geradas, os rejeitos podem ser divididos em frações em ordem decrescente quanto à quantidade em: argilosa, pirítica e carbonosa. A fração de maior

percentual (argilosa) é composta de siltitos, folhelhos e arenitos e está relacionado com a sua formação geológica e temperatura, possuindo minerais do grupo dos silicatos (quartzos, feldspatos e micas) e argilas (AGUIAR *et al.*, 2008).

A Tabela 4-6 apresenta a quantidade de fração residual resultante de cada etapa do beneficiamento das minerações, das informações coletadas nas diferentes empresas mineradoras visitadas e através dos balanços de massa fornecidos.

Tabela 4-6 – Quantidades das frações residuais geradas por mês, separadas por camadas e rebeneficiamento de antigos depósitos de rejeitos.

Camada	Codificação		Geração: mil toneladas/mês
Barro Branco	BB:Md(α)	●	23
	BB:Ci(α)	●	6
	BB:Fl(α)	●	6
	BB:Ji(ϵ)-1	●	19
	BB:Ji(ϵ)-2	●	13
	BB:Ma(Δ)-1	●	11
	BB:Ma(Δ)-2	●	
	BB:Ma(Δ)-3	●	
	BB:Br(Δ)	●	5
	BB:Ci(Δ)-1	●	3
	BB:Bd(Δ)	●	
	Bonito	BO:Md(γ)	●
BO:Ji(γ)-1		●	10
BO:Ji(γ)-2		●	5,5
BO:Ji(γ)-3		●	Nd
BO:Ji(ϵ)		●	8
BO:Md(ϵ)		●	42
Rejeito	RE:Ji(β)-1	●	50
	RE:Ji(β)-2	●	
	RE:Ji(β)-3	●	
	RE:Ji(β)-4	●	
	RE:Ji(β)-5	●	
	RE:Ji(β)	●	
RE:Ji(σ)	●	78	
Total			309

nd: não mensurado

Fonte: Autor (2021).

Pode-se observar que a quantidade de rejeito gerado para camada Barro Branco, a camada mais explorada no momento da coleta, foi de 86 mil toneladas por mês, o beneficiamento da camada Bonito foi de 144,5 mil toneladas/mês e o rebeneficiamento de antigos depósitos de rejeitos, contendo apenas 10% de carvão, foi de 128 mil toneladas por mês, todos para o ano de 2020.

A camada Barro Branco fornece um melhor rendimento no beneficiamento quando comparada a camada Bonito, pois é uma bacia mais extensa e com espessura homogênea (1,6 a 2 m). A camada Bonito possui finas lâminas de matéria orgânica e outras lâminas de matéria inorgânica de menor rendimento no beneficiamento o que sugere uma diminuição na granulometria para aumentar a concentração de carvão (KALKREUTH *et al.*, 2006).

Separando essas quantidades por finos e grossos, em termos de tamanho de partículas, descartando o rebeneficiamento de antigos depósitos de rejeitos, observa-se que a geração de frações finas tem uma estimativa de no mínimo 15 mil toneladas/mês, valor inferior ao indicado por outros trabalhos, que apresentam 20% dos rejeito na forma de finos e ultrafinos (AMARAL, 2014).

Analisando por empresa, a mineração α extrai 50 mil toneladas por mês de ROM da camada Barro Branco, gerando 23 mil toneladas no beneficiamento por meio denso e 6 mil toneladas em cada beneficiamento de finos (ciclone e flotação). O total de 35 mil toneladas de rejeitos destinadas a aterros, corresponde a 70% do ROM extraído. Somando-se todas as unidades da mineradora α , a geração alcança o montante de 70 mil toneladas/mês.

A mineração β , a qual rebeneficia antigos depósitos de rejeitos através de beneficiamento por jigues, consegue concentrar 10% de carvão e, com isso, gera aproximadamente 78 mil toneladas/mês de rejeitos que voltam aos aterros.

De todos os valores conhecidos, a mineradora γ , que explora a camada Bonito, gera um total de 45 mil toneladas/mês, das quais, só no meio denso, são descartados 29,5 mil t/mês.

Na mineradora ϵ , o beneficiamento do ROM extraído da camada Barro Branco resulta em 32 mil t/mês e da camada Bonito em 50 mil t/mês.

A mineradora Δ , a única que extrai a céu aberto a camada Barro Branco, gera 16 mil t/mês por meio de beneficiamento a seco e mais 3 mil t/mês por ciclone e bacia de decantação, somando 19 mil t/mês de rejeitos depositados em aterros.

Por último a mineração σ , que no momento da coleta trabalhava no rebeneficiamento de antigos depósitos, com a geração de 78 mil t/mês.

Os dados levantados demonstram que a região de estudo possui diversos resíduos da mineração depositados em antigos aterros e com uma grande geração ainda ativa destes materiais. Assim, torna-se importante estabelecer caminhos sistêmicos para encontrar aplicações (ver 4.4, Aplicações) com viabilidade de execução após as constatações técnicas dos produtos e processos avaliados. Vários trabalhos (ACORDI, 2022; ADDOU *et al.*, 2017; BIAN *et al.*, 2009; HAIBIN; ZHENLING, 2010; KINUTHIA; SNELSON; GAILIUS, 2009; PASHKEVICH, 2017; TAHA *et al.*, 2017; VIGIL DE LA VILLA *et al.*, 2014; WEILER; FILHO; SCHNEIDER, 2014) já desenvolvidos ressaltam a importância da valorização de resíduos, sobre a ótica das suas características potenciais, para que estes sejam utilizados como recursos minerais secundários, pois só assim, haverá equilíbrio na cadeia produtiva e a economia circular estará de fato sendo aplicada.

4.4 APLICAÇÕES

O Quadro 4-1 mostra as associações para possíveis aplicações das frações residuais descartadas do beneficiamento do ROM das mineradoras da região sul de Santa Catarina. Essas associações estão diretamente relacionadas com a geologia (camadas de carvão) e com os processos de beneficiamento do ROM.

Na região, as camadas de carvão exploradas comercialmente são as camadas Barro Branco e Bonito, que apresentam características geológicas de origem. A depender do beneficiamento (tipo de equipamento, quantidade de etapas e tecnologia empregada) as frações residuais descartadas terão granulometrias características. Por exemplo, frações residuais finas geralmente são formadas por siltes e argilas. A primeira fração residual descartada em jig, apresenta conteúdo de pirita superior a outros descartes feitos na sequência do beneficiamento. Para cada tipo de beneficiamento é exigida uma granulometria específica, para recuperação do maior percentual de carvão.

De acordo com caráter geológico fornecido pela natureza e o caráter fornecido pelo beneficiamento formaram-se 6 grupos a partir da associação de possíveis aplicações, para as diferentes frações residuais.

O grupo 1 formado pela fração BB:Fl(α) apresentou massa específica (RUIZ, 2009) e perda ao fogo que podem ser associados a presença de maior conteúdo carbonoso. Foi possível aferir que uma fração residual oriunda da camada Barro Branco, com massa específica

conforme indicada no Quadro 4-1 e descartada no processo de flotação pode ser destinada para o beneficiamento e concentração de carbono. Sugerindo a possibilidade de uso das frações do grupo 1 para aplicação como fonte energética, mesmo que associado (blend) com carvão beneficiado de maior poder calorífico. Sendo essa, uma forma de aproveitar o resíduo, separar o enxofre e a carbono presente nos materiais.

A fração residual BO:Md(γ), forma o grupo 2 com características geológicas que indicam pertencer a camada Bonito (argila ílítica) e, por isso, para uma melhor concentração do carvão, o ROM de origem precisa utilizar a operação de meio denso. Este grupo possui pouca pirita em sua constituição, caracterizando baixas massas específicas, granulometria grossa e pH neutro. Destacando-se, assim, potencial para concentração de argilominerais destinados à utilização em cerâmicas e argamassas.

Também com destinação para concentração dos argilominerais presente nas frações de origem da camada Barro Branco, o grupo 3 ficou dividido em 3A, com as frações resultantes do beneficiamento por jigue ou meio denso, e 3B, com frações resultantes dos beneficiamentos de ciclone e bacia de decantação. O subgrupo 3A e 3B se diferem pelo beneficiamento, resultando em frações granulométricas consideradas grossas para o grupo 3A e finas para o grupo 3B. Sugere-se, a partir da concentração dos argilominerais, aplicações destes subgrupos em fertilizantes, tecnosolos, pozolanas e geopolímeros. As frações residuais associadas ao 3A foram: BB:Ji(ϵ)-1, BB:Ji(ϵ)-1, BB:Md(α) e para o grupo 3B: BB:Br(Δ), BB:Bd(Δ) e BB:Ci(α). A fração BB:Br(Δ) resultante da lavra seletiva é a única que possui o beneficiamento por britador, mas, como suas demais características se enquadram neste grupo, permitiu tal associação.

O grupo 4, possui características geológicas que o associa a frações ílíticas (com maior incidência para camada Bonito) e às frações piríticas, devido ao emprego de processos densimétricos de beneficiamento para concentração do carvão. Esta associação de características, sugeriu a divisão em subgrupo 4A com massa específica média de 2,61 a 2,65 g/cm³, resultante no beneficiamento por jigue ou meio denso e, subgrupo 4B, resultante do beneficiamento por jigue com massa específica entre 2,73 e 2,85 g/cm³. As frações residuais associadas ao 4A são: BO:Ji(γ)-1, BO:Ji(ϵ) e BO:Md(ϵ) e ao 4B são: BO:Ji(γ)-2, BO:Ji(γ)-3 e RE:Ji(β)-3. As características destes materiais, sugerem a destinação destas frações para a concentração da pirita e aplicações a partir de processos de ustulação (transformação por temperatura), no desenvolvimento de células fotovoltaicas e fertilizantes sulfatados.

Quadro 4-1 – Associação das diferentes frações residuais coletadas por grupos de características a partir da geologia e do processamento para a análise de aplicabilidade.

	GEOLOGIA		BENEFICIAMENTO		GEOLOGIA		BENEFICIAMENTO		APLICAÇÃO	
GRUPO 1	BARRO BRANCO	FINO (FLOTAÇÃO)	-2,14 g/cm ³	CAULÍNÍTICO	CARBONOSO	→	CONCENTRAÇÃO DE CARBONO	REBENEFICIAMENTO		
GRUPO 2	BONITO	GROSSO (MEIO DENSO)	-2,3 g/cm ³	ILÍTICO	MINERAL	→	CONCENTRAÇÃO DE ARGILOMINERIAS	CERÂMICA	ARGAMASSA	
GRUPO 3A	BARRO BRANCO	GROSSO (JIGUE / MEIO DENSO)	-2,38 - 2,54 g/cm ³	CAULÍNÍTICO	MINERAL	→	CONCENTRAÇÃO DE ARGILOMINERAIS	FERTILIZANTE	TECNOSSOLO	
GRUPO 3B	BARRO BRANCO	FINO (BACIA DE DECANTAÇÃO E CICLONE)	-2,36 - 2,53 g/cm ³					POZOLANA	GEOPOLÍMERO	
GRUPO 4A	BONITO	GROSSO (JIGUE / MEIO DENSO)	-2,61 - 2,65 g/cm ³	ILÍTICO	PIRÍTICO	→	CONCENTRAÇÃO DA PIRITA	USTULAÇÃO	CÉLULA FOTOVOLTAICA	
GRUPO 4B	BONITO	GROSSO (JIGUE)	-2,73 - 2,85 g/cm ³					FERTILIZANTE SULFATADO		

Fonte: Autor (2022).

Após avaliar os critérios de classificação, potencialidade, quantidade e viabilidade de valorização, algumas possíveis aplicações foram definidas para que o grupo de pesquisa pudesse avaliar experimentalmente e demonstrar de fato a viabilidade técnica das diferentes aplicações. Neste sentido, seis (6) diferentes aplicações (Quadro 4-2) foram desenvolvidas no grupo de pesquisa VALORA – Valorização de resíduos como estratégia para o desenvolvimento da economia circular, da UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense.

O Quadro 4-2 identifica os principais temas relacionados com esta tese e que foram realizados ou estão em andamento por alunos e pesquisadores do grupo. Os tópicos subsequentes resumem os principais objetivos de cada tema e os resultados obtidos.

Quadro 4-2 – Principais linhas de pesquisa oriundas desta tese e pesquisadores envolvidos.

Temática de pesquisa	Pesquisadores envolvidos	Resíduos Estudados	Referência
Uso em argamassas cimentícias	VIEIRA, M.K ACORDI, J. SIMÃO, L. ZOCHE, J.J. GRYCZAK, M. RAUPP-PEREIRA, F.	BB:Md(α) BO:Md(γ) BO:Md(ε)	(VIEIRA <i>et al.</i> , 2022)
Uso como fertilizantes organominerais	OLIVO, E. F. EBS, M. SIMÃO, L. ZOCHE, J. J. RAUPP-PEREIRA, F.	BB:Fl(α) BB:Bd(Δ)	(OLIVO <i>et al.</i> , 2022)
Uso em tecnossolos	EBS, M. OLIVO, E. F. SIMÃO, L. ZOCHE, J. J. RAUPP-PEREIRA, F.	BB:Bd(Δ)	(EBS <i>et al.</i> , 2022)
Síntese de zeólitas	NAZARIO, R. SIMÃO, L. DALPIAZ, I. ACORDI, J. BORGERT, C. ZOCHE, J. J. ANGIOLETTO, E. RAUPP-PEREIRA, F.	BB:Ji(ε)-2 BB:Br(Δ)	(NAZARIO <i>et al.</i> , 2022)
Obtenção de geopolímeros	NAZARIO, R. SIMÃO, L. DALPIAZ, I. ACORDI, J. BORGERT, C. ZOCHE, J.J. ANGIOLETTO, E. RAUPP-PEREIRA, F.	BB:Ji(ε)-2	(DALPIAZ <i>et al.</i> , 2022)
Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ)	BORGET, C. H.	BB:Fl(α) BB:Bd(Δ)	(BORGERT, 2021)

Fonte: Autor (2022).

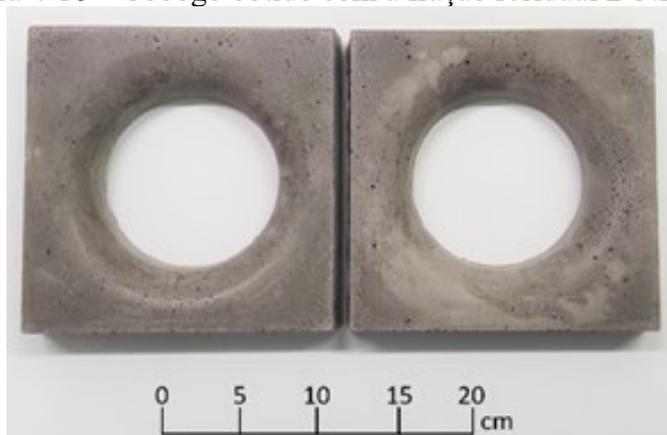
Parte deste trabalho relaciona-se com o desenvolvimento do Projeto Circul@r Coal: Valorização de resíduos de carvão como estratégia catarinense de transição para a Economia Circular - FAPESC, Fundação de amparo à pesquisa e inovação do estado de Santa Catarina.

4.4.1 Uso em argamassa cimentícia

O setor de construção civil possui as rotas mais promissoras para a valorização de resíduos de carvão, devido ao seu potencial pozolânico (ZHANG; LING, 2020) e a semelhança nas suas propriedades físico-químicas, em relação a agregados utilizados no setor (GAO *et al.*, 2021). Potencialidades também se voltam para a produção de produtos cimentícios (XIAO; JU; HE, 2020) e misturas asfálticos (XU *et al.*, 2019). O alto teor de alumina observado, quando associada à minerais argilosos, indica possíveis aplicabilidades do material como insumo pozolânico (FLEESON *et al.*, 2017).

Portanto, o desenvolvimento de materiais cimentícios a partir da fração argilosa, torna-se um viés com grande potencial de aplicabilidade em formulações com cimento Portland. A utilização do carbonato de bário como adjuvantes do sistema reológico cimentício, para a inibição de sulfatos solúveis (ACORDI, 2022), presentes na fração residual argilosa do rejeito pode ser de grande valia para essa linha de aplicação. Pois a fração argilosa valorizada em argamassas apresentaram significativa influência na trabalhabilidade (no estado fresco) e, conseqüentemente, na densidade dos corpos moldados (no estado endurecido). Resistências mecânicas adequadas para uso em elementos argamassados sem função estrutural de até 12 MPa foram obtidas. A Figura 4-16 exemplifica um cobogó, desenvolvido com frações residuais BO:Md(γ), que são elementos arquitetônicos utilizados como elementos de ventilação e iluminação natural em edifícios.

Figura 4-16 – Cobogó obtido com a fração residual BO:Md(γ).



Fonte: (ACORDI, 2022)

4.4.2 Uso como fertilizantes e Tecno solo

Esta linha de aplicação fundamenta-se na hipótese de que algumas frações residuais da Bacia Carbonífera Catarinense e resíduos da agroindústria apresentam potencialidades para a produção de fertilizantes organominerais (produto candidato). Alguns destes materiais possuem potencial de valorização na agroindústria como fertilizante organominerais com base em valores adequados de pH; baixos teores de Fe_2O_3 ; e de SO_3 , assim como de S total. Estas características qualificam as frações residuais da mineração do carvão como matéria prima para a produção de fertilizantes de acordo com a legislação brasileira. Projeta-se com grande potencial o desenvolvimento de Fertilizantes Organominerais utilizados em sistemas agroindustriais, o Substrato utilizado para a Produção de Plantas e, o Solo Técnico, utilizado para remediar áreas degradadas. Estes materiais são por definição, produtos resultantes da mistura física ou da combinação de resíduos minerais e orgânicos.

A partir da análise sistêmica de critérios para a valorização de resíduos CPQvA, foi identificado duas amostras (BB:Fl(α) e BB:Md(Δ)) com potencial de valorização na agroindústria como fertilizante organominerais. Ambas evidenciaram valores de pH de estoque neutro (7,0 e 7,1); baixos teores percentuais de Fe_2O_3 ($4,2\% \text{ kg}^{-1}$ e $3,2\% \text{ kg}^{-1}$); baixos teores de SO_3 ($0,5\% \text{ kg}^{-1}$ e $1,2\% \text{ kg}^{-1}$) e baixos teores de S total ($1,0\% \text{ kg}^{-1}$). Estas características qualificam as amostras de acordo com a legislação brasileira e estão sendo avaliadas conforme os ensaios normatizados para estas aplicações conforme Figura 4-17.

Figura 4-17 – Testes de fertilizantes utilizando fração residual BB:Bd(Δ).



Fonte: (OLIVO *et al.*, 2022)

4.4.3 Síntese de Zeólitas

As zeólitas vem sendo utilizadas com grande sucesso como peneiras moleculares em muitas aplicações industriais e apresentam características específicas de sistema de cavidade tridimensionais que possibilita a transferência de matéria entre os espaços intracristalinos. Uma de suas aplicações está no uso como material adsorvente de íons que estão presentes nos mais variados tipos de efluentes. Sua resistência a altas temperaturas e pressões e ambientes quimicamente agressivos, no caso específico de zeólitas com maiores relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, capacitam as mesmas para outras aplicações, como em reações catalíticas adsorventes para a purificação de alguns gases e em trocas iônicas em detergentes (ANTUNES, 2012).

Desta forma, materiais zeolíticos desenvolvidos a partir das frações residuais BB:Ji(ϵ)-2 e BB:Br(Δ) demonstram características interessantes para o tratamento de efluentes, tais como drenagem ácida da mineração de carvão (DAM). A síntese de zeólitas foi realizada por processo hidrotérmico em meio alcalino e a caracterização mineralógica demonstrou a presença de fases como Chabasita, Analcima e Faujazita. Objetiva-se dar continuidade desta aplicabilidade com a análise de potencialidade destas zeólitas, visando a utilização dos efluentes tratados na irrigação de culturas agrícolas.

4.4.4 Obtenção de geopolímeros

Geopolímeros são aluminossilicatos alcalinamente ativados que podem incorporar resíduos às matérias primas (GUO *et al.*, 2022; SIMÃO *et al.*, 2020), sendo essa uma das maiores vantagens destes materiais. Resíduos da mineração de carvão com significativa fração de finos argilosos, podem substituir o metacaulim comercial nas formulações geopoliméricas. Em comparação com a produção tradicional de cimento Portland, a obtenção de geopolímeros está associada a um menor consumo de energia e menores emissões de gases do efeito estufa (GUO *et al.*, 2022).

Assim, a fração residual BB:Ji(ϵ)-2 foi calcinada e formulações processadas com NaOH e Na₂SiO₃ como ativadores alcalinos. No total, oito formulações foram testadas para identificar o potencial de reatividade. Alguns dos geopolímeros obtidos apresentam uma significativa estabilidade quando imersos em água, bem como aspectos estéticos e de dureza similares aos geopolímeros obtidos com metacaulim comercial (Figura 4-18).

Figura 4-18 – Detalhes da preparação das amostras geopoliméricas.



Fonte: (DALPIAZ *et al.*, 2022)

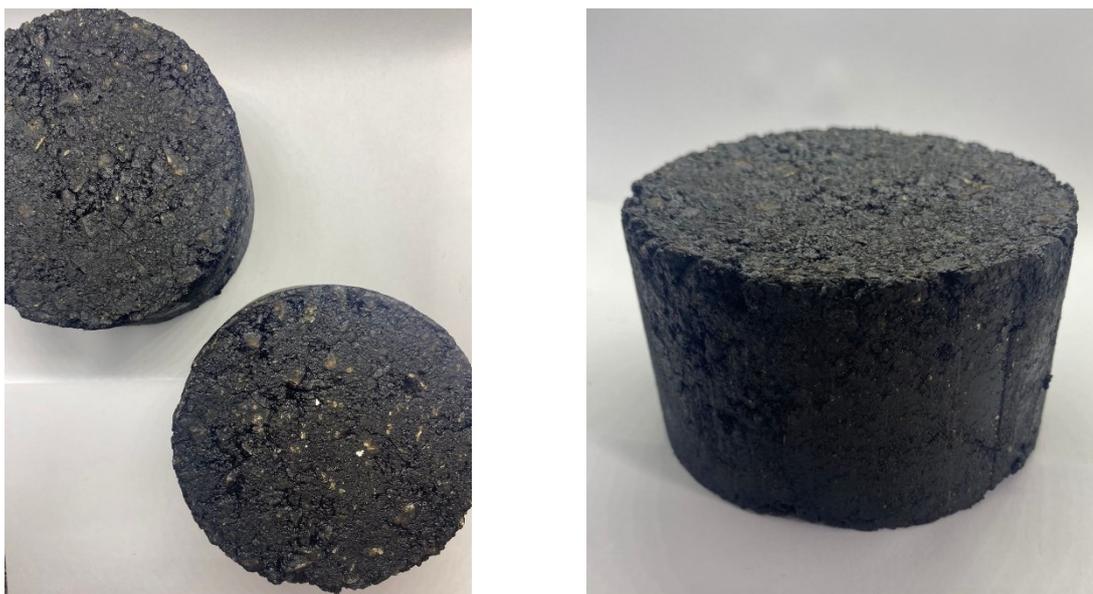
Apesar das potencialidades observadas, torna-se necessário a continuidade dos trabalhos com medidas de propriedades dos produtos geopoliméricos obtidos.

4.4.5 Uso em asfaltos

Nesta linha de pesquisa aborda-se a valorização da fração fina do rejeito da indústria de carvão mineral como filler em concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). As amostras da fração fina do rejeito BB:Fl(α) e BB:Md(Δ) foram caracterizadas por diferentes ensaios e a partir dos resultados obtidos, selecionou-se a amostra com as características mais adequadas para emprego como filler em CAUQ. Os corpos de prova (Figura 4-19), foram analisados por estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração por compressão diametral e densidade aparente.

Os ensaios demonstraram que a substituição do filler convencional pela fração residual BB:Fl(α) aumentou sua resistência à tração em 28%, sem provocar alterações significativas na densidade do CAUQ. A redução na estabilidade foi de 17%, porém apresentando ainda um valor superior ao dobro do mínimo especificado pela legislação brasileira.

Figura 4-19 – Corpos de prova de CAUQ desenvolvidos com a fração BB:Fl(α).



Fonte: (BORGERT, 2021)

A principal justificativa para os desempenhos obtidos é a presença de fases argilosas na fração fina do rejeito de carvão, que de acordo com a literatura, tendem a melhorar a adesividade do material no ligante asfáltico, mesmo que este também possa fragilizar o agregado por uma maior absorção de água.

5 CONCLUSÃO

O caráter inovador desta tese está na seleção e amostragem dos materiais (rejeitos de carvão) na forma de frações residuais de diferentes processos de beneficiamento aplicados na extração de carvão de interesse energético.

A seleção destas frações residuais deu-se inicialmente pelo levantamento das mineradoras que possuem cota mensal de fornecimento de carvão para usina termoeletrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo-SC. Contudo, 6 mineradoras fizeram parte deste estudo. Todas geradoras de rejeitos cujos destinos ainda continua a ser os aterros controlados. Algumas destas empresas atualmente realizam a prática de backfill (técnica de disposição de rejeitos no subsolo a fim de preencher os espaços vazios deixados pela mineração), o que acaba por aumentar o potencial de geração da DAM.

A coleta dos rejeitos dessas mineradoras teve a abordagem inovadora de amostragem em cada ponto de descarte (saída de material rejeitado) do processo de beneficiamento aplicado. Na maioria dos estudos sobre rejeitos de carvão, essa coleta é realizada nos aterros ou nos rejeitos que são encaminhados para aterros, onde as mineradoras misturam todas as frações produzidas. Assim, 24 frações residuais foram coletadas e caracterizadas, o que tornou possível encontrar significativas diferenças, bem como algumas semelhanças relacionadas às características de formação geológicas e com as diferentes tecnologias de beneficiamento utilizadas.

Desta forma, conseguiu-se relacionar a camada geológica Barro Branco e Bonito com a presença de frações minerais argilosas e piríticas. As frações resultantes da concentração do carvão da camada Barro Branco apresentam tendência a ter argilas caulínicas e a camada de carvão Bonito em ter argilas ilíticas. Contudo, as duas camadas descartam a presença de material piritoso junto com estes minerais característicos de argilas.

Segundo a classificação ambiental, o resíduo de mineração de carvão é não inerte - classe II-A. Portanto, passível de valorização a partir de um guia sistêmico CPQvA estabelecidos por critérios de classificação, potencialidade, quantidade/viabilidade e aplicabilidade.

Ressalta-se que a acidificação, observada a partir das medidas de pH, comprovam que o armazenamento destes materiais/rejeitos, aumenta a sua perigosidade, fato que pode impedir a reutilização, de acordo com a legislação brasileira.

Grupos por características comuns entre as 24 frações residuais foram formados para melhor evidenciar as possíveis propostas de aplicações, sobretudo através da concentração de carbono, argilominerais e pirita.

Desta forma, a partir deste trabalho e de outros associados, a separação dos rejeitos gerados em diferentes frações de acordo com sua origem geológica e características de produção, torna-se uma importante inovação na busca do aproveitamento da totalidade do ROM extraído. Também se estabelece um significativo avanço no desenvolvimento econômico, com base na circularidade de recursos minerais.

REFERÊNCIAS

ACORDI, J. **Desenvolvimento de argamassas cimentícias a partir da valorização de minerais contidos em rejeitos de carvão catarinense**. 2022. Tese de Doutorado: Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

ADDOU, R.; HANNAWI, K.; AGBODJAN, W. P.; ZENASNI, M. Characterization of Moroccan Coal Waste (Jerada Mine): Impact on Physical Properties of Mortars Made of Coal Waste. **Journal of materials and environmental sciences**, v. 8, n. 10, p. 3473–3482, 2017.

AGUIAR, L. A. de; ARAUJO, G. H. de S.; ALMEIDA, J. R.; SOARES, P. S. M.; POSSA, M. V. Análise e avaliação de risco ambiental como instrumentos de gestão em instalações de mineração. *In: Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente*. [s.l: s.n.]p. 300.

AMARAL, J. R. Do. **Aproveitamento de rejeitos de carvão em Santa Catarina, Brasil**. 2014. Univeridade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

AMARAL FILHO, J. R. do; SCHNEIDER, I. A. H.; BRUM, I. A. S. de; SAMPAIO, C. H.; MILTZAREK, G.; SCHNEIDER, C. Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. **Revista Escola de Minas**, v. 66, p. 347–353, 2013.

AMIRI, H.; AZADI, S.; KARIMAEI, M.; SADEGHI, H.; FARSHAD DABBAGHI. Multi-objective optimization of coal waste recycling in concrete using response surface methodology. **Journal of Building Engineering**, v. 45, 2022.

ANDREOLA, A.; ROSINI, D. N.; CAMPOS, M. L.; BIASI, J. Pietro; CITADINI-ZANETTE, V.; DA COSTA BORTOLUZZI, R. L.; MIQUELUTTI, D. J.; NICOLEITE, E. R. Ferns and lycophytes in coal mining waste and tailing landfills. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 22, p. 32415–32427, maio 2022.

ANEL, A. nacional de energia elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. [s.l: s.n.]

ANTUNES, L. Estudo da cinética de adsorção de metais pesados no tratamento de drenagem ácida de mineração utilizando zeólitas do tipo 4A. 11 jul. 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/handle/1/759>>. Acesso em: 3 nov. 2022.

AQUINO; DE, J. A. de O.; MAGALHÃES; BRAGA, M. L. A. P. F. **Ensaio em meio denso**. [s.l: s.n.]297–318 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos: Classificação** Rio de Janeiro. 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos** Rio de Janeiro. 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004c.

ASTM C150, A. S. for T. and M. **ASTM C150: Standard specification for Portland cement**.2021.

ASTM D7348, A. S. for T. and M. **ASTM D7348: Standard test methods for loss on ignition (LOI) of solid combustion residues**.EUA. 2007.

BARBOSA, R.; LAPA, N.; BOAVIDA, D.; LOPES, H.; GULYURTLU, I.; MENDES, B. Co-combustion of coal and sewage sludge: Chemical and ecotoxicological properties of ashes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 170, n. 2–3, p. 902–909, 30 out. 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409007894>>.

BECKER, E.; JUSTI, J.; MINATTO, F. D.; DELAVI, D. G. G.; MONTEDO, O. R. K.; DE NONI, A. Use of mechanically-activated kaolin to replace ball clay in engobe for a ceramic tile. **Ceramica**, v. 63, n. 367, p. 295–302, jul. 2017.

BELLOLI, M.; QUADROS; GUIDI, J. . **História do Carvão de Santa Catarina**. [s.l:

s.n.]300 p.

BIAN, Z.; DONG, J.; LEI, S.; LENG, H.; MU, S.; WANG, H. The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland. **Environmental Geology**, v. 58, n. 3, p. 625–634, 2009.

BORGERT, C. H. **Valorização de potencial resíduo do beneficiamento de carvão mineral como filler em concreto asfáltico usinado a quente**. Criciúma. Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, 2021.

BORGERT, C. H. **Carvão mineral: Desafios de atribuir sustentabilidade a um recurso não renovável**. Criciúma. Programa de Pós-graduação em ciência e engenharia de matérias – PPGCEM, 2022.

BORTOLUZZI, C. A.; PICCOLI, A. E. M.; BOSSI, G. E.; SOMMER, M. G.; TOIGO, M. M.; PONS, M. E.; WOLF, M.; DA SILVA, Z. C. Pesquisas Geológica na Bacia Carbonífera de Santa Catarina (Considerações sobre a Estratigrafia, Sedimentologia, Paleontologia e Petrologia dos Carvões). **Pesquisas em Geociências**, v. 11, n. 11, p. 33–192, dez. 1978.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasil. 2010a.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos**. Brasília. 2010b.

BRASIL. **Projeto Lei nº 1.496, de 20 de setembro de 2019**. Brasília. 2019.

BRASIL. **Lei nº 14.299, de 5 de janeiro de 2022. Institui so programa de transição energética justa (TEJ)**. Brasília. 2022.

BRITISH PETROLEUM. BP Statistical Review of World Energy 2021. **British Petroleum**, n. 66, p. 1–52, 2021.

CAGLIAR, J.; LOPES, R. da C.; LAVINA, E. L. C.; PAIM, P. S. G. Ambientes deposicionais associados às principais jazidas de carvão do Brasil. *In*: ADE, M. V. B.; ARAUJO, C. V.; RODRIGUES, C. F. A. **Carvões Gonduânicos no Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Departamento de Estatigrafia e Paleontologia, Faculdade de Geologia, Universidade

do Estado do Rio de Janeiro e FP-ENAS, Universidade Fernando Pessoa, 2019. p. 1–22.

CALKINS, W. H. The chemical forms of sulfur in coal: a review. **Fuel**, v. 73, n. 4, p. 475–484, 1 abr. 1994. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0016236194900280>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

CAÑIBANO, J. G. Latest developments in the utilization of coal mining wastes. **Coal Science and Technology**, v. 24, n. C, p. 1629–1632, 1995.

CARNIATO, A. **Planejamento da produção e mistura de carvão mineral: programação matemática e estudo de caso**. Florianópolis. 2005.

CETEM, C. de T. M. **Projeto conceitual para recuperação ambiental da bacia carbonífera sul catarinense**.

CGEE, C. de gestão e estudos estratégicos. **Roadmap tecnológico para produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2012 a 2035**. Brasília. 2012.

CHEN, W.; XU, R. Clean coal technology development in China. **Energy Policy**, v. 38, n. 5, p. 2123–2130, maio 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.003>>.

CIESIELCZUK, J.; KRUSZEWSKI, Ł.; MAJKA, J. Comparative mineralogical study of thermally-altered coal-dump waste, natural rocks and the products of laboratory heating experiments. **International Journal of Coal Geology**, v. 139, n. 1, p. 114–141, 2015.

COAL. IEA - **International Energy Agency** 2022.

DA SILVA, R. B.; MATOSKI, A.; NEVES JUNIOR, A.; KOSTRZEWA-DEMCHUK, P. Study of compressive strength of sand-lime bricks produced with coal tailings using mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 127986, ago. 2022.

DALPIAZ, I.; ACORDI, J.; SIMÃO, L.; NAZARIO, R.; RAUPP'PEREIRA, F.; ANGIOLETTO, E. ZOCHE, J. .; BORGERT, C. **Ativação térmica de resíduos da mineração de carvão para uso em materiais geopoliméricos**. Águas de Lindóia - SP. 2022.

DE ALMEIDA AZZI, A.; OSACKÝ, M.; UHLÍK, P.; ČAPLOVIČOVÁ, M.;

ZANARDO, A.; MADEJOVÁ, J. Characterization of clays from the Corumbataí formation used as raw material for ceramic industry in the Santa Gertrudes district, São Paulo, Brazil. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 232–242, 2016.

DE LA VILLA, R. V.; GARCÍA, R.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; FRÍAS, M. Effects of calcination temperature and the addition of ZnO on coal waste activation: A mineralogical and morphological evolution. **Applied Clay Science**, 2017.

DE OLIVEIRA, V. M.; DE SOUZA, F.; DA CRUZ, R. T.; PY, L. G.; KIRCHHEIM, A. P.; BRAGANÇA, S. R. Valorization of non-beneficiated clays as supplementary cementitious materials in the production of cement-based mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102474, 1 out. 2021.

DIESSEL, C. F. . Paralic coal seam formation. In: Inst. Fuel Conference, 1970, Brisbane. [...]. Brisbane: 1970. p. 1–22.

DIESSEL, C. F. K. **Coal-bearing Depositional Systems**, Springer-Verlag. [s.l: s.n.]721 p.

DMITRIENKO, M. A.; STRIZHAK, P. A. Environmentally and economically efficient utilization of coal processing waste. **Science of the Total Environment**, v. 598, n. x, p. 21–27, 2017.

DUAN, K.; ZHAO, B.; ZHANG, S.; MA, Y.; BAOWEI ZHAO, C. Contamination characteristics, source analysis, and ecological risk assessment of toxic metals and metalloid in agricultural soil in Yuzhong, China. **Journal of Environmental Quality**, v. 50, p. 122–133, 2021. Disponível em: <<https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jeq2.20163>>.

E. ANGIOLETTO, E. CARVALHO, F. BIANZINI, et al.; ANGIOLETTO, E.; CARVALHO, E. F. U. de; BIAZINI F., F. L.; LAJE F., F. A.; RIELLA, H. G.; SANTOS, I.; DEPINTOR, J. C.; BOSCOV, M. E. G.; MENASCE, S. **Ozônio na recuperação de solos e recursos hídricos contaminados por mineração**. [s.l: s.n.]247 p.

EBS, M.; OLIVO, E. F.; SIMÃO, L.; ZOCHE, J. .; RAUPP-PEREIRA, F. **Valorização de resíduos do carvão para produção de fertilizantes e de solo superficial:**

uma revisão na perspectiva da economia circular.2022.

ECO.NOMIA. **O que é a Economia Circular?** Disponível em: <<https://eco.nomia.pt/pt/economia-circular/estrategias>>. Acesso em: 6 out. 2022.

ESPITIA-PÉREZ, L.; SOSA, M. Q.; SALCEDO-ARTEAGA, S.; LEÓN-MEJÍA, G.; HOYOS-GIRALDO, L. S.; BRANGO, H.; KVITKO, K.; DA SILVA, J.; HENRIQUES, J. A. P. Polymorphisms in metabolism and repair genes affects DNA damage caused by open-cast coal mining exposure. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 808, p. 38–51, set. 2016.

ESPITIA-PÉREZ; SILVA, L. da; BRANGO, J.; ESPITIA-PÉREZ, H.; PASTOR-SIERRA, P.; KARINA SALCEDO-ARTEAGA, S. de S.; DIAS, C. T.; HOYOS-GIRALDO; STELLA, J. F.; GÓMEZ-PÉREZ, L.; MIGUEL SALCEDO-RESTREPO, D. H.; A.P., J. Genetic damage in environmentally exposed populations to open-pit coal mining residues: Analysis of buccal micronucleus cytome (BMN-cyt) assay and alkaline, Endo III and FPG high-throughput comet assay. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 836, p. 24–35, dez. 2018.

FAN, G.; ZHANG, D.; WANG, X. Reduction and utilization of coal mine waste rock in China: A case study in Tiefert coalfield. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 24–33, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.001>>.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e meio ambiente no Brasil**. Brasília. 2002.

FLEESON, W.; JAYAWICKREME, E.; JONES, A. B. A. P.; BROWN. Estudo da calcinação de rejeito de mineração de carvão para aplicação como pozolana. **Journal of Personality and Social Psychology**, v. 1, n. 1, p. 64, 2017.

FRANKS, D. M.; BOGER, D. V.; CÔTE, C. M.; MULLIGAN, D. R. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. **Resources Policy**, v. 36, n. 2, p. 114–122, jun. 2011.

FRASSON, B. J.; PINTO, R. C. A.; ROCHA, J. C. Influence of different sources of coal gangue used as aluminosilicate powder on the mechanical properties and microstructure

of alkali-activated cement. **Materiales de Construcción**, v. 69, n. 336, p. 199, set. 2019.

GAO, S.; ZHAO, G.; GUO, L.; ZHOU, L.; YUAN, K. Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121212, 25 jan. 2021.

GEREMIAS, R.; BORTOLOTO, T.; WILHELM-FILHO, D.; PEDROSA, R. C.; DE FÁVERE, V. T. Efficacy assessment of acid mine drainage treatment with coal mining waste using *Allium cepa* L. as a bioindicator. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 79, p. 116–121, maio 2012.

GEREMIAS, R.; FÁVERE, R. L. e V. T. de; PEDROSA, R. C. Rejeito de mineração de carvão como adsorvente para remoção da acidez, fe (iii), al (iii) e mn (ii) em drenagem ácida. **Quim. Nova**, v. 33, n. 8, p. 1677–1681, 2010.

GOMES, A. J. P.; CRUZ, P. R.; BORGES, L. P. Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. *In: Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. [s.l: s.n.]

GOMES, C. F. C. F. **Argilas - o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986. 457 p.

GONÇALVES, J. O.; CRISSIEN, T. J.; SAMPAIO, C. H.; OLIVEIRA, M. L. S.; SILVA, L. F. O. The role of roots plants and soil characteristics in coal mining areas: Geochemical and nanomineralogy information still without details. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106539, 1 dez. 2021.

GRYCZAK, M.; WONG, J. W.; THIEMANN, C.; FERRARI, B. J. D.; WERNER, I.; PETZHOLD, C. L. Recycled low-density polyethylene composite to mitigate the environmental impacts generated from coal mining waste in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 260, p. 110149, abr. 2020.

GUERRA-SOMMER, M.; SCHMIDT, I. D.; KLEPZIG, M. C. Paleoflora dos carvões brasileiras. *In: ADE, M. V. B.; ARAUJO, C. V.; RODRIGUES, C. F. A. Carvões Gonduânicos no Brasil*. [s.l: s.n.]p. 174.

GUO, L.; ZHOU, M.; WANG, X.; LI, C.; JIA, H. Preparation of coal gangue-slag-fly

ash geopolymer grouting materials. **Construction and Building Materials**, v. 328, p. 126997, abr. 2022.

GUPTA, A. K.; BANERJEE, P. K.; MISHRA, A. Influence of chemical parameters on selectivity and recovery of fine coal through flotation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 92, n. 1–2, p. 1–6, jul. 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751609000301>>.

GUSTAVO SIMÃO. **O carvão da camada Bonito, jazida sul catarinense: Uma contibuição para a caracterização petrográfica, química e tecnológica**. Porto Alegre. 2012.

HAGEMANN, H. W.; HOLLERBACH, A. Relationship between the macropetrographic and organic geochemical composition of lignites. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 12, n. C, p. 631–638, 1 jan. 1980.

HAIBIN, L.; ZHENLING, L. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1331–1340, 2010.

HOLZ, M.; FRANÇA, A. B.; SOUZA, P. A.; IANNUZZI, R.; ROHN, R. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, n. 2, p. 381–399, mar. 2010.

HU, Z.; XU, L.; WANG, X.; LI, X.; MA, B. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. **Thermochimica Acta**, v. 441, n. 1, p. 79–83, 2006.

ICCP. **International handbook of coal petrography**. [s.l: s.n.]494 p.

INAP, I. N. for A. P. **The Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)**.

ISO 11760: Classification of coals. 2018.

JACKSON, R. B.; LE QUÉRÉ, C.; ANDREW, R. M.; CANADELL, J. G.; PETERS, G. P.; ROY, J.; WU, L. Warning signs for stabilizing global CO₂ emissions. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 11, 2017.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; MACHADO, G.; MEXIAS, A.; SILVA, M. B.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. **International Journal of Coal Geology**, v. 68, n. 1- 2 SPEC. ISS., p. 79–116, 1 ago. 2006.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; MEXIAS, A.; BALBINOT, M.; LEVANDOWSKI, J.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. International Journal of Coal Geology Depositional setting , petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin : 2 . South Santa Catarina Coal field , Brazil. **International Journal of Coal Geology**, v. 84, n. 3–4, p. 213–236, 2010a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2010.08.008>>.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; MEXIAS, A.; BALBINOT, M.; LEVANDOWSKI, J.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. **International Journal of Coal Geology**, v. 84, n. 3–4, p. 213–236, 1 dez. 2010b.

KERR, R. **How much coal is left**U.S. Energy Information Administration Science, 2009.

KIJO-KLECZKOWSKA, A.; SZUMERA, M.; GNATOWSKI, A.; SADKOWSKI, D. Comparative thermal analysis of coal fuels, biomass, fly ash and polyamide. **Energy**, v. 258, p. 124840, 1 nov. 2022.

KINUTHIA, J.; SNELSON, D.; GAILIUS, A. Sustainable medium-strength concrete (CS-concrete) from colliery spoil in South Wales UK. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 15, n. 2, p. 149–157, 2009.

KORBAN, Z. Industrial wastes management in coal mine X – selected problems. **GÓRNIC TWO I GEOLOGIA**, v. 7, p. 109–119, 2012.

KRONEMBERGER, D. M. P. Os desafios da construção dos indicadores ODS globais. **Ciência e Cultura**, v. 71, n. 1, p. 40–45, jan. 2019. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252019000100012&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 18 mar. 2022.

LEMESHEV, V. G.; GUBIN, I. K.; SAVEL'EV, Y. A.; TUMANOV, D. V.; LEMESHEV, D. O. Utilization of coal-mining waste in the production of building ceramic materials. **Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)**, v. 61, n. 9–10, p. 308–311, 2004.

LEÓN-MEJÍA, G.; ESPITIA-PÉREZ, L.; HOYOS-GIRALDO, L. S.; DA SILVA, J.; HARTMANN, A.; HENRIQUES, J. A. P.; QUINTANA, M. Assessment of DNA damage in coal open-cast mining workers using the cytokinesis-blocked micronucleus test and the comet assay. **Science of The Total Environment**, v. 409, n. 4, p. 686–691, jan. 2011.

LEÓN-MEJÍA, G.; QUINTANA, M.; DEBASTIANI, R.; DIAS, J.; ESPITIA-PÉREZ, L.; HARTMANN, A.; HENRIQUES, J. A. P.; DA SILVA, J. Genetic damage in coal miners evaluated by buccal micronucleus cytome assay. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 107, p. 133–139, set. 2014.

LEON, A. B. T. **Estudos de pelotização e briquetagem de finos de carvão mineral**. 1985. 1985.

LEONARD J. W.; MITCHELL D. R. Editorial board page for “Coal Preparation”, Volume 7, Number 3-4. **Coal Preparation**, v. 7, n. 3–4, p. ebi-ebi, 31 jan. 1989. Disponível em: <https://www.academia.edu/28846772/Coal_Preparation>. Acesso em: 15 out. 2022.

LI, J.; WANG, J. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 117946, 1 dez. 2019.

MACHADO DE OLIVEIRA, C.; GESSER MÜLLER, T.; PATRICIO FERREIRA, L.; PRADO CECHINEL, M. A.; PETERSON, M.; RAUPP-PEREIRA, F. Valorization of iron pyrite from coal mining in southern Brazil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 1, p. 102931, fev. 2019.

MAHMOODABADI, M. **Korean an orean anthracite coal cleaning bal cleaning by means of dry means of dry and wet based separation technologies**. 2015. University of Kentucky, 2015. Disponível em: <https://uknowledge.uky.edu/mng_etds/18>.

MALACARNE, C. S.; LONGHI, M. A.; SILVA, M. R. C.; GONÇALVES, J. P.;

RODRÍGUEZ, E. D.; KIRCHHEIM, A. P. Influence of low-grade materials as clinker substitute on the rheological behavior, hydration and mechanical performance of ternary cements. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00776, dez. 2021.

MCLELLAN, B. C.; CORDER, G. D.; GIURCO, D.; GREEN, S. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – Review and analysis of current approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 16, p. 1414–1425, nov. 2009.

MEJIA-BALLESTEROS, J. E.; RODIER, L.; FILOMENO, R.; SAVASTANO JR, H.; FIORELLI, J.; ROJAS, M. F. Influence of the fiber treatment and matrix modification on the durability of eucalyptus fiber reinforced composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 124, p. 104280, nov. 2021.

MEJIA-BALLESTEROS, J. E.; SAVASTANO, H.; FIORELLI, J.; ROJAS, M. F. Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications. **Cement and Concrete Composites**, v. 98, p. 49–60, abr. 2019.

MILTIZAREK, G. Usos industriais do carvão mineral brasileiro. *In*: ADE, M. V. B.; ARAUJO, C. V.; RODRIGUES, C. F. A. **Carvões gonduânicos no Brasil**. [s.l: s.n.]p. 137–156.

MINALLIANCE. **100 Innovations in the mining industry**. Disponível em: <http://www.oma.on.ca/en/ontariominning/resources/Minalliance_100_innovations_en.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MISRA, B. K.; SINGH, B. D. Susceptibility to spontaneous combustion of Indian coals and lignites: an organic petrographic autopsy. **International Journal of Coal Geology**, v. 25, n. 3–4, p. 265–286, 1994.

MME, M. de minas e energia (Brasil). **Plano nacional de mineração 2030 (PNM - 2030)**. [s.l: s.n.].

MODARRES, A.; HESAMI, S.; SOLTANINEJAD, M.; MADANI, H. Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, n. 8, p. 748–761, 3 ago.

2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2016.1205747>>.

MODARRES, A.; RAHMANZADEH, M. Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 476–483, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002>>.

MUKHERJEE, S.; SRIVASTAVA, S. K. Minerals Transformations in Northeastern Region Coals of India on Heat Treatment. **Energy & Fuels**, v. 20, n. 3, p. 1089–1096, 1 maio 2006. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef050155y>>.

MUTHURAMAN, M.; NAMIOKA, T.; YOSHIKAWA, K. A comparative study on co-combustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash Indian coal: A thermogravimetric analysis. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 5, p. 550–558, 2010.

N. ADIBEE, M. OSANLOO, M. R. Adverse effects of coal mine waste dumps on the environment and their management. p. 1581–1592, 2013.

NASCIMENTO, F. M. F.; MENDONÇA, R. M. G.; MACÊDO, M. I. F.; SOARES, P. S. M. **Impactos ambientais nos recursos hídricos da exploração de carvão em Santa Catarina**. [s.l.] Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, 2002. .

NAZARIO, R.; SIMÃO, L.; DALPIAZ, I.; ACORDI, J.; BORGERT, C.; ZOCHE, J. .; ANGIOLETTO, E.; RAUPP'PEREIRA, F. **Síntese de zeólita a partir do metacaulim para tratamento de efluentes da drenagem ácida de mina (DAM)**. Águas de Lindóia - SP. 2022.

NIETO, F.; ABAD, I.; AZAÑÓN, J. M. Smectite quantification in sediments and soils by thermogravimetric analyses. **Applied Clay Science**, v. 38, n. 3–4, p. 288–296, fev. 2008.

NIXON, P. J.; GARTNER, E. M. An assessment of processes for the manufacture of synthetic aggregates from colliery spoil. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 2, n. 3, p. 141–164, 1980.

NM 30 ABNT, A. B. de N. T. **NM 30: Agregado miúdo: Determinação da absorção de água.** Brasil. 2001.

NRB 10004 ABNT, A. B. de N. T. . **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação.**Rio de Janeiro, Brasil. 2004.

NUNES, K. G. P.; MARCÍLIO, N. R. DETERMINATION OF THE KINETIC PARAMETERS OF OXY-FUEL COMBUSTION OF COAL WITH A HIGH ASH CONTENT. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 32, n. 1, p. 211–223, mar. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322015000100211&lng=en&tlng=en>.

OLIVEIRA, C. M.; MACHADO, C. M.; DUARTE, G. W.; PETERSON, M. Beneficiation of pyrite from coal mining. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 821–827, dez. 2016.

OLIVEIRA, K. A. de. **Sistemática CPQvA para a valorização de resíduos sólidos industriais: um guia para tomada de decisão.** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

OLIVEIRA, V. M. de; SOUZA, F. de; CRUZ, R. T. da; PY, L. G.; KIRCHHEIM, A. P.; BRAGANÇA, S. R. Valorization of non-beneficiated clays as supplementary cementitious materials in the production of cement-based mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 10, 2021.

OLIVO, E. F.; EBS, M.; SIMÃO, L.; ZOCHE, J. .; RAUPP-PEREIRA, F. **Fertilizantes organominerais à base de resíduos do beneficiamento de carvão e da agroindústria: uma análise preliminar.**2022.

PASHKEVICH, M. A. Classification and Environmental Impact of Mine Dumps. *In*: BECH, J.; BINI, C.; PASHKEVICH, M. A. **Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils.** London: Academic Press, 2017. p. 1–32.

PETERS, G. P.; ANDREW, R. M.; CANADELL, J. G.; FUSS, S.; JACKSON, R. B.; KORSBAKKEN, J. I.; LE QUÉRÉ, C.; NAKICENOVIC, N. Key indicators to track current

progress and future ambition of the Paris Agreement. **Nature Climate Change**, v. 7, p. 118–112, 2017.

PETERSON, M.; COLLE NASCIMENTO, G.; OLIVEIRA DA SILVA, A.; GRACHER RIELLA, H. **Estudo térmico da pirita da região carbonífera de Criciúma** Bento Gonçalves. 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2008.

POE, S. H.; TAULBEE, D. N.; KEOGH, R. A. Density gradient centrifugation of – 100 mesh coal: An alternative to using micronized samples for maceral separation. **Organic Geochemistry**, v. 14, n. 3, p. 307–313, 1 jan. 1989.

POZZI, P.; GALASSI, C. **La reologia dei materiali ceramici tradizionali**. Faenza: Faenza Editrice s.p.a., 1994.

QUADRO, M. S.; CAMARGO, F. A. de O.; GIANELLO, C.; DALL’AGNOL, A. L. B.; DEMARCO, C. F.; ANDREAZZA, R. Crescimento e teor de cromo em mamoneira cultivada em solo receptor de resíduos de curtume e carboníferos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 1095–1102, dez. 2019.

RAUPP-PEREIRA, F.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; LABRINCHA, J. A. Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products. **Ceramics International**, v. 32, n. 2, p. 173–179, 2006.

RAUPP PEREIRA, F. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral composições cerâmicas e cimentíceas**. 2006. Tese de Doutorado, Aveiro, 2006.

REDDICK, J. F.; VON BLOTTNITZ, H.; KOTHUIS, B. Cleaner Production in the South African Coal Mining and Processing Industry: A Case Study Investigation. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 28, n. 4, p. 224–236, out. 2008.

REDIVO, R. V. Caracterização tecnológica do carvão das camadas barro branco e bonito para fins energéticos na região de criciúma - SC. p. 91, 2002.

RIBEIRO, J.; TAFFAREL, S. R.; SAMPAIO, C. H.; FLORES, D.; SILVA, L. F. O. Mineral speciation and fate of some hazardous contaminants in coal waste pile from anthracite mining in Portugal. **International Journal of Coal Geology**, v. 109–110, p. 15–23, abr. 2013.

RONCONI, J. R.; SCHNEIDER, I. A. H. **Benefícios ambientais relacionados aos uso de espirais com três produtos no beneficiamento de carvão mineral - Um estudo de caso em Santa Catarina.** Porto Alegre. 2014.

RUIZ, A. S. **FLOTAÇÃO DO CARVÃO CONTIDO NO REJEITO DA BARRAGEM EL CANTOR.** 2009. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SALVI MALACARNE, C.; RUBENS CARDOSO DA SILVA, M.; DANIELI, S.; GONÇALVES MACIEL, V.; PAULA KIRCHHEIM, A. Environmental and technical assessment to support sustainable strategies for limestone calcined clay cement production in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125261, dez. 2021.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 603 p.

SANTOS, C. R. dos; FILHO, J. R. do A.; TUBINO, R. M. C.; SCHNEIDER, I. A. H. Use of Coal Waste as Fine Aggregates in Concrete Paving Blocks. **Geomaterials**, v. 03, n. 02, p. 54–59, 2013.

SANTOS, P. de S. **Ciência e tecnologia de argilas.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 1989.

SCHNEIDER, C. H. Controle da Drenagem Ácida de Minas na Mineração de Carvão de Santa Catarina: Caso da Mina UM II - Verdinho. p. 133, 2006.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUIERA, A. A. Revisão estratigráfica da bacia do Paraná. In: 1974, [...]. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia., 1974. p. 41–65.

SCHOPF, J. M. A definition of coal. **Economic Geology**, v. 51, p. 521–527, 1956.

SHAFIEE, S.; TOPAL, E. When will fossil fuel reserves be diminished? **Energy Policy**, v. 37, n. 1, p. 181–189, 2009.

SIECESC, S. da indústria de extração de carvão do estado de S. C. **Dados Estatísticos - Energia & Desenvolvimento.**

SIECESC, S. da indústria de extração de carvão do estado de S. C. **Carvão mineral: dados estatísticos.**

SIMÃO, G. **O carvão da jazida de Morungava-RS: Caracterização petrográfica, química e tecnológica das camadas de carvão do poço de exploração CBM 001-MO-RS.** Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências., 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/150262>>.

SIMÃO, L.; HOTZA, D.; RIBEIRO, M. J.; NOVAIS, R. M.; MONTEDO, O. R. K.; RAUPP-PEREIRA, F. Development of new geopolymers based on stone cutting waste. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119525, out. 2020.

SKARZYŃSKA, K. M. Reuse of coal mining wastes in civil engineering — Part 1: Properties of minestone. **Waste Management**, v. 15, n. 1, p. 3–42, jan. 1995.

SKARZYŃSKA, K. M. **Coal Mining Wastes and Their Application in Civil Engineering.** Krakovie: WYD. Akademia. Rolnicza, 1997. 199 p.

SOUSA, M. J.; LEMOS DE RODRIGUES, C. F.; DINIS, M. A. P. O Carvão em Portugal: Geologia, Petrologia e Geoquímica. *In:* [s.l: s.n.]p. <https://www.researchgate.net/publication/237063195>.

SPENCE, R.; WELLS, J.; DUDLEY, E. **Jobs from housing: Employment, building materials, and enabling strategies for urban development.** 1. ed. London: Intermediate Technology Publications, 1993.

SUÁREZ-RUIZ, I.; CRELLING, J. C. Applied Coal Petrology. The Role of Petrology in Coal Utilization. **Elsevier**, p. 388, 2008.

SUFFART, T.; CAYE, B. R.; DEEMON, R. F. **Projeto carvão bonito gaseificável. Relatório final.** Porto Alegre. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral, 1977.

SUN, R.; LIU, G.; ZHENG, L.; CHOU, C. Characteristics of coal quality and their relationship with coal-forming environment : A case study from the Zhuji exploration area ,.

Energy, v. 35, n. 1, p. 423–435, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.009>>.

TAHA, Y.; BENZAAZOUA, M.; HAKKOU, R.; MANSORI, M. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. **Minerals Engineering**, v. 107, p. 123–138, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.001>>.

TAYLOR, G. H.; TEICHMÜLLER, M.; DAVIS, A.; DIESSEL, C. F. K.; LITTKER, R.; ROBERT, P. **Organic Petrology**. [s.l.: s.n.]704 p.

TSAI, S. C. **Fundamentals of coal beneficiation and utilization**. [s.l.: s.n.]391 p.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 234 p.

VIEIRA, M. .; ACORDI, J.; SIMÃO, L.; ZOCHE, J. J.; GRZYCZAK, M.; RAUPP-PEREIRA, F. **Adição de carbonato de bário para estabilização de sulfatos solúveis de rejeitos de carvão em formulações cimentícias**. Águas de Lindóia - SP. 2022.

VIGIL DE LA VILLA, R.; FRÍAS, M.; GARCÍA-GIMÉNEZ, R.; MARTÍNEZ-RAMIREZ, S.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L. Chemical and mineral transformations that occur in mine waste and washery rejects during pre-utilization calcination. **International Journal of Coal Geology**, v. 132, p. 123–130, 2014.

VO, T. L.; NASH, W.; DEL GALDO, M.; REZANIA, M.; CRANE, R.; MOUSAVI NEZHAD, M.; FERRARA, L. Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 336, p. 130213, 15 fev. 2022.

WEILER, J.; FILHO, J. R. do A.; SCHNEIDER, I. A. H. Processamento de Rejeitos de Carvão e Redução do Impacto Ambiental. **Augmdomus**, v. 6, n. 0, p. 80–94, 2014.

WEILER, J.; FIRPO, B. A.; SCHNEIDER, I. A. H. Technosol as an integrated management tool for turning urban and coal mining waste into a resource. **Minerals Engineering**, v. 147, p. 106179, mar. 2020.

WEILER, J.; SCHNEIDER, I. A. H. Pyrite utilization in the carboniferous region of Santa Catarina, Brazil - Potentials, challenges, and environmental advantages. **REM - International Engineering Journal**, 2019.

WILLIAMS, A.; POURKASHANIAN, M.; JONES, J. M.; SKORUPSKA, N. **Combustion and gasification of coal**. New York: Taylor & Francis, 2000. 336 p.

XIAO, M.; JU, F.; HE, Z. quan. Research on shotcrete in mine using non-activated waste coal gangue aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120810, jun. 2020.

XU, P.; CHEN, Z.; CAI, J.; PEI, J.; GAO, J.; ZHANG, J.; ZHANG, J. The effect of retreated coal wastes as filler on the performance of asphalt mastics and mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 9–17, 10 abr. 2019.

YU, G. M.; SONG, C. W.; ZOU, J. B.; WU, Y. X.; PAN, Y. Z.; LI, L.; LI, R.; WANG, P. S.; WANG, Y. L. Applications of online monitoring technology for tailings dam on digital mine. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 21, n. SUPPL. 3, p. s604–s609, 2011. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61648-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61648-3)>.

ZHANG, Y.; LING, T. C. Reactivity activation of waste coal gangue and its impact on the properties of cement-based materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117424, fev. 2020.

ZHAO, Y.; ZANG, L.; LI, Z.; QIN, J. Discussion on the Model of Mining Circular Economy. **Energy Procedia**, v. 16, p. 438–443, 2012. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 3 out. 2022.

ZHAO, Y.; ZHANG, J.; CHOU, C. L.; LI, Y.; WANG, Z.; GE, Y.; ZHENG, C. Trace element emissions from spontaneous combustion of gob piles in coal mines, Shanxi, China. **International Journal of Coal Geology**, v. 73, n. 1, p. 52–62, 2008.

ZHENGFU, B.; I, I. H.; L, D. J.; FRANK, O.; SUE, S. Environmental issues from coal mining and their solutions. **Mining Science and Technology**, v. 20, n. 2, p. 215–223, 2010. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60187-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60187-3)>.

ZHU, S.; CHERNI, J. A. Coal mining in China: policy and environment under market reform. **International Journal of energy sector management**, 2009.

ZOCHE, J. J.; DAMIANI, A. P.; HAINZENREDER, G.; MENDONÇA, R. Á.; PERES, P. B.; SANTOS, C. E. I. dos; DEBASTIANI, R.; DIAS, J. F.; ANDRADE, V. M. de. Assessment of heavy metal content and DNA damage in *Hypsiboas faber* (anuran amphibian) in coal open-casting mine. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 36, n. 1, p. 194–201, jul. 2013.

ZOCHE, J. J.; ROHR, P.; DAMIANI, A. P.; LEFFA, D. D.; MARTINS, M. C.; ZOCHE, C. M.; TEIXEIRA, K. O.; BORGES, G. D.; JESUS, M. M. DE; SANTOS, C. E. I. DOS; DIAS, J. F.; ANDRADE, V. M. DE. Elemental composition of vegetables cultivated over coal-mining waste. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 3 suppl, p. 2383–2398, out. 2017.