

INVESTIGAÇÃO DA PRESENÇA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS EM CINZAS DE CARVÃO A PARTIR DE BENEFICIAMENTOS FÍSICOS

Beatriz Pereira dos Santos¹

Márcio Zanuz²

Thiago Fernandes de Aquino³

Resumo: A busca por ETR tem se intensificado devido a sua variedade de aplicações como: dispositivos eletrônicos, armamento militar, refino de petróleo, entre outros. Diante de todo impacto envolvendo a mineração do carvão, atualmente tem se buscado alternativas para seus subprodutos, como as cinzas leves e pesadas. Pesquisas indicam que as cinzas de carvão possuem ETR presente em sua composição. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do beneficiamento físico na concentração de ETR em cinzas leves e pesadas, aplicando uma classificação de tamanho de partículas e separação magnética. A cinza leve apresentou os melhores resultados, principalmente no peneiramento com o uso da malha 106 μm , cuja primeira análise bruta resultou em uma quantia total de ETR de 564 ppm e com esta malha a amostra chegou em 882,91 ppm obtendo resultados promissores para a extração destes elementos.

Palavras-chave: Elementos terras raras. Beneficiamento. Cinzas de carvão

1 INTRODUÇÃO

A mineração integra o setor primário da economia e, de acordo com Mendonça (2021), “a mineração é responsável por quase 5% do PIB nacional e oferece produtos para variados tipos de indústrias, como: siderúrgicas, petroquímicas e metalúrgicas, além de insumos diretamente ligados ao agronegócio”. Com base neste dado, é possível mensurar sua grandeza, trazendo consigo a importância do estudo em sua metodologia de trabalho.

A região carbonífera do sul de Santa Catarina é uma das áreas com maior extração de carvão mineral do país. Ao decorrer da extração deste minério, no passado, surgiram diversos problemas de impacto ambiental, cujas soluções vêm sendo executadas e que, nos últimos tempos, tem se voltado a alternativas que busquem o aproveitamento dos resíduos de sua cadeia produtiva de forma a agregar valor.

¹ Graduanda em Engenharia de Minas, ano:2022 E-mail: pereiradossantosbeatriz1@gmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: marcio.zanuz@satc.edu.br

³ Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: thiago.aquino@satc.edu.br

Diante de todo impacto envolvendo a mineração do carvão, é importante a promoção de mudanças significativas, dentre elas aquelas que visem a utilização de seus resíduos de forma mais sustentável, ambiental e economicamente.

Atualmente as usinas termelétricas estão entre os maiores geradores de resíduos sólidos no mundo. As termelétricas a carvão geram toneladas de cinzas e a sua disposição inadequada causa a contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas. A principal aplicação destas cinzas é na fabricação e incorporação ao cimento, o que ainda ocorre em quantidade limitada (~30%) (MAGDALENA; FUNGARO, 2012).

Segundo Wu et.al., (2018) os Elementos Terras Raras (ETR) são encontrados em minerais metálicos estratégicos para o Brasil, e sua produção e demanda vêm se intensificando nas últimas décadas devido ao grande consumo promovido pelos setores de alta tecnologia (apud SOUZA; NASCIMENTO; GIESE, 2019).

Desta forma, a extração de ETR em cinzas de carvão precisa ser avaliada do ponto de vista técnico e econômico, sendo que esta atividade pode contribuir não só para a redução do impacto ambiental decorrente da disposição destes resíduos, mas principalmente como uma alternativa para o aumento da produção destes elementos estratégicos no mercado nacional. Devido a procura constante e importância por alternativas econômicas e ambientalmente sustentáveis, este trabalho busca avaliar amostras de cinzas de carvão provenientes da unidade termelétrica Jorge Lacerda - operada atualmente pela Diamante - localizada na cidade de Capivari de Baixo/SC, quanto a presença de elementos terras raras. Utilizou-se dos métodos de beneficiamento físico, separação granulométrica e separação magnética para verificação das concentrações de ETR.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO

A preocupação com os resíduos gerados através do setor de mineração é recente no Brasil, eles eram vistos apenas como subprodutos de minérios com alto valor econômico. Mas, ocorreu um crescimento desequilibrado destes resíduos gerando um grande impacto ambiental e na saúde pública (MATHIAS et.al., 2020).

A melhor maneira de se preservar um recurso não renovável é o seu consumo racional. No entanto, o tamanho da população e os padrões atuais de vida tornam a redução desse consumo mineral algo quase utópico (GOMES, 2021).

Para Mathias et. al., (2020) no meio ambiente os resíduos quando não tratados e destinados de forma correta, podem provocar a contaminação das águas subterrâneas, cursos d'água, solos e até mesmo a atmosfera através da emissão de gases.

Para Souza (2018), a preocupação com as consequências associadas ao descarte inadequado desses resíduos, muitos estudos e pesquisas surgiram com o intuito de buscar uma forma de descarte adequada ou mesmo a sua reutilização de forma sustentável para outros fins. Segundo Sabedot et. al., (2012), há unanimidade quanto à importância da caracterização físico-química e mineralógica dos resíduos visando às aplicações industriais.

Para o carvão, as cinzas são resíduos sólidos remanescentes gerados a partir da combustão do carvão mineral, mediante a eliminação da umidade e dos compostos voláteis presentes no carvão, seguido da oxidação do carbono devido a sua queima (IZIDORO, 2013 apud AQUINO, 2018).

2.2 CINZAS DE CARVÃO

Segundo Souza (2018), as usinas termelétricas (UTE's), fazem uso do carvão mineral para geração de energia elétrica, produzindo toneladas de resíduos advindos do processo de combustão do carvão, dentre os quais pode-se citar as cinzas leves, as cinzas pesadas, a escória e os resíduos do processo de dessulfuração.

No Brasil, estima-se que se produzam anualmente cerca de três milhões de toneladas de cinzas nas usinas termelétricas” (LEVANDOWSKI; KALKREUTH, 2009 apud MAGDALENA; FUNGARO, 2012). Sendo que o carvão brasileiro apresenta características particulares em relação aos carvões estrangeiros, contendo elevado teor de cinzas, sendo normalmente classificado como de baixo rank (FALLAVENA et al, 2013).

Para Sabedot et. al. (2012), existem características mineralógicas, físicas e químicas que são encontradas nas cinzas geradas através da queima do carvão nas usinas, estas características dependem da composição do carvão de origem, condições de combustão, eficiência do sistema de controle de emissões e os métodos de disposição utilizados. Os principais minerais encontrados nas cinzas de carvão identificados por difratometria de raios-X de acordo com a literatura são, quartzo, hematita, magnetita, mulita, anidrita, entre outros. Onde o quartzo e a mulita são os principais constituintes (IZIDORO, 2013).

Nas usinas termelétricas do Brasil e no mundo, as cinzas volantes correspondem cerca de 70% do total de resíduos gerados na combustão do carvão, enquanto que as cinzas pesadas somam em torno de 30%, devido a isso, o estudo voltado para aplicação

das cinzas volantes é mais amplo (IZIDORO, 2013 apud AQUINO,2018).

Segundo BROWN (2011), as cinzas pesadas são os resíduos da combustão que permanecem dentro da caldeira, até serem retiradas pelo fundo. Já as cinzas leves são formadas por partículas finas que são arrastadas pela parte superior da caldeira e são coletadas por sistemas de abatimento de partículas como filtro de mangas e precipitadores eletrostáticos.

No Brasil, as cinzas volantes são empregadas, de forma intermitente, como constituintes de concreto de cimento desde a década de 1960 (ROHDE, 2006). Entretanto, a taxa de produção de cinza gerada ultrapassa a taxa de utilização neste setor, fazendo com que novas aplicações para a mesma sejam estudadas e desenvolvidas, pois além do interesse industrial é, também, de relevância ambiental (IZIDORO, 2013 apud AQUINO,2018).

Há inúmeras aplicações para as cinzas de carvão como por exemplo para a produção de geopolímeros, adsorventes para gases de combustão, a conversão de cinzas em zeólitas e entre outras (AQUINO, 2018).

A seguir será apresentada a Tabela 1 com as propriedades químicas do carvão brasileiro de diferentes localidades.

Tabela 1: Propriedades químicas de carvões térmicos brasileiros.

Estado	Tipo	Umidade%	Cinzas (b.s) %	M.V (b.s) %	Enxofre e%	PCS (b.s) cal/g
RS	CE 3100	15	57		1	3100
RS	CE 3300	17	54	19,0	1,5	3300
RS	CE 3700	15	47	24,0	1,5	3700
RS	CE 4200	19	40	29,0	1,5	4200
SC	CE 4500	10	43	21,0	3,5	4500
RS	CE 4700	19	35	31,0	1,5	4700
RS	CE 5200	19	29	30,9	0,57	5200
SC	CE 5200	10	35	25,0	2	5200
RS	CE 5900	20	22	30,0	1,5	5900
PR	CE 6000	15	25	36,0	3,3	6000

Fonte: Adaptado de BROWN (2011).

2.3 ELEMENTOS TERRAS RARAS EM CINZAS DE CARVÃO (ETR)

Para Seredin et. al., (2013), existem métodos tradicionais para diminuir o impacto do carvão energético no meio ambiente como, processamento de carvão em combustíveis gasosos e líquidos, beneficiamento, entre outros. No entanto há outras maneiras mais sustentáveis e que podem contribuir para uma finalidade economicamente viável para as

cinzas, além da principal aplicação atual, a indústria cimenteira.

Segundo Hower et. al. (2016), a maioria dos compostos inorgânicos comuns de lantanídeos, como os fosfatos encontrados no carvão, tem temperaturas muito altas de fusão, ebulição e decomposição térmica, permitindo que eles se concentrem em subprodutos de combustão e gaseificação.

Para Mayfield e Lewis (2013), a ocorrência de concentrações vestigiais de metais estrategicamente importantes em carvão e cinzas de carvão é compreendida há décadas. No entanto, a economia do desenvolvimento desses recursos não era viável até recentemente. A demanda por ETR aumentou nos últimos anos devido ao seu uso crescente em inúmeras aplicações de alta tecnologia (CROW, 2011; MEYER BRÁS, 2011; PREINFALK MORTEANI, 1986 apud JORDENS, CHENG, WATERS, 2012).

Ainda segundo CESBRON, 1986; TRIFONOV e JORDENS, 1963; CHENG; WATERS, 2012, os minerais portadores de ETR podem ser diferenciados em vários grupos com base em seu conteúdo de ETR. Esses minerais podem ser identificados como minerais do tipo cério ou ítrio com base em se a distribuição dos lantanídeos no mineral faz parte dos subgrupos de terras raras "leves" ou "pesados".

Segundo Mayfield e Lewis (2013), os dados da Tabela 2 apresentam o teor de elementos terras raras a partir de análises em laboratório para cinzas de carvão nos depósitos dos EUA, Rússia, China e Oriente Médio. E as faixas de concentração medidas de carvão e cinzas volantes coletadas de usinas de energia nos EUA, Europa, México e Espanha.

Tabela 02: Média e Faixa de Concentrações (mg/kg) em Carvão Bruto, Cinzas de Carvão e Cinzas Volantes de Carvão.

Elementos	Carvão Bruto	Cinzas pesada de Carvão	Cinzas Volantes de Carvão
Ce	20,9	468,78	405-565
Dy	2,09	61,54	32,1-50,3
Eu	0,28	7,64	3,9-5,9
La	9,09	259,85	206-286
Nd	8,48	236,02	183-256
Pr	4,81	59,02	49,0-68,4
Tb	0,54	10,29	4,9-7,3
Y	8,18	408,34	191-259
Total ETR	54,9	1723	1213,6-1667,6

Fonte: Adaptado de Mayfield e Lewis (2013).

A faixa de concentrações medidas de carvão e cinzas volantes de carvão foram coletadas de usinas de energia nos EUA, Europa, México e Espanha.

2.4 APLICAÇÃO DE ELEMENTOS TERRAS RARAS

Segundo Massari e Ruberti (2013), os elementos terras raras, são uma família de 17 elementos da tabela periódica. O escândio e o ítrio, com propriedades físicas e químicas semelhantes, também estão incluídos nesta família.

Apesar de seu nome, a abundância de elementos terras raras na crosta terrestre é, na verdade, significativamente maior do que outros elementos comumente explorados, incluindo o grupo de platina e mercúrio (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 1992; TRIFONOV, 1963 apud JORDENS; CHENG; WATERS, 2012).

A China detém atualmente mais de 90% da produção global de elementos terras raras (Alonso et.al., 2012 apud FERREIRA; NASCIMENTO, 2013). Diante deste cenário, muitas empresas da área de mineração estão buscando novos depósitos de elementos terras raras que possam ser explorados e em paralelo, algumas minas antigas estão sendo reabertas (FERREIRA; NASCIMENTO, 2013). A seguir será apresentado na Tabela 3 as aplicações dos elementos terras raras.

Tabela 3: Apresenta algumas aplicações dos elementos terras raras.

Elemento Terras Raras	Aplicações
Cério (Ce)	Catálise (automóveis e refino de petróleo), cerâmicas, vidros, fósforos, pós para polimento.
Disprósio (Dy)	Cerâmicas, fósforos e aplicações nucleares.
Érbio (Er)	Cerâmicas, coloração de vidros, fibras óticas, lasers e aplicações nucleares.
Európio (Eu)	Fósforos.
Gadolínio (Gd)	Cerâmicas, vidros, detecção ótica e magnética, visualização de imagens em medicina.
Hólmio (Ho)	Cerâmicas, lasers e aplicações nucleares.
Lantânio (La)	Catálise automotiva.
Lutécio (Lu)	Cintiladores de cristal único.
Neodímio (Nd)	Catálise, filtros de infravermelho, lasers, ímãs permanentes, pigmentos.
Praseodímio (Pr)	Cerâmicas, vidros e pigmentos
Promécio (Pm)	Fósforos, miniaturas de baterias nucleares e dispositivos demedida.
Samário (Sm)	Filtros de micro-ondas, aplicações nucleares e ímãs permanentes
Térbio (Tb)	Fósforos.
Túlio (Tm)	Tubos de feixes eletrônicos e visualização de imagens médicas
Ítérbio (Yb)	Indústrias química e metalúrgica.
Ítrio (Y)	Capacitores, fósforos, radares e supercondutores.
Escândio (Sc)	indústria aeroespacial, aplicações nucleares e iluminação.

Fonte: Adaptado de Lapido-Loureiro, 2013, apud Ferreira e Nascimento, 2013.

Segundo Ferreira e Nascimento (2013), as aplicações de elementos terras raras são muito abrangentes, estando cada vez mais presentes no dia a dia. A demanda global por esses elementos tende a aumentar significativamente.

2.5 MÉTODOS DE SEPARAÇÃO FÍSICA

Os métodos de separação física estão sendo cada vez mais utilizados para o beneficiamento e possível enriquecimento de elementos terras raras em subprodutos de carvão. Esses métodos compreendem principalmente separação por tamanho de partícula, separação magnética e por densidade (LIN et. al., 2017).

2.5.1 SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Estudos de Dai et. al., (2014), confirmam que as concentrações de ETR nas cinzas de carvão aumentam à medida que as partículas de tamanho diminuem. Com base no artigo publicado por LIN et. al. (2017), a separação por tamanho de partícula é realizada usando um agitador de peneiras com uma combinação de peneiras de tamanho de malhas desejados.

Ainda para LIN et. al., (2017), o tempo para as amostras ficarem no peneiramento dependerá do tamanho das partículas e da quantidade de amostra carregada na peneira superior. Para um melhor fracionamento, no estudo citado, utilizou-se um agitador de peneiras com um vibrador eletromagnético de 5 a 7 peneiras de malhas específicas com as amostras secas para realizar o procedimento.

2.5.2 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

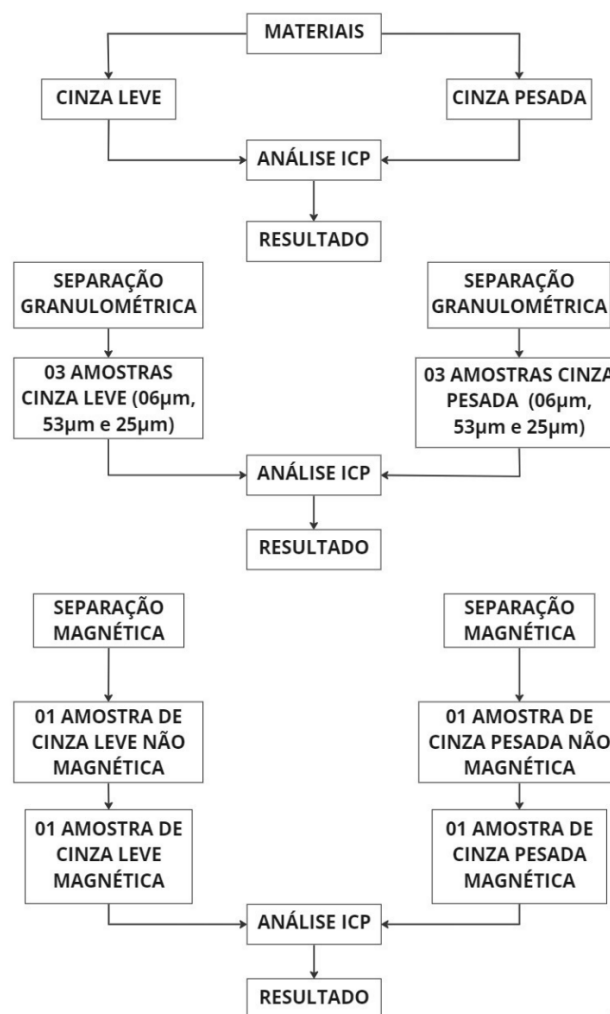
Para realizar a separação magnética, LIN et. al. (2017), utilizaram um eletroímã que ficou preso a um suporte e as amostras foram carregadas em um papel abaixo deste equipamento. A intensidade do campo magnético era ajustada manualmente para se obter quantidades suficientes para realizar as análises posteriormente.

Ainda segundo LIN et. al. (2017), as concentrações de frações de cinzas de carvão separadas magneticamente aumentam à medida que a suscetibilidade magnética diminui. Indicando que frações associadas a partículas não magnéticas são mais enriquecidas em elementos terras raras do que partículas magnéticas. Portanto, conclui que a remoção de minerais contendo ferro por uma simples configuração de separação magnética aumentaria ainda mais a concentração de elementos terras raras.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção serão apresentados os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para o desenvolvimento do procedimento experimental. Para o procedimento experimental utilizou-se uma amostra de cinza leve e de cinza pesada, retirada do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda - operado atualmente pela Diamante - localizada na cidade de Capivari de Baixo/SC. As atividades práticas de peneiramento foram realizadas no Laboratório SATC (LABSATC), situado no Centro Tecnológico SATC. A separação magnética das amostras foi realizada na empresa Mineração Nossa Senhora do Carmo, localizada na cidade de Morro da Fumaça/SC. A Figura 1 identifica as etapas realizadas no procedimento experimental.

Figura 1: Etapas do trabalho.



Fonte: Da autora (2022).

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

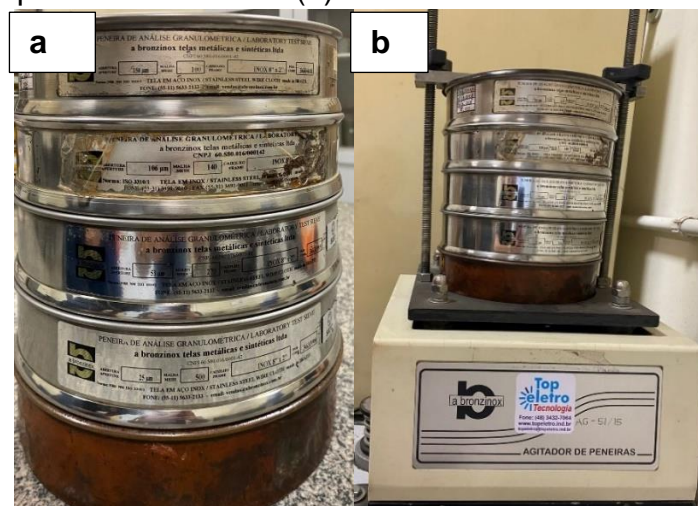
As amostras foram coletadas da termelétrica Jorge Lacerda e foram encaminhadas para a SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA, para serem submetidas a análise de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), para caracterização das amostras referente as concentrações de ETR. Posteriormente foram direcionadas para LABSATC para dar início ao beneficiamento físico.

3.2 SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para a separação por granulometria foi usado como referência o artigo - Enriquecimento de elementos de terras raras de carvão e subprodutos de carvão por separações físicas de LIN et. al., (2017).

Foram utilizadas 04 malhas de peneiras, sendo elas: 150 μm (100#), 106 μm (140#), 53 μm (270#), 25 μm (500#). O procedimento foi realizado separadamente para cada cinza, sendo 100g de cinza leve e 100g de cinza pesada, carregadas na peneira superior e posteriormente colocadas em um agitador de peneiras - modelo *a bronziinox* - por cerca de 90 minutos. As sequências das malhas montadas e o agitador de peneiras utilizados no procedimento podem ser vistos nas Figuras 2 a e b.

Figura 2: Peneiras montadas (a). Agitador de peneiras AG-51/15 (b).



Fonte: Da autora (2022).

Após realizado o procedimento por separação de partículas, foi dado início a pesagem de cada material retido ou passante, referente a cada malha utilizada, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Massas das amostras de cinza leve e cinza pesada Após peneiramento.



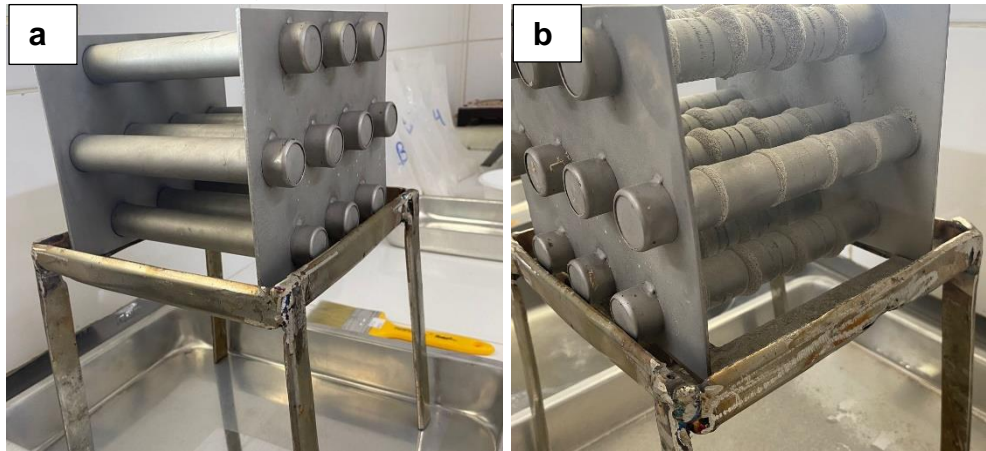
Fonte: Da autora (2022).

3.3 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

A separação magnética das cinzas de carvão foi realizada com o auxílio de um separador magnético, tipo grade com tripla fileira de tubos D1" em aço inox 304, sem defletores, imãs de NdFeB para 150°, acabamento jateado e medindo 190x200x150 mm c/ 9.000 Gauss.

Para um melhor aproveitamento utilizou-se de um suporte e bandeja, ambos em inox. Foi despejado o material através da grade magnética com movimentos que abrange toda a superfície do equipamento, vagarosamente, para fazer o efeito do magnetismo. O separador magnético utilizado, sem o material e com o material retido em sua grade, pode ser observado na Figura 4.

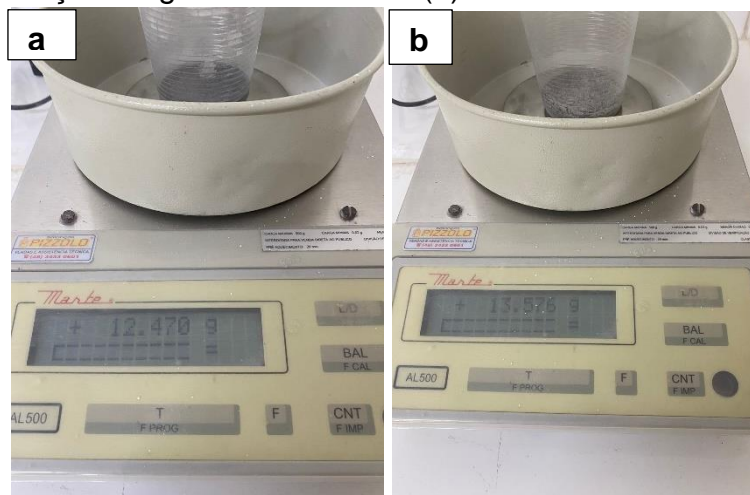
Figura 4: Separador magnético sem material (a). Material retido no separador magnético (b).



Fonte: Da autora (2022).

Após passar todo o material foi verificada a quantidade retida na grade, posteriormente. O processo de separação magnética foi repetido diversas vezes até coletar material suficiente para a análise subsequente. Este processo ocorreu para as amostras de cinzas leves e pesadas. Após realizado a separação, obteve-se duas amostras magnéticas de cinza leve e cinza pesada, a Figura 5 ilustra as amostras obtidas.

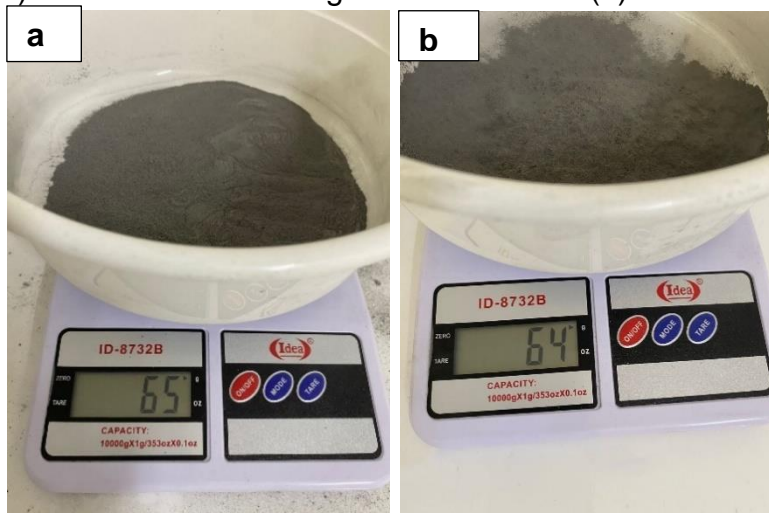
Figura 5: Fração magnética cinza pesada (a). Fração magnética cinza leve (b).



Fonte: Da autora (2022).

Procedeu-se também a coleta das amostras não magnéticas das cinzas leve e pesada que podem ser observadas na Figura 6 a seguir.

Figura 6: Amostra não magnética cinza pesada (a). Amostra não magnética cinza leve (b).



Fonte: Da autora (2022).

Após realizado a separação magnética, onde se obteve quatro amostras, sendo duas magnéticas e duas não magnéticas, elas foram enviadas para análise final por ICP no laboratório.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos das análises de ICP das amostras de cinza leve e cinza pesada brutas, ou seja, sem terem passado por nenhum procedimento, conforme metodologia proposta neste trabalho.

Tabela 4: Quantidade de ETR em ppm em amostras de cinza leve e cinza pesada.

Elementos	Cinza Leve		Cinza Pesada	
	ppm	Percentual %	ppm	Percentual %
Ce	165,07	29,26	149,08	29,77
Dy	14,15	2,50	12,43	2,48
Er	8,31	1,47	7,78	1,55
Eu	2,73	0,48	2,51	0,50
Gd	14,44	2,56	13,04	2,60
Ho	2,86	0,50	2,64	0,52
La	81,00	14,36	73,07	14,59
Lu	1,22	0,21	1,28	0,25
Nd	70,09	12,42	66,04	13,18
Pr	19,13	3,39	18,52	3,69
Sm	14,07	2,49	13,06	2,60
Tb	2,32	0,41	2,05	0,40
Th	31,04	5,50	27,05	5,40
Tm	1,23	0,21	1,17	0,23
U	14,53	2,57	11,99	2,39
Y	80,68	14,30	69,51	13,88
Yb	8,04	1,42	7,06	1,40
Sc	30,03	5,32	19,02	3,79
	564,00	100	500,72	100

Fonte: Laboratório SGS Geosol, (2022).

A partir desses resultados, é possível observar que há um percentual relevante de elementos terras raras encontrado nas cinzas de carvão, sendo elas leves e pesadas, podendo ser consideradas promissoras para a extração de ETR. Os rendimentos de cinzas variam significativamente dependendo do tipo de amostra, mas deve-se notar que ocorreu uma maior concentração, ou seja, o somatório foi maior nos resultados da cinza leve.

Conforme o artigo LIN et al., (2017), observou-se uma maior concentração na separação granulométrica nas malhas 106 μm , 53 μm e 25 μm , que foi motivo para selecioná-las para a análise neste estudo.

Após realizar o beneficiamento físico referido, com a cinza leve e a cinza pesada,

as amostras das malhas 106 μ m, 53 μ m e 25 μ m foram encaminhadas para uma análise por ICP na SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

Posteriormente foi elaborada a Tabela 5 com os respectivos percentuais retidos em cada peneira

Tabela 5: Valores obtidos após separação por partículas conforme cada malha utilizada.

Materiais	Cinza Leve (%)	Cinzas Pesada (%)
Retido - 150 μ m	13,92	13,62
Retido - 106 μ m	10,62	16,73
Retido - 53 μ m	24,03	32,96
Retido - 25 μ m	36,49	27,84
Passante - 25 μ m	13,61	7,53
Total (%)	98,67	98,68

Fonte: Da autora (2022).

A Tabela 6 identifica os resultados obtidos conforme cada malha utilizada em ppm. Sendo as nomenclaturas C.L (cinza leve) e C.P (cinza pesada).

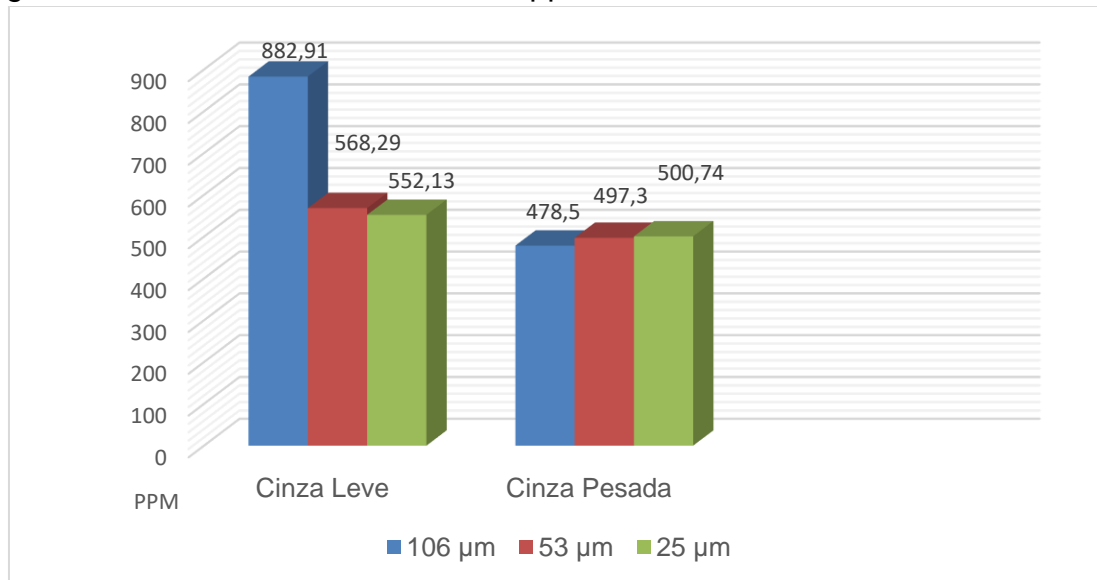
Tabela 6: Distribuição dos ETR em faixas granulométricas

Elementos	106 μm C. L	53 μm C. L	25 μm C. L	106 μm C. P	53 μm C.P	25 μm C.P
Sc	13,07	15,04	15,07	14,07	14,04	12,03
Ce	286,08	176,02	169,08	147,01	152,02	151,07
Dy	16,39	14,37	14,19	12,35	12,52	12,77
Er	7,06	8,43	8,71	6,81	7,73	7,86
Eu	2,72	2,91	2,76	2,32	2,45	2,57
Gd	20,97	14,73	14,95	12,22	13,00	13,35
Ho	4,33	2,87	2,96	2,32	2,57	2,67
La	81,01	85,00	81,03	70,04	73,02	73,06
Lu	1,03	1,27	1,15	1,01	1,05	1,12
Nd	238,5	77,08	73,06	63,05	67,06	65,08
Pr	73,07	21,08	19,94	17,41	18,38	18,28
Sm	15,00	16,01	15,07	13,05	13,08	13,09
Tb	2,72	2,42	2,34	1,98	1,97	2,07
Th	27,09	29,07	28,08	27,9	28,05	28,09
Tm	1,13	1,02	1,27	1,05	1,06	1,17
U	12,12	12,85	12,51	11,7	12,00	12,06
Y	70,43	77,66	78,15	65,23	67,17	72,92
Yb	7,04	8,03	8,03	7,00	7,07	7,07
Somatório (ppm)	882,91	568,29	552,13	478,05	497,03	500,74

Fonte: Laboratório SGS Geosol, (2022).

Na Figura 7 são apresentadas as concentrações de ETR total de cada malha utilizada, para possível análise comparativa.

Figura 7: Quantidade total de ETR em ppm conforme cada malha utilizada.



Fonte: Laboratório SGS Geosol, (2022).

Pode-se verificar, de acordo com a Tabela 6 que entre todas as concentrações de elementos terras raras, se destacou na amostra de cinza leve os elementos Cério (Ce), pertencente ao grupo dos lantanídeos com resultado de 286,8 ppm. Este elemento tem sua principal aplicação na indústria do vidro e também no campo de catalisadores. A concentração do elemento Neodímio (Nd), também pertencente aos lantanídeos, apresentou um resultado de 238,5 ppm, tendo como sua principal aplicação ímãs, catalisadores e lasers. Estes resultados foram obtidos na malha 106 µm que equivale a #140 mesh.

A Figura 7 apresenta a quantidade total de elementos terras raras presente em cada malha conforme cada tipo de cinza. Através deste gráfico é possível fazer uma análise comparativa entre os dois tipos de amostras de cinza pelo método de peneiramento. Nas referidas malhas, para a cinza leve obteve-se uma maior concentração de ETR do que nas cinzas pesadas. É possível observar que na cinza leve, na primeira malha (106 µm), ocorreu um aumento expressivo na concentração total de ETR, atingindo o valor de 882,91/ppm, que foi diferente das seguintes malhas (53 µm e 25 µm). Pode-se perceber que nestas malhas a concentração de elementos terras raras vão diminuindo à medida que o tamanho da malha da peneira diminui, ou seja, pode-se constatar

que para a amostra de cinza leve à medida que o tamanho da partícula diminui a concentração diminui também, ocorrendo assim gradativamente. Na revisão bibliográfica foi citado o trabalho de LIN et al., (2017), o qual em seus resultados a cinza leve procedeu diferentemente. Nas amostras de cinza leve que ele utilizou, a concentração aumentava na proporção que as partículas iam diminuindo. Com isso, pode-se observar que estes resultados vão sempre depender da composição de cada cinza, não podendo ser norma a decorrência dos resultados.

Na amostra de cinza pesada, transcorreu ao contrário. Na malha de 106 μm , foi onde obteve-se a menor concentração de ETR com 478,5 ppm e as seguintes malhas (53 μm e 25 μm) esta concentração foi aumentando. Nas análises de cinzas pesadas apresentadas é possível evidenciar que quanto menor o tamanho de partícula, maior a concentração destes elementos.

Na separação magnética obteve-se 2 amostras magnéticas e duas amostras não magnéticas de cinza leve e cinza pesada, conforme apresentadas na Tabela 7 em ppm. A Figura 8 apresenta a quantidade total de ETR em ppm de cada amostra resultante da análise do método de separação magnética.

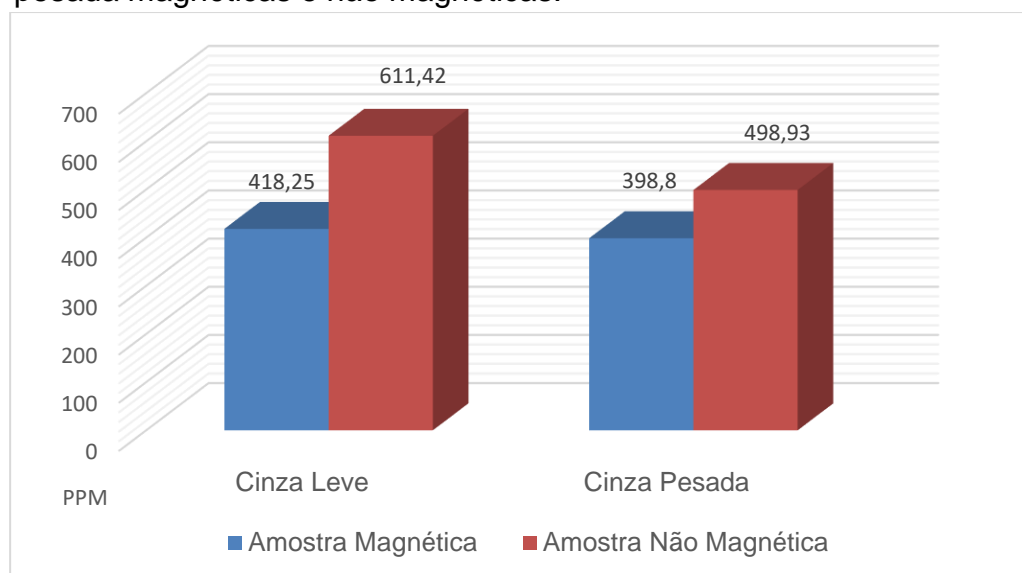
Tabela 7: Resultados amostras magnéticas e não magnéticas de cinzas leve e pesada.

Elementos	Magnética - C.L	Não Magnética - C.L	Magnética – C.P	Não Magnética – C.P
Sc	8,03	14,01	14,09	13,00
Ce	126,01	191,02	117,05	152,08
Dy	11,02	15,46	10,06	12,76
Er	6,56	8,52	6,05	7,29
Eu	2,23	2,87	2,00	2,44
Gd	11,47	16,41	10,41	12,75
Ho	2,28	3,34	2,13	2,42
La	59,07	84,09	56,02	74,06
Lu	0,92	1,25	0,89	1,09
Nd	55,09	98,05	51,00	67,04
Pr	15,02	27,89	14,08	18,31
Sm	11,06	15,06	11,00	14,00

Tb	1,83	2,43	1,67	2,13
Th	23,00	29,00	23,01	28,00
Tm	1,03	1,03	0,09	1,14
U	13,41	12,43	12,16	11,82
Y	61,48	78,02	58,01	69,18
Yb	6,04	8,02	6,02	7,08
Somatório	418,25	611,42	398,08	498,93

Fonte: Laboratório SGS Geosol, (2022).

Figura 8: Quantidade total de ETR em ppm das amostras de cinza leve e pesada magnéticas e não magnéticas.



Fonte: Laboratório SGS Geosol, (2022).

É possível observar nos resultados a relação dos elementos terras raras com as partículas não magnéticas. A análise de ICP mostrou que as concentrações em amostras magnéticas são significativamente inferiores aos das frações não magnéticas, o que indica que há uma maior concentração de ETR em frações não magnéticas.

Nesta análise de separação magnética a amostra de cinza leve não magnética se destacou devido a sua concentração de ETR de 611,42 ppm, o que indica que neste método, as cinzas leves e não magnéticas contribuem favoravelmente para resultados promissores.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados métodos de separação física que incluem separação granulométrica e separação magnética em amostras coletadas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda em SC. As amostras coletadas compreendem a cinza leve e cinza pesada, resíduos gerados na queima do carvão.

As amostras responderam diferentemente a separação por partículas. A malha 106 μm da cinza leve foi a que mais se destacou, pois, a cinza leve bruta, ou seja, sem ter passado por nenhum procedimento resultou em uma quantia total de ETR de 564 (ppm) e com esta malha a amostra chegou em 882,91 (ppm), expressando um aumento de 56,54 %, relevante para este trabalho. A concentração destes elementos na cinza leve foram diminuindo à medida que as partículas diminuem, mas na amostra de cinza pesada mostrou-se diferente, a concentração de ETR nestas cinzas aumentavam à medida que partículas decrescem, ou seja, ocorreu ao contrário. Para as análises de separação magnética, foi possível observar que novamente a amostra de cinza leve obteve uma maior concentração do que a cinza pesada.

Foram demonstradas correlações entre os elementos terras raras e as frações não magnéticas, com os resultados obtidos da separação magnética, para os dois tipos de cinza, a fração não magnética foi a que mais concentrou elementos terras raras, indicando que estes elementos tendem a se concentrar em partículas que não contém minerais ferrosos. Conclui-se que as cinzas leves possuem maior concentração do que as cinzas pesadas, podendo ter relação com o grau de liberação destes elementos dentro de cada amostra pesquisada.

Atualmente um dos maiores problemas das termelétricas está na produção destes subprodutos do carvão, pode-se concluir que estes métodos de extração física contribuem favoravelmente para uma maior concentração destes elementos, auxiliando na redução dos impactos ambientais que estes resíduos possuem e no aumento dos elementos terras raras para o mercado nacional. É importante salientar a necessidade de realizar novos experimentos e com mais amostras a fim de verificar se esses dados são consistentes e replicáveis em outras amostras.

REFERÊNCIAS

AQUINO, THIAGO FERNANDES. **SÍNTESE DE ZEÓLITAS DO TIPO X A PARTIR DE CINZAS VOLANTES E DE FUNDO DE CARVÃO MINERAL PARA A CAPTURA DE CO₂**. Orientador: Humberto Gracher Riella. 2018. 200 p. Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia Química) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO, FLORIANÓPOLIS, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/198363/PENQ0776-T.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 dez. 2022.

BROWN, MATTHEW THOMAS. **Caracterização Petrográfica e Química dos Carvões utilizados em usinas termelétricas brasileiras e as cinzas geradas no processo de combustão**. Orientador: wolfgang kalkreuth. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências, Programa de Pós graduação em Geociências, Universidade federal do rio grande do sul, Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38631/000824140.pdf?sequence=Acesso em: 15 mai. 2022>.

Dai S, Zhao L, Hower JC, Johnston MN, Song W, Wang P, et al. **Petrologia, mineralogia e química de cinzas volantes fracionadas por tamanho da usina de Jungar , Mongólia Interior, China, com ênfase na distribuição de elementos de terras raras .** Energia Combustível 2014; =Acesso em: 25 out. 2022.

FALLAVENA, Vera L.V. et al. **Caracterização detalhada e relato do uso do Material de Referência Certificado de carvão brasileiro**. Porto Alegre, 20 p. 2013. Disponível em: https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_C1_C2_C3/C3_ARTIGO_04.pdf. Acesso em: 15 maio 2022.

FERREIRA, Flávia Alves; NASCIMENTO, Marisa. **Terras Raras: aplicações atuais e reciclagem**. Série Tecnologia Mineral: CETEM/MCTI, Rio de Janeiro. 72 p. 2013.

GOMES, Ana Cláudia Franca. **APLICAÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO NA PRODUÇÃO DE TIJOLO DE SOLO-CIMENTO**. 2021. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Economia-Mineral-Brasileira-IBRAM-2020.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2022.

HOWER, James *et al.* **Notes on Contributions to the Science of Rare Earth Element Enrichment in Coal and Coal Combustion Byproducts**. Minerals, [S.L.], v. 6, n. 2, p.32, 31 mar. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min6020032>.

IZIDORO, J. C. **Síntese e caracterização de zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão**. 2013. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada A Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

JORDENS, Adam; CHENG, Ying Ping; WATERS, Kristian E.. **A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals**. Minerals Engineering, [S.L.], v. 41, p. 97-114, fev. 2012. Elsevier

BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687512003597?via%3Di>hub. Acesso em: 18 abr. 2022.

LIN, Ronghong; HOWARD, Bret H.; A. ROTH, Elliot; BANK, Tracy L.; GRANITE, Evan J.; SOONG, Yee. **Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations. Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations**, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 626 Cochran Mill Road, P.O. Box 10940, Pittsburgh, PA 15236, United States, p. 1-15, 8 abr. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236117303812#!>. Acesso em: 28 out. 2022.

MAGDALENA, Carina Pitwak; FUNGARO, Denise Alves. **Resíduos sólidos provenientes da queima do carvão de usina termelétrica**. Educação Ambiental em Ação, S.L, v. 11, n. 41, 04 set. 2012. Disponível em: <https://revistaea.org/artigo.php?idartigo=1338>. Acesso em: 04 abr. 2022.

MASSARI, Stefania; RUBERTI, Marcello. **Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies**. *Resources Policy*, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 36-43, mar. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.07.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420712000530?via%3Di> hub. Acesso em: 05 maio 2022.

MATHIAS, Rafael Vieira *et al.* **Gestão de resíduos como movimentos de interação com as práticas sustentáveis: um estudo realizado em uma empresa da construção civil pesada e na mineração de pedra britada**. Brazilian Journal Of Development, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 21395-21407, 27 abr. 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n4-347>. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/9246/7811>. Acesso em: 08 abr. 2022.

MAYFIELD, David B; LEWIS, Ari s. **Environmental Review of Coal Ash as a Resource for Rare Earths and Strategic Elements**. Lexington, 10 p. Abr. 2013. MENDONÇA, Tasso. A importância da mineração na economia brasileira. 2021. Diário do Comércio. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/opiniao/a-importancia-da-mineracao-na-economia-brasileira/#:~:text=A%20minera%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9%20respons%C3%A1vel%20por,de%20insumos%20diretamente%20ao%20agroneg%C3%B3cio..> Acesso em: 05 abr. 2022.

ROHDE, Dr. G, M. **Cinzas a Outra Metade do Carvão Fóssil – Nova Estratégia Para a Termeletricidade**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 4, 2013, Gramado. Livro de resumos... Gramado: Evangraf, 2013. p.3.

MORAES, Lucia Castanheira; SEER, Hildor José. **Terras raras. In: Terras raras.** [S. l.], 26 maio 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/terras-raras/>. Acesso em: 20 maio 2022.

SABEDOT, Sydney *et al.* **Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 15 p. 2012. Disponível em: https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_B4_B5_B6/B6_ARTIGO_01.pdf. Acesso em: 05 Abr. 2022.

SEREDIN, Vladimir V. *et al.* **Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technol.** Applied Geochemistry, [S.L.], v. 31, p. 1-11, abr. 2013. Elsevier
BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.01.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0883292713000176?via%3DIhub>. Acesso em: 05 mar. 2022.

SOUZA, Ana Carolina Sales Pereira de; NASCIMENTO, Marisa; GIESE, EllenCristine. **DESAFIOS PARA A EXTRAÇÃO SUSTENTÁVEL DE MINÉRIOS PORTADORES DE TERRAS RARAS.** Holos, [S.L.], v. 1, p. 1-23, 3 dez. 2019. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2019.8274>. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/periodicos/2019/CAN0010.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SOUZA, Henrique Petisco de. **USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL DA TERMELÉTRICA DO PECÉM COMO MATERIAL DE COBERTURA SECA DE DEPÓSITOS DE RESÍDUOS.** 2018. 160 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/35409/3/2018_dis_hpsouza.pdf. Acesso em: 05 mar. 2022.

SOUZA, NASCIMENTO & GIESE. **DESAFIOS PARA A EXTRAÇÃO SUSTENTÁVEL DE MINÉRIOS PORTADORES DE TERRAS RARAS.** Centro de Tecnologia Mineral, CETEM, [S. l.], p. 001-023, 1 maio 2019. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/8274/pdf>. Acesso em: 23 maio 2022.

Vera, Ysrael Marrero. **Separação de terras raras a partir da extração por solvente: revisão sobre o uso dos extratantes ácidos organofosforados / Ysrael Marrero Vera.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais, que sempre fizeram de tudo para que eu chegasse até aqui, pelo apoio e amor incondicional.

Agradeço ao meu namorado Fellipe por todo incentivo, paciência e ajuda durante a minha trajetória acadêmica.

Aos meus professores da UNISATC em especial ao coordenador do curso de Engenharia de Minas André Luiz Amorim Smaniotto.

Aos meus orientadores Marcio Zanuz e Thiago Aquino por todo suporte, ensinamentos, disponibilidade e paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Aos meus colegas de curso Cesar e Fábio, por compartilharem comigo tantos momentos e aprendizados e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.