



CARACTERIZAÇÃO DA CINZA LEVE PROVENIENTES DA QUEIMA DO CARVÃO MINERAL PARA POTENCIAL USO EM LEITO FIXO DE ADSORÇÃO

G. LUCENA^{1*}, A. R. C. MUNIZ¹, G. S. ROSA¹, G. V. SOARES¹, L. W. SOUZA¹

¹Universidade Federal do Pampa, Graduação em Engenharia Química

*e-mail: gabriellalucena.aluno@unipampa.edu.br

RESUMO - A cinza leve da combustão do carvão mineral é responsável por cerca de 60-70% (m/m) do total de resíduos da combustão, ocasionando em um impacto ambiental, justificando o estudo de novas aplicações para seu uso. A adsorção em leito fixo consiste na utilização de um material poroso, contendo sítios ativos capazes de reter moléculas de soluto de um efluente. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar o potencial uso das cinzas leves da combustão, como material adsorvente em leito fixo. Os resultados de granulometria a laser deram um diâmetro médio de partícula de 25,75 μm . Ensaio de FRX apresentaram altas concentrações de SiO_2 e Al_2O_3 . A análise de DRX mostrou que as principais fases presentes foram hematita e quartzo. No ensaio de massa específica real (ρ_{real}) e aparente (ρ_{bulk}) obteve-se 2,64 g/cm^3 e 0,71 g/cm^3 , respectivamente, com porosidade 0,73 para leito de partículas. A análise de MEV mostrou uma superfície com possíveis poros de adsorção. Para o BET, foi encontrada uma isoterma do tipo III e área específica de 24,44 m^2/g . Esses resultados, comparados a outros adsorventes não convencionais mostram que as cinzas leves apresentam potencial como adsorvente em misturas gasosas.

INTRODUÇÃO

As cinzas são subprodutos da combustão do carvão mineral, as quais são compostas por componentes não combustíveis de carvão, além de partículas não queimadas (incombusto), devido à combustão incompleta do carvão pulverizado. Elas podem ser classificadas como leves ou volantes e pesadas, dependendo da granulometria das partículas e da quantidade de carbono incombusto presente. Nessa última, as cinzas leves ou volantes possuem entre 10% e 20% de carvão incombusto, enquanto as pesadas entre 5% e 10% (IZIDORO, 2013; NARDI, 1975).

As cinzas leves (CL), correspondem a 60-70%(m/m) do total de resíduos da combustão do carvão, sendo considerada um

passivo ambiental, já que não é totalmente aproveitada (LOPES, 2011; IZIDORO, 2013).

As características físicas, químicas e mineralógicas variam de acordo com a composição do carvão de origem, as condições de combustão, o tipo e a eficiência do sistema de controle de emissões (ADRIANO, 1980). Em sua composição, as cinzas possuem uma diversidade de óxidos, como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 (SUNDSTRON, 2012), entre outros, sendo as principais fases minerais encontradas as de quartzo (SiO_2), mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), hematita (Fe_2O_3), gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4) (BAGATINI, 2007). Tais fases são formadas basicamente por compostos de silício e alumínio, baixos teores em ferro e menores quantidades de Mg, Ca, Ti, P, S, Na e K, sendo o teor de cálcio mais elevado, para cinzas provenientes de combustão com dessulfuração interna, em decorrência da adição de calcário.

Esse processo é recorrente no contexto brasileiro, devido à eficiência e baixo custo da matéria-prima (RODRIGUES, 2018).

Devido a proximidade da maior jazida de carvão mineral do Brasil, o Laboratório de Energia e Carboquímica, da Universidade Federal do Pampa, vem ao longo dessa década, estudando as cinzas em diversos processos, tais como produção de zeólitas e adsorção, com o objetivo de aproveitamento, uma vez que esse carvão é classificado como de alto *grade*, devido ao seu elevado teor de minerais.

Adsorção

A adsorção é uma técnica empregada na remoção de contaminantes, tendo como princípio a interação meio/partícula de um dado sistema, sendo determinada por processos de transferência de massa, sendo o soluto transferido de uma fase para outra. Assim, um componente de uma corrente fluida é removido da mistura e adsorvido na superfície de um material sólido (BARBOSA, 2018;).

A adsorção se classifica em dois principais tipos, de acordo com o fenômeno envolvido. São eles a adsorção física (fisissorção), onde as partículas que são separadas ficam retidas na superfície do material adsorvente devido, principalmente, às forças de *Van der Waals*, e a adsorção química (quimissorção), onde ocorrem ligações entre os átomos ou moléculas, que serão separadas da mistura, e as partículas do material adsorvente (CASTELLAN, 1978; MATOS, 2015).

Modelos de isotermas: Isotermas de adsorção são modelos matemáticos quantitativos os quais descrevem a relação entre a quantidade de gás adsorvido por uma superfície adsorvente em temperatura constante (ALLEONI, 1998).

O tipo I está associado ao modelo de Langmuir, caracterizado pela monocamada, com ligação adsorvato-adsorvente com o mesmo nível de energia e sem interação entre as partículas de adsorvato. Já no tipo II e IV os adsorventes, com variação de tamanhos de poros, permitem o avanço do processo de forma contínua, em uma adsorção de monocamada para multicamada, com a presença de condensação capilar. As isotermas

dos tipos III e V são relativamente raras, aparecendo quando as forças que originam a monocamada são fracas (OLIVEIRA, 2016).

Leito Fixo

O processo de adsorção gasosa pode se desenvolver em um sistema contínuo em que se utiliza uma coluna de leito fixo como sistema operacional, sendo frequentemente utilizado por ser um processo econômico e de boa eficiência no ramo da separação e purificação de produtos (JÚNIOR, 2020).

Tal coluna consiste em um cilindro oco, cujo volume interno é preenchido por um leito de partículas de material adsorvente com granulometria conhecida, sendo necessário analisar dados de comprimento do leito, vazão do fluido e concentração do adsorvato, para caracterização da operação (MARIA, 2016).

No leito fixo com adsorção contínua, importantes parâmetros são obtidos por meio de curva de ruptura a qual representa o movimento progressivo da zona de transferência de massa (ZTM) no leito (NASCIMENTO *et al.*, 2014; MELO, 2017).

O tamanho da ZTM é determinado através das interações adsorvente-adsorvato, do tamanho e forma do adsorvente, da quantidade de adsorvente no leito, da concentração de alimentação, da vazão de alimentação, e do tempo de residência do adsorvato no leito.

O material adsorvente utilizado neste processo é o responsável por reter impurezas, possuindo um grande potencial na utilização de limpeza e remoção de poluentes emergentes, tornando-se extremamente interessante ecologicamente.

Tem-se estudado coprodutos de processos industriais para a produção de materiais adsorventes, que proporcionem economia para o processo e agreguem valor aos materiais, que deixam de ser resíduos industriais (ANDRETTA, 2018; ALMEIDA, 2015; ROSSI, 2021).

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar o objetivo deste trabalho foi estudar o potencial uso das cinzas leves da combustão, como material adsorvente em leito fixo.

MATERIAIS E MÉTODOS

As CL foram doadas por uma termelétrica do município de Candiota - RS, retiradas do processo final da combustão do carvão mineral. Para fins de padronização do teor de umidade, foi feita a secagem das cinzas em estufa a 105°C, por 24 horas.

Para a caracterização do material, foram realizadas as seguintes análises com as CL: distribuição granulométrica, massa específica real e aparente, composição química por fluorescência de raios X, estrutura molecular e composição mineralógica por difratometria de raios X e morfologia por microscopia eletrônica de varredura. Após caracterização, o material de estudo foi aplicado no processo de adsorção.

Através da granulometria a laser (CILAS, 1190 Líquido), determinou-se o diâmetro e volume médio dos poros.

Para massa específica real, aplicou-se o um ensaio de picnometria gasosa, por variação da pressão de gás hélio. Já a estimativa da porosidade do leito, determinou-se através da Equação 1.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{real}} \quad (1)$$

ε = porosidade;

ρ_{real} = massa específica real;

ρ_{bulk} = massa específica aparente.

Com a finalidade de identificar a quantidade de elementos químicos presentes na amostra de CL, empregou-se a espectrometria de fluorescência de raios X, através do equipamento Panalytical, modelo Axios.

O estudo de estrutura molecular, foi determinado em espectrômetro Shimadzu RF-5301PC, em temperatura ambiente com 20 scans e 1,0 cm⁻¹ de resolução, utilizando uma faixa espectral de detecção de infravermelho de 150 cm⁻¹ a 4000 cm⁻¹.

A análise da CL foi realizada no Laboratório LFRX do Campus Bagé - UNIPAMPA, em ambiente controlado no Difratômetro de Raios X Rigaku ULTIMA IV, JP, utilizando os ângulos de varredura de 10° a 100° (2 θ).

Com auxílio do equipamento Zeiss - MA-10 e com as aproximações 500x, 100x, 200x, 1000x, 2000x e 3000x, tornou-se possível observar o tamanho de poros e suas magnitudes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra que as CL apresenta uma distribuição de partículas homogêneas. 10% das partículas permanecem retidas em 51,95 μ m, sendo que 50% ficam retidas em 22,57 μ m. O diâmetro médio de partículas foi apresentado como sendo 25,75 μ m.

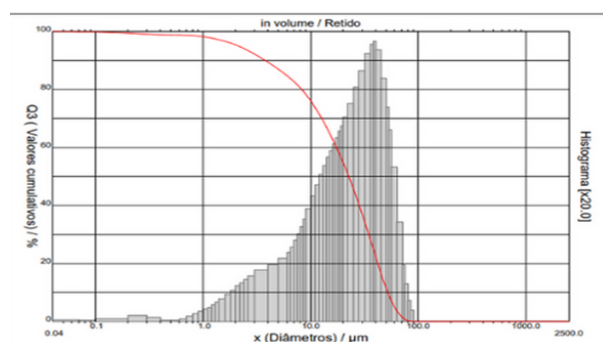


Figura 1 - Análise gráfica da granulometria laser.

Fonte: Autores, 2022.

No ensaio de massa específica real da CL, encontrou-se um valor de 2,64 g/cm³, apresentando um desvio padrão de 0,0012 g/cm³. Esse valor está de acordo com valores obtidos na literatura de 2,38 - 2,6 g/cm³ (MAGDALENA, 2015; GUTERRES, 2019; SILVA, 2019). Já para massa específica aparente, 0,716 g/cm³. Maia (2018) explica que em leitos com partículas de esfericidade variadas observam-se menores valores de porosidade quando comparados a leitos de partículas uniformes, em decorrência do deslizamento das partículas finas entre as maiores preenchendo os espaços vazios. Assim, para porosidade de leito de partículas foi encontrado valor de 0,73.

Ainda, Pinheiro (2005) reporta que valores como os encontrados para as CL são característicos de compostos contendo quartzo, cuja estrutura atômica é constituída por um retículo tridimensional de tetraedros SiO₄ ligado em uma estrutura bem compacta. Tal

característica é reafirmada nas análises de DRX e MEV.

O difratograma obtido pelo DRX foi plotado através do *software* Veusz e pode ser analisado através da Figura 2.

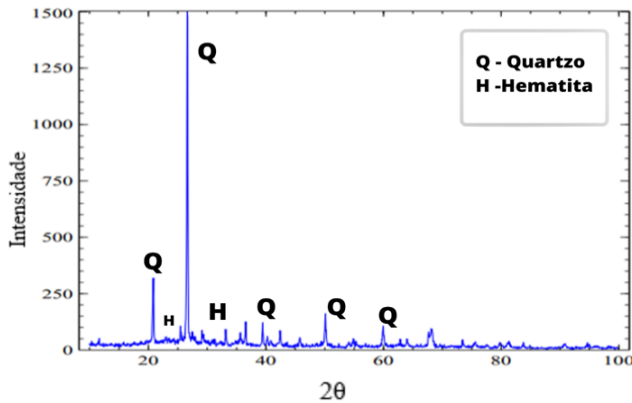


Figura 2 - Difratograma das CL.
Fonte: Autores, 2022.

A fase amorfa, a principal fase identificada foi a de quartzo, sendo característico de cinzas leves do carvão mineral (SANTA, 2017; ESTEVAM, 2018), e a menor fase cristalina encontrada foi a hematita, vindo de encontro com os resultados encontrados por Estevam (2018).

A morfologia das CL foi analisada por ensaio de microscopia eletrônica de varredura e é apresentado na Figura 3.

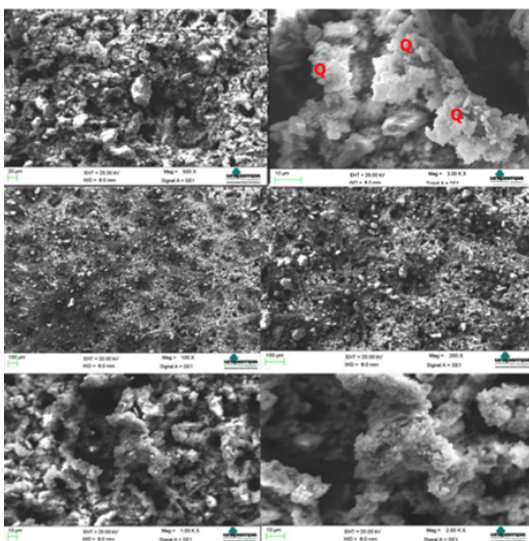


Figura 3 - MEV da cinza leve.
Fonte: Autores, 2022.

Tais imagens se assemelham a MEV's encontrados na literatura (ROCHA, 2010), onde é apresentado um material poroso, possuindo microporos e fases predominantes de quartzo e hematita. De acordo com Silva (2021) as cinzas leves da combustão caracterizam-se por apresentarem elevada porosidade. Tal afirmação pode ser observada através da análise de BET, conforme apresentado na Figura 4.

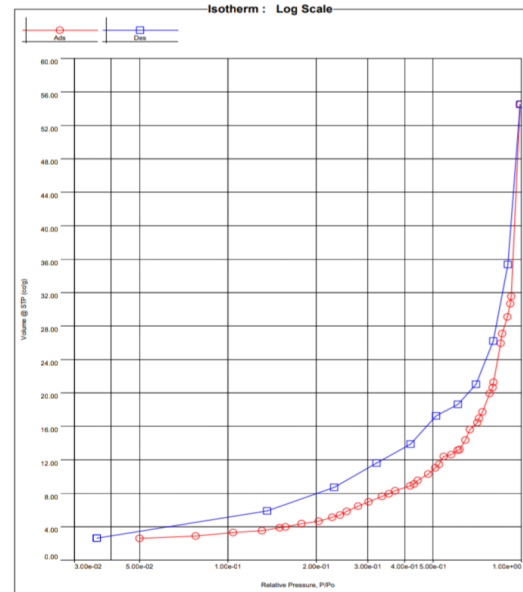


Figura 4 -Análise do BET para cinza leve.
Fonte: Autores, 2022.

A Figura 4 apresenta uma isoterma de tipo III, a qual é reportado na literatura como sendo uma isoterma relativamente rara, aparecendo quando as forças que originam a monocamada são fracas. Reis (2013) explica que esse tipo de isoterma é reversível. O que acontece neste tipo de processo é que as forças entre o adsorvente-adsorvato são menores que as forças entre o adsorvato-adsorvato, fazendo com que a adsorção seja maior após a formação da monocamada.

Além disto, para a área específica deste material foi encontrado um valor de 24,44 m^2/g , comparável a outros adsorventes não convencionais, como a semente de mamão, estudado por FOLETTO (2014), com valor de 0,23 m^2/g para área específica e lodo *in natura* estudado por SONAI (2012) que obteve valor de 6,39 m^2/g .

Na composição química das CL foram dispostos valores em porcentagem através da Tabela 1.

Tabela 1 - Composição Química da CL.

Composto	Quantidade (%)
SiO ₂	63,2
Al ₂ O ₃	14,2
Fe ₂ O ₃	4,6
CaO	4,6
MgO	2,9
SO ₃	2,8
K ₂ O	1,3
Outros	6,4

Fonte: Autores, 2022.

Nota-se que os compostos de SiO₂ e Al₂O₃ são majoritários no material, totalizando mais de 70% da amostra. Isso explica sinais de boa eficiência do processo, devido a alta concentração de compostos de aluminatos e silicatos.

Os valores encontrados são coerentes para cinzas de caldeira, sendo encontrado valores para SiO₃ entre 35-53% (ROCHA, 2009) e para Al₂O₃ valores entre 13-23% (ROCHA, 2011; SANTA, 2017).

O FTIR está disposto na Figura 5.

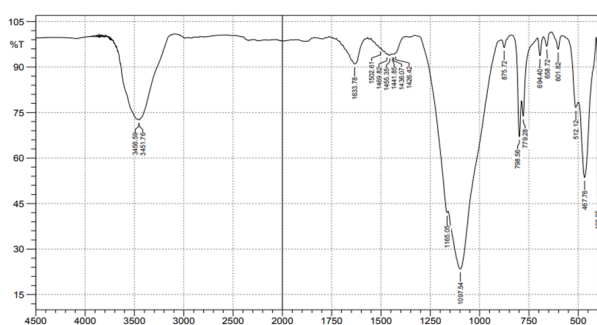


Figura 5 - FTIR da cinza leve.

Fonte: Autores, 2022.

Na banda de 3400, pode ser caracterizada por estiramentos de grupo O-H (PAVIA, 1996). Na região acima de 3400 cm⁻¹, é indicada como sendo um deslocamento do sinal da hidroxila no espectro, devido a pirólise do carvão no processo de combustão.

Já na região de 400 cm⁻¹, é característico para o aparecimento de sílica, tendo a vibração na região de 790 cm⁻¹ um alongamento simétrico de SiO₄. Ainda na região de 770-790 cm⁻¹, é constatado por Hernández-Calderon (1982) como presença de sílica devido à banda dupla nesta região.

A presença de bandas na região de 600 cm⁻¹ pode estar associada a deformação angular de compostos minerais (MANDEJÓVA, 2003), como ligações do tipo O-Si-O e O-Al-O.

CONCLUSÃO

A CL possui altas concentrações de SiO₂ e Al₂O₃, as quais foram reafirmadas nas análises de DRX, FTIR e FRX. Os resultados também mostraram um material com superfície porosa que, aliada a porosidade do leito indicam que a CL possui potencial aplicação no processo de adsorção de misturas gasosas.

NOMENCLATURA

BET - Brunauer Emmett Teller

CL - Cinzas Leves

Dp - Diâmetro médio das partículas

DRX - Difratômetros de Raios X

FRX - Fluorescência de Raios X

FTIR - Espectroscopia infravermelho por transformada de Fourier

M - Massa molecular

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

T - temperatura

UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa

ZTM - Zona de Transferência de Massa

ε - Porosidade

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, Luís Reynaldo Ferracciu e CAMARGO, O. A. e CASAGRANDE, J. C. Isotermas de Langmuir e de Freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados. *Scientia Agricola*, v. 55, n. 3, p. 379-387, 1998. Acesso em: 05 ago. 2022.
- ADRIANO, D. C. *et al*, Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review. *Journal of Environment Quality*,

- v. 9, n 3, 1980. Disponível em: doi:10.2134/jeq1980.00472425000900030001x. Acesso em: 07 out. 2021.
- ALMEIDA, B. Remoção do corante amarelo reativo B2R utilizando bagaço de cana-de-açúcar. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16446>. Acesso em: 04 out. 2021.
- ANDRETTA, F. Resíduo de vitivinicultura como material adsorvente para corante têxtil. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/234119/001101892.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 jan 2022.
- BAGATINI, M. C. et al. Estudo da fusibilidade das cinzas de carvões em função da composição química e mineralógica. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 3, n. 4, p. 52, 2007. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/tmm.00304009>. Acesso em: 01 nov 2021.
- BARBOSA, G. P. Operações da Indústria Química - Princípios, Processos e Aplicações. Editora Érica, 2018.
- BEJAR, H. K. A. Adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante el uso de filtros basados en minerales arcillosos. Tesis presentada para optar por el título de Magister de la Universidad de Buenos Aires en Ciencias Ambientales, 2019. Disponível em: [tesis_n6882_AranibarBejar.pdf](https://tesis.n6882.aranibarbejar.pdf) (uba.ar). Acesso em: 24 jul 2022.
- CASTELLAN, G.W. Adsorção sobre sólidos: Físico-Química. Livros Técnicos e Científicos, 3ª edição, 1978.
- DIAS, Y. R. ; RODRIGUES, R. ; MUNIZ, A.R.C. Caracterização prévia das cinzas volantes, coproduto da gaseificação do carvão mineral de Candiota - RS. 8º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2016.
- DIAS, Y. R.; RODRIGUES, R.; MUNIZ, A. R. C. Estudo da adsorção em leito fixo de cinzas volantes na remoção de compostos de enxofre do gás obtido na gaseificação do carvão. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2017.
- ESTEVAM, S. T. *et al.* Síntese de zeólita do tipo NaA a partir de cinzas leves de carvão mineral. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/SabrinaEstevam/publication/327899389_SINTESE_DE_ZEOLITA_DO_TIPO_NaA_A_PARTIR_DE_CINZAS_LEVES_DE_CARVAO_MINERAL/links/5bcdee2792851c1816b935ca/SINTESE-DE-ZEOLITA-DO-TIPO-NaA-A-PARTIR-DE-CINZAS-LEVES-DE-CARVAO-MINERAL.pdf. Acesso em: 21 fev 2022.
- FILHO, C. B. S. Síntese de uréia enriquecida com isótopo ¹³C e/ou ¹⁵N. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de São Paulo, Piracicaba, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64135/tde-03082011-141751/publico/Doutorado.pdf>. Acesso em: 14 fev 2022.
- FOLETTI, E. L. *et al.* Utilização de adsorvente alternativo de baixo custo para remoção do corante de tartrazina. Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2014.
- FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. Adsorventes naturais como controladores de poluentes aquáticos: uma revisão. *Revista Eixo*, v. 2, n. 1, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.19123/eixo.v2i1.105>. Acesso em: 18 jan 2022.
- GUTERRES, F. P. Adsorção de azul de metileno por zeólita sintetizada a partir das cinzas leves da gaseificação do carvão mineral de Candiota/RS. Tese (Mestre) - Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2019. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/ri/5170/1/Fernanda%20Pedroso%20>

- Guterres%20-%202019.pdf. Acesso em: 12 jan 2022.
- GUTERRES, F. P. et al. Estudo do potencial de adsorção de corante azul de metileno pelas cinzas leves e pesadas do processo de gaseificação do carvão mineral de Candiota. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2017.
- HERNÁNDEZ-CALDERON, I *et al* (1982). Espectroscopia do Infravermelho de Carvões Mineraiis Naturais e Tratados Termicamente. Revista Brasileira de Física, v. 12, n. 1, p. 161-188.
- IZIDORO, J. C. Síntese e caracterização de zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-03042013-092703/pt-br.php>. Acesso em: 22 dez 2021.
- JORGE, I. R. et al. Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em bagaço de cana de açúcar. XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, v. 2, n. 1, 2015. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/remoo-do-corante-azul-de-metileno-no-tratamento-de-efluentes-por-adsoro-em-bagaço-de-cana-de-acar-20637>. Acesso em: 18 jan 2022.
- LOPES, L. S. E. Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos. Tese (mestrado) - Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: https://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0913419_2011_pretextual.pdf. Acesso em: 25 out 2021.
- LUCENA, G; MUNIZ, A. R. C.; RODRIGUES, T. L. Caracterização físico-química do carvão incombusto separado das cinzas da gaseificação. VI Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2021, Porto Alegre. Disponível em: <https://proceedings.science/cbcm-2021/papers/caracterizacao-fisico-quimica-do-carvao-incombusto-separado-das-cinzas-l>aves-da-gaseificacao?lang=pt-br. Acesso em: 31 jan. 2022.
- MAGDALENA, C. P. Síntese de zeólitas de cinzas de carvão modificada por surfactante e aplicação na remoção de ácido laranja 8 de solução aquosa: estudo em leito móvel, coluna de leito fixo e avaliação ecotoxicológica. Dissertação (Doutorado) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-06032015-141323/>. Acesso em: 15 jan 2022.
- MARIA, M. E. Modelagem da adsorção de manganês em carvão de ossos bovinos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AEAP75/1/modelagem_da_adsor_o_de_mangan_s_em_carv_o_de_ossos_bovinos.pdf. Acesso em: 15 fev 2022.
- MATOS, S. P. D. Operações Unitárias - Fundamentos, Transformações e Aplicações dos Fenômenos Físicos e Químicos. Editora Saraiva, 2015.
- MAIA, C. L. S. Determinação de equação empírica para predição de perda de carga no módulo de leito fixo de aulas práticas. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 20187. Disponível em: [297208081.pdf](https://repositorio.ufpb.br/bitstream/handle/123456789/123456789/297208081.pdf) (core.ac.uk). Acesso em: 19 jul 2022.
- MELO, J. V. F. Desempenho de um reator de leito fixo operado em batelada sequencial no tratamento de efluente de indústria farmacêutica. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/TCC_2_-_J._V._F._MELO.pdf. Acesso em: 1 mar 2022.
- MUNIZ, A.R.C.; BERNARDES, L. H. . Caracterização de Cinzas Pesadas de Carvão Mineral para Utilização como Fonte de Aluminossilicatos na Síntese de Zeólitas. 14ª Mostra de Iniciação Científica, 2017.

- NAÇÕES UNIDAS. Concentrações de gases do efeito estufa atingem recorde. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2021/10/1767782>. Acesso em: 19 dez 2021.
- NARDI, J. V. Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura. Tese (Mestre) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/2751>. Acesso em: 22 jan 2022.
- NASCIMENTO, R. F. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará, 2014.
- OLIVEIRA, G. M. T. S. Roteiro tecnológico (roadmap) da captação, utilização e armazenamento de dióxido de carbono (CCUS) em Portugal. Tese (doutorado) - Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2016. Disponível em: <https://bdigital.ufp.pt/handle/10284/5636>. Acesso em: 16 dez 2021.
- PAVIA, D. L. *et al.* Introduction to spectroscopy. New York : Saunders Golden Sunburst Series : 1996.
- PINHEIRO, B. C. A. Análise microestrutural de porcelana tradicional. Tese (mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2005. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-de-Bruno-UENF.pdf>. Acesso em: 22 fev 2022.
- RIBEIRO, P. *et al.* Caracterização física de cinzas pesadas e leves provenientes da gaseificação do carvão mineral de Candiota/RS visando aplicação industrial. Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2017.
- ROCHA, C. A. F. J. *et al.* Caracterização de cinza leve de caldeira e possibilidade de uso industrial. 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2010, Foz do Iguaçu. Disponível em: https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/54/01-016.pdf. Acesso em: 31 jan. 2022.
- RODRIGUES, I. C. P. Dessulfurização de gases de combustão de carvão por absorção com lama de cal residual da indústria de papel e celulose. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://epqb.eq.ufrj.br/download/dessulfurizacao-de-gases-de-combustao-de-carvao-por-absorcao-com-lama-de-cal-residual.pdf>. Acesso em: 12 jan 2022.
- ROSSI, E. *et al.* Serragem de eucalipto e bagaço de cana: adsorventes naturais para remoção de corantes residuais da indústria têxtil. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 13, n. 1, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/17607/209209214276>. Acesso em: 10 jan 2022.
- SANTA, R. A. B. *et al.* Avaliação das propriedades das cinzas leves e pesadas para produção de geopolímeros: estudo comparativo. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2017. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/ANAIS/CBCM2017/PDF/CBCM2017-0126.PDF>. Acesso em: 21 fev 2022.
- SILVA, N. S.; LOPES, F. D. Caracterização de cinzas volantes de carvão mineral para aproveitamento em matrizes cimentícias. Open Science Research III, vol 3, 2021. Disponível em: DOI:1037885/220308164. Acesso em: 19 jul 2022.
- SILVA, E. O. *et al.* Avaliação do Potencial de Adsorção do Corante Azul de Metileno pela Cinza Leve Proveniente da Gaseificação do Carvão de Candiota - RS. Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2017.
- SILVA, L. S. Utilização de zeólita provenientes das cinzas leves do carvão mineral de Candiota - RS como peneiras moleculares para a desidratação do etanol. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2019. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/handle/riu/4621>. Acesso em: 15 jan 2022.

SONAI, G. Ativação de adsorvetes carbonosos para a remoção de corantes de eluentes têxteis. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em : <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/100537>. Acesso em: 20 jun 2022.

SUNDSTRON, M. G. Caracterização e avaliação das cinzas da combustão de carvão mineral geradas na região do baixo Jacuí-RS. Tese (Mestrado) - Centro Universitário La Salle, Canoas, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unilasalle.edu.br/bitstream/11690/550/1/mgsundstron.pdf>. Acesso em: 20 jan 2022.