

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRENDA KARINE DOS SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE NA
POROSIDADE DOS CARVÕES PRODUZIDOS A PARTIR DE OSSOS SUÍNOS**

TOLEDO

2025

BRENDA KARINE DOS SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE NA
POROSIDADE DOS CARVÕES PRODUZIDOS A PARTIR DE OSSOS SUÍNOS**

**STUDY OF THE INFLUENCE OF PYROLYSIS TEMPERATURE ON THE
POROSITY OF CHARS PRODUCED FROM SWINE BONES**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Tecnólogo de Tecnologia em Processos Químicos da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador(a): Gilberto da Cunha Gonçalves

TOLEDO

2025



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRENDA KARINE DOS SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE NA
POROSIDADE DOS CARVÕES PRODUZIDOS A PARTIR DE OSSOS SUÍNOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Tecnólogo de Tecnologia em Processos Químicos da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 18 de junho de 2025

Gilberto da Cunha Gonçalves
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Camila Vargas Neves
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Tamires Roberta Damascena Dos Santos
Mestre
Instituto Federal do Paraná

OBS: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de
Tecnologia em Processos Químicos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gilberto da Cunha Gonçalves, pela sabedoria e paciência com que me guiou nesta trajetória. Por todos os ensinamentos e direcionamentos que certamente levarei para a vida.

Agradecer a Tamires Roberta Damascena dos Santos, a qual nos permitiu utilizar todo o material já preparado, contribuindo grandemente com o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de deixar registrado também, o meu agradecimento à minha mãe Marlene Ap. F. B. dos Santos que me ajudou muito com as crianças tornando essa jornada menos cansativa, e também ao meu pai Noel Ap. A. dos Santos por todo apoio e palavras de motivação.

Deixo também meu agradecimento todo especial ao meu esposo Igor Fonseca Rodrigues que segurou a minha mão e as minhas lágrimas e esteve o tempo todo ao meu lado. Agradeço também e principalmente aos meus filhos Suêny e Heitor, que são minha motivação diária.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura de pirólise na porosidade dos carvões produzidos a partir de ossos suínos. A pirólise foi realizada em diferentes temperaturas (450 °C, 550 °C, 650 °C, 750 °C e 850 °C), e os carvões obtidos foram caracterizados quanto à área superficial específica, volume total de poros, volume de microporos, adsorção de iodo e de corante têxtil. Os resultados demonstraram que todos os carvões apresentaram estrutura predominantemente mesoporosa, com isoterma do tipo IV e histerese do tipo H3. A temperatura de 650 °C destacou-se por apresentar os melhores resultados de área superficial específica (134,3 m² g⁻¹) e volume de poros (0,255 cm³ g⁻¹), sendo comparável ao carvão comercial de ossos bovinos. As análises por MEV confirmaram a estrutura porosa desenvolvida nos carvões. Os dados obtidos indicam que o carvão de ossos suínos tem potencial para aplicação em processos de adsorção, representando uma alternativa viável e sustentável para o aproveitamento de resíduos da indústria suinícola.

Palavras-chave: isoterma; área superficial; volume de poros; adsorção.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of pyrolysis temperature on the porosity of chars produced from swine bones. Pyrolysis was carried out at different temperatures (450 °C, 550 °C, 650 °C, 750 °C, and 850 °C), and the resulting chars were characterized in terms of specific surface area, total pore volume, micropore volume, iodine adsorption, and textile dye adsorption. The results showed that all chars exhibited a predominantly mesoporous structure, with type IV isotherms and H3-type hysteresis. The temperature of 650 °C stood out by presenting the best results for specific surface area ($134.3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) and pore volume ($0.255 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$), being comparable to commercial bone char from bovine sources. SEM analysis confirmed the porous structure developed in the chars. The obtained data indicate that swine bone char has potential for application in adsorption processes, representing a viable and sustainable alternative for the utilization of waste from the swine industry.

Keywords: isotherm; surface area; pore volume; adsorption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Farinha de ossos suínos	17
Figura 2 — Estrutura interna da porosidade dos ossos	17
Figura 3 — Aspecto de MEV de cristais de hidroxiapatita.....	18
Figura 4 — Isotermas de adsorção conforme IUPAC.....	25
Figura 5 — Classificação dos loops de histereses	29
Figura 6 – Micrografias obtidas no MEV: (a) osso suínos antes da pirólise, (c) carvão de ossos suínos pirolisados a 650 °C (SBC-650) e (e) carvão comercial de ossos bovinos (BC). A imagem a direita representa uma ampliação da área destacada.....	35
Figura 7 – Isotermas e Adsorção de N₂ dos Carvões Produzidos em Diferentes Temperaturas.....	36
Figura 8 — Volume cumulativo de poros	38
Figura 9 — Influência da temperatura de pirólise na área superficial específica, no volume total e no diâmetro médio de poros	40
Figura 10 — Relação entre área superficial específica e a adsorção de iodo e corante RB5	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.1.1	Objetivos específicos.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Produção de proteína suína no Brasil e na região oeste do Paraná	15
2.2	Resíduos Procedentes do Abate	16
2.3	Estrutura dos Ossos Suíno	17
2.4	Pirólise	19
2.5	Carvão de Ossos Pirolisados	21
2.5.1	Aplicações do Carvão Ativado de Ossos.....	22
2.6	Aspectos Morfológicos da Porosidade em Sólidos	23
2.6.1	Isotermas de Adsorção.....	24
2.7	Porosidade dos Carvões de Ossos	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Preparo	32
3.2	Pirólise	32
3.3	Caracterização	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A indústria de proteína suína contribui fortemente para a economia. A produção mundial de suínos foi de 115,6 milhões de toneladas em 2024. O Brasil ocupa um lugar de destaque, sendo o 4º maior produtor de carne suína do mundo, com uma produção aproximada de 5,36 milhões de toneladas (ABPA, 2024). Em contrapartida, são gerados milhões de toneladas de resíduos.

Os principais aspectos de impacto ambiental das indústrias de carne e derivados, relacionam-se ao grande consumo de água, energia, geração de efluentes e subprodutos compostos principalmente por ossos, sangue, vísceras, couro e sebo. Grande parte dos resíduos gerados emitem odores desagradáveis sendo um aspecto muito específico e peculiar necessitando de operações e processamento adequado (Sousa e Lima, 2022).

Atualmente existem diversos meios desenvolvidos para dar uma destinação aos resíduos e subprodutos como: compostagem, incineração, graxarias e alimento para nutrição animal, porém, apresentam algumas deficiências como: emissão de gases, odores e longos tempos de processamento. Comparando-se a pirólise com os métodos convencionais, a mesma se mostra uma alternativa muito favorável, visto que tem um tempo de processamento mais curto, destrói microrganismos patogênicos e ainda se obtêm produtos como gás, carvão e bio-óleo para posterior utilização (Zhang *et al.*, 2018).

Nas últimas décadas, vários estudos referentes ao carvão de ossos têm demonstrado um grande potencial adsorvente podendo ser utilizado na remoção de em poluentes como compostos orgânicos, metais pesados e remoção de corantes. (Gomes *et al.*, 2023; Barbosa, 2022; Rojas-Mayorga *et al.*, 2015; Vieira *et al.*, 2008; Tovar-Gómez *et al.*, 2013; Pappis *et al.*, 2020; Mesquita, 2016; Guedes *et al.*, 2005).

Santos (2022) realizou um estudo sobre o reaproveitamento de resíduos de ossos suínos provenientes da agroindústria e verificou que é possível preparar e produzir carvão a partir desse material. A autora também concluiu que o reaproveitamento dos ossos é viável e que o carvão obtido apresenta capacidade de adsorção, configurando-se como um produto de valor agregado. Entretanto não foi avaliado a porosidade dos carvões produzidos em diferentes temperaturas.

1.1 Objetivo Geral

Estudar a influência da temperatura de pirólise na porosidade dos carvões produzidos a partir de ossos suínos.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliar a porosidade dos carvões de ossos produzidos em diferentes temperaturas de pirólise usando as isotermas de fisissorção de N₂.
- Relacionar a Área Superficial Específica dos carvões de ossos com a adsorção de iodo e corante têxtil.
- Comparar a porosidade e os aspectos morfológicos dos carvões de ossos suínos com um carvão comercial de ossos bovino.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção de proteína suína no Brasil e na região oeste do Paraná

A produção de suínos, no Brasil e no Estado do Paraná, iniciou-se como uma prática tradicional em pequenas propriedades rurais. O desenvolvimento da atividade, nos últimos anos, tem resultado na transformação produtiva e tecnológica da agroindústria. Os padrões internos e externos, sobre o processo produtivo e de mercado, envolvem produção, fornecimento de material genético, alimentação e rastreio das práticas de manejo que garantam um cronograma rigoroso da produção. Contudo, esse processo não assegura uma produção isenta de riscos ambientais, cada vez mais, vem sendo implementados projetos de gestão ambiental integrada que visam amenizar os impactos ambientais (Alves *et al.*, 2023; Roesler *et al.* 2007).

A carne suína é uma das mais consumidas em todo mundo, visto que a partir desta fonte de proteína é possível se obter diversos produtos embutidos e industrializados que possuem grande importância econômica em vários países. No Brasil os avanços da tecnologia e automação do processo produtivo e industrialização, tem ocasionado um aumento no consumo interno e no mercado internacional (Sousa e Lima, 2022; Souza *et al.*, 2016; Alves, 2008).

No mundo todo são produzidos em média 115,6 milhões de toneladas de carne suína (ABPA, 2024). O Brasil ocupa o quarto lugar como maior produtor dessa proteína animal, com uma média produtiva de 5,36 milhões de toneladas ao ano. O consumo interno é de aproximadamente 76,15% desta produção, sendo o Paraná o terceiro estado que mais abate suínos: 14,3% em 2022 e 14% da produção em 2021 (ABPA, 2022; 2023).

No Paraná a suinocultura está presente desde o começo da colonização, principalmente na região oeste. As famílias aproveitavam-se desta atividade para consumo próprio, vindo a tornar-se uma fonte de renda familiar a região passou a ser uma referência ao agronegócio (Alves, et al 2008).

Segundo Santos (2025), na última década, os produtores de suínos do Paraná mantiveram um crescimento contínuo, fazendo com que a produção de suínos aumentasse de 6,9 milhões em 2014 para 12,4 milhões de suínos em 2024. Esse

crescimento foi de 79%, superando a média nacional, que teve um aumento de 55% nesse período.

A região Oeste do Paraná, aparece em destaque visto que a mesma contribui com cerca de um quarto do valor bruto da produção agropecuária do Estado do Paraná. O município de Toledo ocupa a liderança na produção de suínos no Brasil (IBGE, 2023). No ano de 2023, foram registrados cerca de 899 mil suínos abatidos no município, o que reafirma sua posição de destaque no cenário nacional, tanto em quantidade quanto em qualidade da produção. Ainda segundo dados da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB), em 2024 Toledo permanece liderando o agronegócio por oito anos consecutivos, com a suinocultura movimentando cerca de 40% do valor bruto da produção pecuária do município.

2.2 Resíduos Procedentes do Abate

A partir do abate para obtenção de carne e derivados, originam-se vários resíduos, que podem resultar em problemas graves caso não sejam administrados corretamente, pois a grande maioria é extremamente putrescível e caso não sejam processados rapidamente podem gerar odores. Em pequenas empresas de abate, o gerenciamento de resíduos pode ser crítico, pois as mesmas carecem de recursos, pois o processamento desses resíduos internamente é inviável (Comper, 2022).

No processo de produção/industrialização da carne, geram-se resíduos como: gorduras, restos de emulsões, couros, ossos, aparas de carne, tripas, sangue, cascos, chifres, gorduras e algumas partes condenadas pela inspeção sanitária. Todos os subprodutos gerados devem ser processados pelas graxarias, que podem ser anexas aos frigoríficos ou unidades independentes. Elas são responsáveis por transformar estes resíduos em novos produtos como: sebo, gordura, farinha de carne e ossos. Também existem graxarias que produzem o adubo organomineral a partir de ossos (Comper, 2022).

Apesar de existirem maneiras de processamento destes resíduos, cidades com abatedouros de pequeno porte, acabam por não ter estrutura para comportar uma graxaria, destinando os seus resíduos sólidos para lixões e aterros sem o devido controle sanitário, o que agrava ainda mais os problemas ambientais. Entretanto, o processamento e destinação destes subprodutos dependem de local adequado, logística, existência de mercado e outras operações (Comper, 2022).

Os resíduos gerados em abate possuem um alto teor de nutrientes, sendo assim, boa parte é destinada a produção de alimentos para animais. Os ossos suínos normalmente são utilizados para produção de farinha de ossos. Na Figura 1 pode-se observar a farinha de ossos que é utilizada como aditivo para nutrição animal. Entretanto, podem ser utilizados em projetos e pesquisas para a obtenção de carvão por processo de pirólise (Iriarte-Velasco *et al*, 2016).

Figura 1 — Farinha de ossos suínos

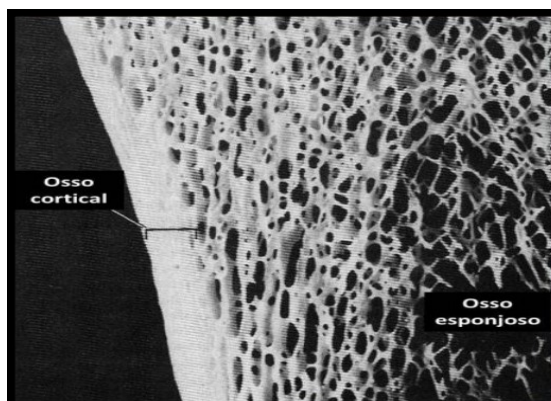


Fonte: ABRA, 2022

2.3 Estrutura dos Ossos Suíno

Existem dois tipos de tecido ósseo. O esponjoso que possui uma porosidade alta e é encontrado nas extremidades de ossos e vértebras, já os ossos compactos que apresentam maior dureza e densidade, tem porosidade baixa e encontram-se nos ossos mais longos sendo a parte mais externa que serve como proteção de todos os ossos (Graaff, 2003). Na Figura 2 pode-se observar a estrutura do tecido esponjoso e compacto.

Figura 2 — Estrutura interna da porosidade dos ossos

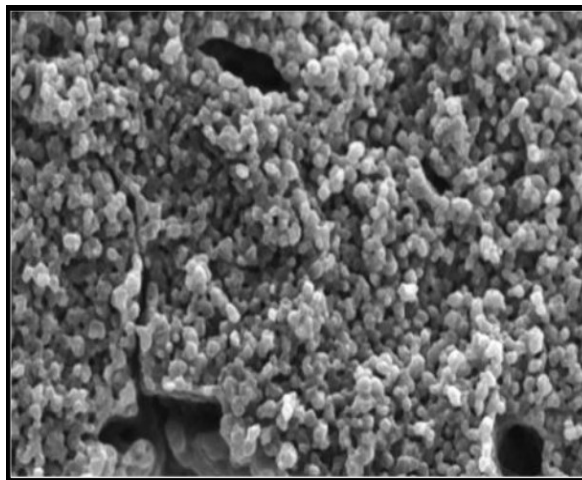


Fonte: JUDAS *et al.*, 2012

Em sua composição, os ossos contêm cálcio, fósforo e pequenas quantidades de sódio, potássio e magnésio. Em sua matriz extracelular estão presentes o colágeno, outras proteínas e água (Souza, 2010). Segundo Allegretti (2009), a matriz óssea possui uma composição mineral complexa. Entre os constituintes destaca-se a hidroxiapatita, substância essencial para conferir resistência e estabilidade estrutural ao tecido ósseo. Quimicamente, trata-se de um fosfato de cálcio cristalino, com fórmula $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, que se deposita de maneira organizada na matriz extracelular, contribuindo diretamente para a mineralização óssea e a capacidade do osso de suportar cargas mecânicas.

A Figura 3 mostra uma imagem por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da organização e distribuição dos cristais de hidroxiapatita da matriz óssea. É possível observar também algumas lacunas e canalículos ósseos sendo eles responsáveis também por nutrir os osteócitos, que ficam presos na matriz, a qual não permite a adição de substâncias (Judas *et al.*, 2012).

Figura 3 — Aspecto de MEV de cristais de hidroxiapatita



Fonte: JUDAS *et al.*, 2012

Ainda, de acordo com Allegretti (2009), a estrutura cristalina da hidroxiapatita, permite diferentes substituições iônicas, influenciando diretamente nas suas propriedades físico-químicas e ampliando suas possibilidades de aplicação, tendo uma composição estrutural marcada por aspectos morfológicos e químicos, o que viabiliza sua transformação em compostos bioativos através de processos térmicos, como a pirólise.

2.4 Pirólise

A pirólise trata-se de um processo de transformação de uma biomassa ou matéria orgânica em outras substâncias, através do aquecimento, onde ocorre degradação térmica de materiais orgânicos na ausência de oxigênio. O calor fornecido à biomassa provoca a quebra de suas ligações químicas que alteram suas interações físicas, promovendo a degradação da estrutura molecular.

A pirólise pode ser classificada em duas categorias, uma delas é voltada a análise detalhada da composição da matéria-prima, por meio do estudo dos subprodutos gerados no processo, sendo essa a pirólise analítica. A outra abordagem é a pirólise aplicada que tem caráter mais prático e concentra-se na obtenção direcionada dos produtos resultantes do processo, de acordo com finalidades específicas definidas. Como resultado desse processo, são liberadas substâncias ricas em carbono passíveis de aproveitamento como fontes energéticas ou matérias-primas na indústria (Ferreira, 2014; Bridgwatwer, 2003).

De acordo com Ferreira (2014), na primeira etapa de reação da pirólise acontece a quebra térmica das ligações. Nessa fase inicial, surgem compostos que podem passar por novas rupturas em meio condensado, originando substâncias voláteis adicionais. A decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio é uma etapa inicial comum nos processos de combustão e gaseificação, antecedendo reações de oxidação total ou parcial dos compostos formados.

A forma como essa etapa se desenvolve depende fortemente das condições operacionais. Por exemplo, quando se utiliza uma temperatura mais baixa combinada com um tempo de exposição mais prolongado dos vapores, tende-se a obter uma maior quantidade de carvão vegetal. Já sob condições de calor elevado e longos períodos de residência, a biomassa é predominantemente convertida em gases. Por outro lado, se o objetivo for maximizar a produção de líquidos, o ideal é trabalhar com temperaturas intermediárias e tempos curtos de permanência dos produtos gasosos. Assim, o equilíbrio entre temperatura e tempo de residência é crucial para direcionar o processo conforme o tipo de produto desejado: carvão, gás ou líquido (Bridgwater, 2003; Almeida, 2008).

A pirólise lenta ou carbonização, ocorre em faixas de temperatura que vão de 300°C a 700°C, com baixos tempos de residência e taxas de aquecimento. O principal produto obtido nestas condições de tempo e temperatura é o biochar.

Trata-se de carbono com uma estrutura porosa, que contém resíduos carbonáceos e orgânicos não convertidos, além de uma fração mineral. Alguns tratamentos de ativação e técnicas de modificação, demonstram um grande potencial para aperfeiçoar suas propriedades, podendo ser utilizado como material combustível e descontaminante para efluentes. Por ser um composto rico em carbono, o biochar é considerado uma alternativa para o reaproveitamento dos resíduos de ossos proveniente da indústria de proteína animal com potencial sustentável, no entanto ainda é uma área de pesquisa em crescimento (Li *et al.*, 2020; Silvério *et al.*, 2008; Almeida, 2008; Bridgwater, 2003).

A pirólise intermediária ocorre em temperaturas moderadas entre 300°C e 500°C e com taxas de aquecimento mais altas do que na pirólise lenta. Esse processo é utilizado quando se busca equilibrar a produção de líquidos e sólidos. O líquido bruto obtido da pirólise, é um líquido marrom-escuro. É composto por uma mistura de hidrocarbonetos oxigenados e algumas partículas de carvão e metais alcalinos dissolvidos nas cinzas do processo (Li *et al.* 2020; Bridgwater, 2003).

Já a pirólise rápida ocorre a temperaturas elevadas, entre 425°C e 600°C, com tempos de residência curtos e altas taxas de aquecimento. O objetivo desse processo é maximizar a produção de bio-óleo (Li *et al.* 2020).

Grande parte dos materiais orgânicos podem passar por um processo especial que os torna altamente porosos e eficientes na retenção de substâncias. Esse processo geralmente envolve a oxidação controlada, resultando em uma área interna específica muito elevada (variando entre 500 e 1.500 m² por grama). Essa transformação distingue o material ativado daquele que não passou por esse tratamento, sobretudo pela quantidade superior de poros presentes (Mesquita, 2016).

Diversas fontes naturais são aproveitadas na produção desse tipo de adsorvente, incluindo resíduos vegetais (como cascas de coco, madeiras, eucalipto, caroços de frutas), restos industriais (como subprodutos do petróleo) e até biomateriais de origem animal, como ossos. Embora o carvão tradicional seja amplamente utilizado por sua alta capacidade de retenção de compostos, seu custo elevado de fabricação impulsiona a busca por alternativas mais econômicas, entre as quais o carvão de ossos tem ganhado destaque (Almeida *et al.*, 2024; Souza, 2023; Tetzlaff, 2021).

2.5 Carvão de Ossos Pirolisados

De acordo com Ribeiro (2011), o carvão de osso é um material carbonoso onde se distribui uma estrutura porosa de hidroxiapatita, conhecido também por carvão de osso, carvão negro ou pigmento preto.

O carvão de ossos é produzido a partir de resíduos de ossos de animais de abate, adquiridos em indústrias de alimentos. Nessas indústrias os ossos são processados e transformados em farinha (Rojas-Mayorga et al., 2013).

Composto majoritariamente por fosfato de cálcio, representando cerca de 70 a 75% de sua constituição, seu valor de mercado pode variar de acordo com o tamanho das partículas.

Para sua fabricação, costuma-se empregar ossos mais densos e resistentes, como os da região do fêmur bovino, embora outras fontes, inclusive estruturas ósseas de origem marinha como espinhas de peixe, também sejam viáveis. A produção segue etapas que incluem seleção, secagem, higienização, moagem e posterior aquecimento em condições controladas de oxigênio, processo comumente chamado de calcinação, já que os fornos utilizados não são totalmente vedados, permitindo uma combustão parcial. A disponibilidade de oxigênio durante o aquecimento influencia diretamente a qualidade do produto final, enquanto a procedência do osso utilizado interfere nas características como porosidade e resistência estrutural do carvão resultante (Ribeiro, 2011).

No caso do carvão de ossos, o principal contribuinte para a capacidade de adsorção é a hidroxiapatita, que além de eficiente é bastante estável e com uma boa capacidade de tamponamento (Ribeiro, 2011; Rojas-Mayorga et al., 2013; Iriarte-Velasco et al., 2015).

O carvão ativado a partir de ossos possui um diâmetro médio de poros que varia entre 18 e 98 nm, sendo que os poros com diâmetros entre 10 e 50 nm são os mais comuns. No entanto, esses valores podem ser alterados dependendo das condições do processo de produção.

De acordo com as normas da IUPAC (1971), o carvão de ossos tem uma estrutura predominantemente mesoporosa, e tem demonstrado resultados eficazes na remoção de diversos poluentes. Em diversas aplicações, seu desempenho é igual ou superior ao de carvões ativados com maior área superficial específica (Bonechar do Brasil, 2023).

2.5.1 Aplicações do Carvão Ativado de Ossos

A capacidade do carvão de ossos na remoção de cor na indústria do açúcar é reconhecida desde o século XIX, com seu uso no refinamento e clarificação do caldo de açúcar sendo patenteado por John Martineau em 1815. Atualmente, esse processo é amplamente utilizado.

A aplicação do carvão de ossos vem sendo ampliado para o tratamento de efluentes líquidos contaminados por outras substâncias, como metais pesados, por exemplo, um tema que vem sendo explorado em várias pesquisas. Diversos estudos têm sido publicados, abordando a remoção de diferentes metais (Shahida *et al.*, 2019; Guedes *et al.*, 2005).

Além de seu uso tradicional na descoloração de açúcares, ele tem se destacado no tratamento de águas contaminadas, principalmente pela sua capacidade de remover íons metálicos como chumbo, cobre, cádmio e arsênio, graças à afinidade química da hidroxiapatita com esses elementos. Esse tipo de carvão também é eficiente na remoção de flúor, sendo uma alternativa prática e de baixo custo para regiões afetadas por fluoretação natural excessiva em fontes de água (Shahida *et al.*, 2019; Ribeiro, 2010; Guedes *et al.*, 2005).

Outro campo de aplicação é a retenção de compostos orgânicos, como corantes e surfactantes presentes em efluentes industriais. Embora menos explorado nesse contexto, estudos recentes têm demonstrado que o carvão de ossos também pode atuar como um adsorvente viável para moléculas orgânicas, especialmente após processos de ativação térmica ou química que ampliam sua área superficial (Mesquita, 2016).

Além das aplicações ambientais, há investigações em andamento sobre o uso desse material na indústria farmacêutica, como suporte em processos de liberação controlada de fármacos, e na agricultura, para adsorção de pesticidas ou como fonte de fósforo em fertilizantes naturais (Pappis *et al.*, 2020; Tovar-Gómez *et al.*, 2013). O fato de derivar de resíduos da indústria alimentícia ainda o torna uma alternativa ecologicamente vantajosa, promovendo a reutilização de materiais que, de outro modo, teriam descarte limitado.

Atualmente os carvões ativados são abundantemente utilizados em diversos ramos da indústria, especialmente nas áreas de controle e tratamento de resíduos e purificação de produtos. A conformação do carvão pode ser feita em pó ou granular com

diversas granulometrias. Para o tratamento de água, o carvão ativado promove a remoção de compostos sintéticos ou naturais, agentes responsáveis por odor e sabor, metais e gases dissolvidos, desinfetantes, corantes e solventes (Alkurdia *et al.*, 2019).

Carvões Ativados são amplamente utilizados em processos de purificação de gases. Sua aplicação se dá no controle de emissão de escapamentos de veículos, chaminés, e remoção de sulfetos e hidretos de enxofre de emanações gasosas de indústrias. Também são utilizados para a remoção de odores em máscara de gás, depuradores de cozinha, condicionadores de ar, remoção de óleo e ar comprimido e produtos contaminantes de sistemas de refrigeração (Sharma *et al.*, 2022;).

Entre todos os ramos industriais nos quais o carvão ativado é empregado, estão, mineração, medicamentos, óleos comestíveis, cana de açúcar, ácidos graxos, bombas de vácuo, solventes e vapores, recuperação de solos, tratamento de água e efluentes, química fina, milho doce, vinho e bebidas destiladas (Shahida *et al.*, 2019).

2.6 Aspectos Morfológicos da Porosidade em Sólidos

Existem dois tipos diferentes de formação porosa. Um dos tipos de formação porosa é composto por espaços entre as partículas primárias de um sólido que se unem por forças de superfície formando aglomerados ou partículas secundárias. Esses poros também incluem os espaços entre as partículas secundárias. As características desse sistema de poros dependem da forma e tamanho das partículas primárias e secundárias, sendo que as partículas podem ser esféricas ou planas, influenciando a forma e distribuição dos poros resultantes (Sawangjang *et al.*, 2021; Teixeira, 2001).

O segundo tipo de porosidade ocorre quando parte do sólido é removida, seja por solubilização, reações com gases ou separação de fases em materiais poliméricos durante a síntese. Esse tipo de porosidade está relacionado à área externa e interna. A área externa refere-se aos espaços entre partículas, aumentando com imperfeições como sulcos e fissuras. A área interna é formada por paredes de poros e cavidades mais profundas, que têm abertura para o exterior, enquanto poros fechados não contribuem para essa área. Geralmente, a área interna é muito maior que a externa e é responsável pela superfície total do sólido (Sawangjang *et al.*, 2021).

A proporção e o tamanho dos poros variam de acordo com o processo de fabricação e o material precursor. Os poros são classificados pela IUPAC em três categorias de acordo com o seu diâmetro: macroporos (>500 Å), mesoporos (20 – 500 Å)

e microporos (<20 Å). O termo "nanoporo" engloba todos esses, com limite superior de cerca de 1000 Å (Thommes *et al.*, 2015).

Os poros possuem funções específicas quanto ao desempenho de adsorção. Os microporos representam a maioria da área superficial e apresentam alta capacidade de adsorção para moléculas de dimensões pequenas, como gases e solventes. Os mesoporos são responsáveis pela adsorção de moléculas grandes como corantes e representam a maioria da área superficial para carvões impregnados com produtos químicos. Os macroporos servem como meio de transporte para as moléculas para o interior da partícula (Soares, 2001).

Em adsorventes porosos, a superfície pode ser dividida em externa (fora dos poros) e interna (paredes dos poros), com diferentes definições dependendo da microporosidade (Thommes *et al.*, 2015).

2.6.1 Isotermas de Adsorção

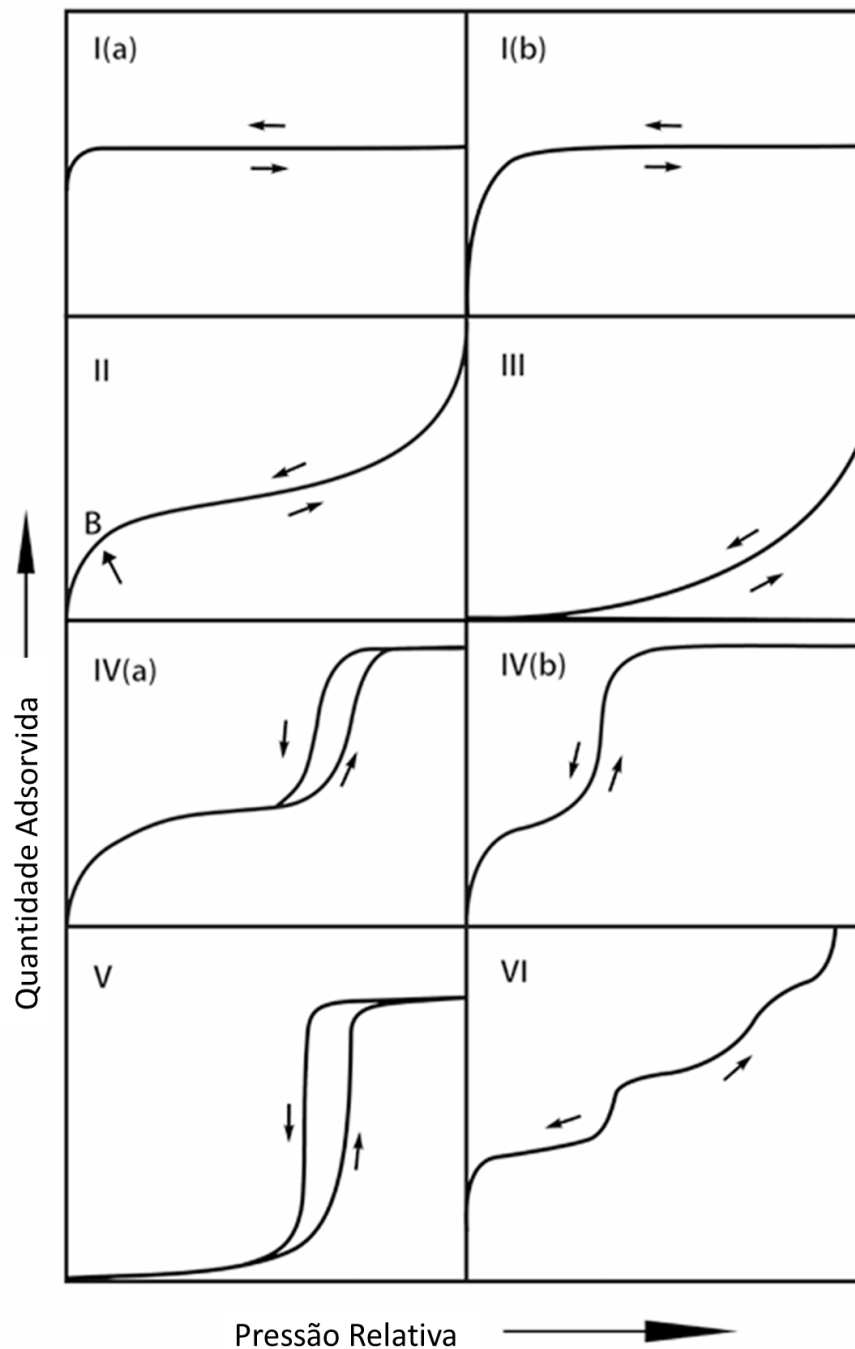
Um estudo da área superficial e porosidade de um material pode ser realizado pela construção de uma isoterma de fisissorção que representa a quantidade de adsorvato retido na superfície do sólido em uma faixa de pressão relativa a uma temperatura constante.

Segundo Thommes *et al.*, (2015), nas recomendações da IUPAC de 1985, as isotermas de fisissorção foram agrupadas em seis tipos. A Figura 4 apresenta os principais tipos de isotermas de adsorção. Cada curva reflete um comportamento distinto de interação entre o adsorvente e o adsorvato, permitindo identificar características importantes da estrutura porosa do material analisado. A forma da isoterma pode indicar desde a presença de microporos até fenômenos como formação de multicamadas e condensação capilar em mesoporos.

As isotermas do Tipo I (Figura 4 Ia e Ib), quando reversíveis, são típicas de materiais com estrutura interna altamente microporosa e superfície externa relativamente limitada. Esse comportamento é comum em substâncias como certos carvões ativados, zeólitas e óxidos com porosidade específica. A isoterma apresenta uma curvatura acentuada voltada para o eixo da razão entre a pressão parcial e a pressão de saturação (p/p_0), e a quantidade de gás retido tende a um máximo definido. Essa limitação não se deve à área interna total, mas sim ao volume efetivo dos microporos acessíveis. A adsorção ocorre de forma intensa mesmo sob pressões extremamente baixas, reflexo

das fortes forças de atração entre a superfície do material e as moléculas adsorvidas em poros com dimensões da ordem de moléculas. Quando se utiliza nitrogênio a 77 K ou argônio a 87 K, materiais com microporos muito estreitos apresentam curvas do subtipo I(a). Já aqueles com distribuição mais ampla de tamanhos de poros, incluindo micro poros maiores e até mesoporos estreitos exibem comportamento correspondente ao subtipo I(b) (Thommes *et al.*, 2015).

Figura 4 — Isotermas de adsorção conforme IUPAC



Fonte: Thommes *et al.*, 2015

No caso das isotermas do Tipo II (Figura 4 II), observa-se uma adsorção progressiva de uma camada inicial e, em seguida, de multicamadas em adsorventes que não apresentam porosidade significativa ou que possuem macroporos. A curva reflete esse acúmulo progressivo até altas proporções de p/p_0 . Quando ocorre uma mudança brusca na inclinação da curva (o chamado ponto B), essa é geralmente uma indicação de que a cobertura da primeira camada está completa. Em situações onde essa transição é mais gradual, entende-se que há uma superposição entre a formação da monocamada e o início da segunda camada. À medida que a pressão relativa se aproxima de 1, o espessamento das camadas tende a ser contínuo e ilimitado (Thommes *et al.*, 2015).

As isotermas classificadas como Tipo III (Figura 4 III) revelam um comportamento diferente: nelas, não é possível identificar claramente a formação de uma única camada uniforme. Isso ocorre porque as forças de atração entre a superfície do sólido e as moléculas do gás são fracas, o que faz com que as moléculas se agrupem apenas nos locais de maior afinidade, em materiais sem microporos ou com poros muito grandes. Mesmo ao atingir a saturação (p/p_0 igual a 1), a quantidade de substância adsorvida permanece limitada (Thommes *et al.*, 2015).

Já nas isotermas Tipo IV (Figura 4 IVa e IVb), encontradas em adsorventes mesoporosos como géis de óxidos e peneiras moleculares com porosidade intermediária, a adsorção inicialmente segue o padrão das isotermas do Tipo II. No entanto, à medida que a pressão aumenta, ocorre um fenômeno conhecido como condensação capilar: o gás dentro dos poros passa para uma fase líquida antes de atingir a pressão de saturação do fluido em estado livre. Esse comportamento é evidenciado por um platô na curva, cuja extensão pode variar bastante em alguns casos, reduz-se a uma leve inflexão (Thommes *et al.*, 2015). No subtipo IV(a), observa-se um efeito de histerese causado pela condensação capilar, típico de poros com largura superior a um valor crítico, que depende do tipo de gás e da temperatura experimental (por exemplo para nitrogênio a 77 K ou argônio a 87 K, esse efeito se manifesta em poros acima de 4 nm). Por outro lado, no subtipo IV(b), que ocorre em poros mesoscópicos mais estreitos ou fechados em uma das extremidades, esse processo é totalmente reversível e a curva de adsorção se sobrepõe à de dessorção (Thommes *et al.*, 2015).

As curvas do Tipo V (Figura 4 V) apresentam comportamento semelhante ao do Tipo III nas regiões de baixa pressão relativa, resultado da fraca interação entre a superfície e as moléculas do adsorvato. Porém, com o aumento de p/p_0 , essas moléculas tendem a se agrupar, e esse aglomerado leva ao preenchimento progressivo dos poros. Esse tipo de isoterma é comumente observado na retenção de água por materiais com superfícies hidrofóbicas, incluindo tanto microporos quanto mesoporos (Thommes *et al.*, 2015).

As isotermas Tipo VI (Figura 4 VI) se destacam por apresentarem degraus bem definidos, indicando a formação de camadas sucessivas de moléculas sobre superfícies extremamente regulares e sem porosidade. A altura de cada etapa na curva reflete a capacidade de adsorção de uma camada, e sua nitidez depende do sistema físico-químico em estudo e das condições térmicas. Exemplos típicos desse comportamento são registrados quando gases como argônio ou criptônio são adsorvidos em carvões sob baixas temperaturas (Thommes *et al.*, 2015).

Em poros abertos, a condensação retardada ocorre devido à metaestabilidade da multicamada adsorvida, o que faz com que a curva de adsorção não esteja em equilíbrio termodinâmico, ao contrário da curva de dessorção. Em estruturas de poros complexas, o processo de dessorção pode ser influenciado por efeitos de rede e bloqueio de poros, ocorrendo quando poros largos têm acesso à superfície externa apenas por gargalos estreitos. A pressão de vapor de dessorção depende do tamanho e da distribuição dos gargalos, e, se o diâmetro for pequeno, pode ocorrer cavitação, onde bolhas de gás se formam no fluido condensado. Esse fenômeno foi observado em materiais como sílicas micro-mesoporosas, zeólitas e carvões ativados. No entanto, a cavitação impede a obtenção de informações precisas sobre o tamanho dos gargalos (Thommes *et al.*, 2015).

Em muitos materiais porosos, observa-se um comportamento característico nas isotermas de adsorção chamado loop de histerese, que aparece de forma consistente na região de formação de multicamadas. Esse fenômeno costuma estar ligado à condensação capilar, que ocorre quando o gás se transforma em líquido dentro dos poros. Esse tipo de histerese pode acontecer devido à instabilidade temporária durante a adsorção ou por causa da forma como os poros se conectam entre si (Thommes *et al.*, 2015).

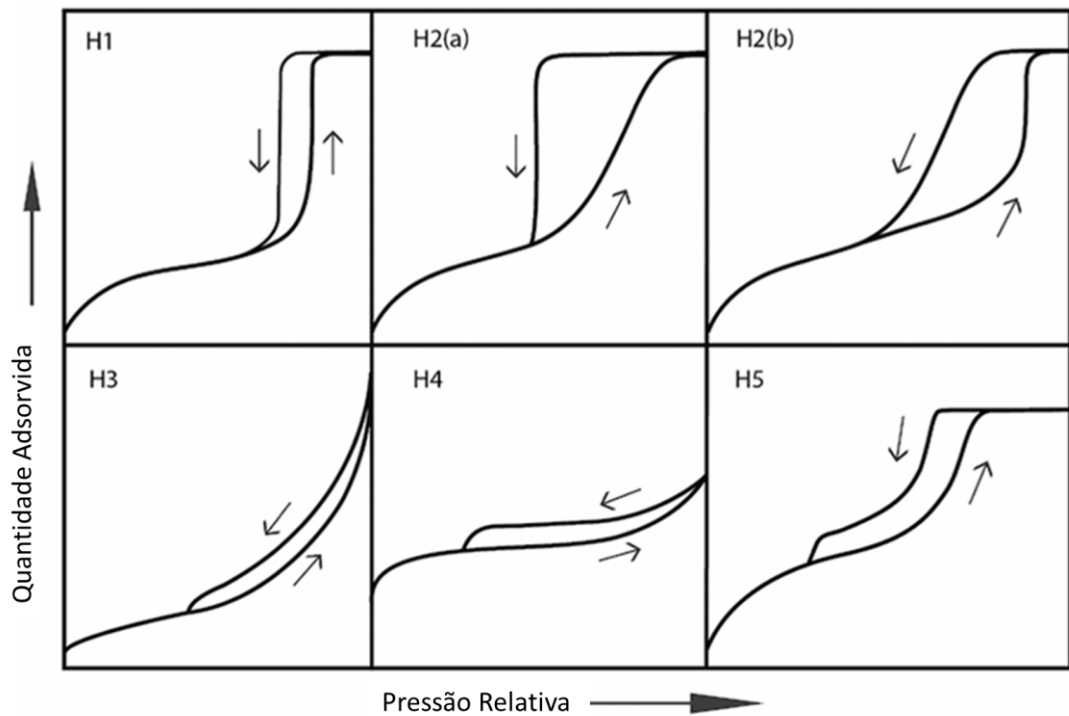
Em poros abertos com formato cilíndrico, a condensação ocorre de forma atrasada porque a camada de gás adsorvida ainda não alcançou estabilidade. Nesses casos, a parte da isoterma correspondente à adsorção não está em equilíbrio completo. Por outro lado, durante a dessorção (quando o gás sai do sólido), não há necessidade de nucleação, então o processo acontece de forma mais direta, semelhante a uma transição reversível entre líquido e vapor. Se os poros já estiverem cheios com o fluido condensado, a parte da curva correspondente à dessorção representa uma situação de equilíbrio (Thommes *et al.*, 2015).

Materiais com estruturas mais complexas, a dessorção pode ser afetada pelo formato e pelas conexões entre os poros. Isso acontece especialmente quando poros largos só se conectam ao exterior por meio de gargalos estreitos, como se fossem frascos com pescoços finos. Nesse caso, os poros maiores enchem normalmente, mas permanecem cheios por mais tempo durante a dessorção, até que os gargalos esvaziem em pressões mais baixas. Em redes de poros assim, a pressão de saída do gás depende do tamanho e da distribuição desses gargalos. Quando os gargalos não são tão estreitos, é possível determinar um ponto de esvaziamento em grupo, chamado de limiar de percolação e isso permite estimar o tamanho dessas aberturas com base na parte de dessorção da isoterma (Thommes *et al.*, 2015).

Entretanto, se os gargalos forem muito estreitos (menos de 5 a 6 nanômetros para nitrogênio a 77 K), o gás não consegue sair normalmente. Em vez disso, forma-se uma bolha de gás de maneira espontânea dentro do líquido condensado, num processo conhecido como cavitação. Isso já foi observado em materiais como sílicas com poros mistos, zeólitas, argilas e alguns tipos de carvão ativado. Nesses casos, ao contrário da dessorção controlada por percolação, não é possível obter dados precisos sobre o tamanho dos gargalos apenas observando a curva de dessorção (Thommes *et al.*, 2015).

Os principais tipos de loops de histerese são mostrados na Figura 5. Cada um desses seis tipos característicos está intimamente relacionado a características particulares da estrutura dos poros e ao mecanismo de adsorção subjacente (Thommes *et al.*, 2015).

Figura 5 — Classificação dos loops de histereses



Fonte: (Thommes et al., 2015)

O loop de histerese do tipo H1 (Figura 5-H1) é encontrado em materiais que apresentam uma faixa estreita de mesoporos uniformes, como, por exemplo, em sílicas modeladas (MCM-41, MCM-48 ou SBA-15), alguns vidros de poros controlados e carbonos mesoporosos ordenados. Normalmente, os efeitos de rede são mínimos e o loop estreito e íngreme é um sinal claro de condensação retardada na curva de adsorção. No entanto, a histerese do Tipo H1 também foi encontrada em redes de poros do tipo frascos de tinta, onde a largura da distribuição do tamanho do gargalo é semelhante à largura da distribuição do tamanho do poro/cavidade (Thommes et al., 2015).

Os loops do tipo H2 (Figura 5-H2a e 6-H2b) são gerados por estruturas de poros mais complexas, nas quais os efeitos de rede são importantes. A curva de desorção muito acentuada, característica dos loops H2(a), pode ser atribuída ao bloqueio/percolação de poros em uma faixa estreita de pescoços de poros ou à evaporação induzida por cavitação. Os loops H2(a) são gerados, por exemplo, por muitas sílicas géis, alguns vidros porosos (por exemplo, vycor), bem como alguns materiais mesoporosos ordenados (por exemplo, sílicas SBA-16 e KIT-5). O loop do Tipo H2(b) também está associado ao bloqueio de poros, mas a distribuição de

tamanho das larguras dos pescoços é agora muito maior. Exemplos desse tipo de loops de histerese foram observados com espumas de sílica mesocelulares e certas sílicas mesoporosas ordenadas após tratamento hidrotérmico (Thommes *et al.*, 2015).

Existem duas características distintivas do loop Tipo H3 (Figura 5-H3): (i) a curva de adsorção assemelha-se a uma isoterma Tipo II; (ii) o limite inferior da curva de dessorção normalmente está localizado na relação P/P_0 induzida pela cavitação. Loops deste tipo são formados por agregados não rígidos de partículas em forma de placa (por exemplo, certas argilas), mas também se a rede de poros consistir em macroporos que não estejam completamente preenchidos com condensado de poros.

O loop H4 (Figura 5-H4) é um pouco semelhante ao loop H3, mas o ramo de adsorção agora é um composto dos Tipos I e II, sendo a captação mais pronunciada em baixa P/P_0 associada ao preenchimento de microporos. Os loops H4 são frequentemente encontrados com cristais agregados de zeólitas, algumas zeólitas mesoporosas e carvões micro-mesoporosos (Thommes *et al.*, 2015).

Embora o loop do Tipo H5 (Figura 5-H5) seja incomum, ele tem uma forma distinta associada a certas estruturas de poros que contêm mesoporos abertos e parcialmente bloqueados (por exemplo, sílicas hexagonais moldadas).

Como já indicado, a característica comum dos loops H3, H4 e H5 é a acentuada redução da curva de dessorção. Geralmente, esta redução se situa em uma faixa estreita de P/P_0 (por exemplo, em $P/P_0 \sim 0,4 - 0,5$ para nitrogênio na temperatura de 77 K) (Thommes *et al.*, 2015).

2.7 Porosidade dos Carvões de Ossos

Ribeiro (2011) analisou amostras de carvão de osso bovino, fabricado pela empresa brasileira Bonechar, e observou uma área superficial em torno de $139 \text{ m}^2/\text{g}$. Valores como este mostram que o carvão de osso possui alta área superficial, o que reflete sua grande capacidade de adsorção, diretamente ligada à sua porosidade.

Wang *et al.*, (2020) realizou uma análise comparativa de carbonização óssea derivada de partes bovinas. O carvão pirolisado a uma temperatura de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ a partir da costela bovina apresentou uma área superficial de $172 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ e diâmetro médio de poros $7,7 \text{ nm}$ o que representa uma estrutura mesoposora com alta capacidade de adsorção.

Hart et al (2022) realizou em estudo sobre a produção de materiais de valor agregado recuperados da biomassa de ossos residuais. A pesquisa foi realizada com diferentes temperaturas de pirólise. O valor de área superficial encontrado para o osso bovino pirolisado a uma temperatura de 600 °C foi de 50, m² g⁻¹, e um volume de poros total 0,305 cm³ g⁻¹. Para a temperatura de 400 °C o resultado foi de 114,15 m² g⁻¹ com volume total de poros de 0,294 cm³ g⁻¹. Para a amostra de osso suíno, a temperatura utilizada foi de 550 °C apresentou uma área superficial de 87 m² g⁻¹ e um volume total de poros de 0,15 cm³ g⁻¹.

Assim, verifica-se que os procedimentos utilizados na produção podem influenciar a porosidade dos carvões de ossos. A estrutura predominante é a mesoporosa com diâmetro médio dos poros podendo variar entre 18 e 98 nm, sobressaindo-se poros de 10 a 50 nm. A área superficial específica pode variar de e tem se mostrado extremamente competente na remoção de inúmeros poluentes, sendo tão eficiente quanto outros carvões com área específica superficial maior (Santos, 2022).

Apesar de uma área superficial específica menor, os carvões de ossos têm se mostrado tão eficientes na remoção de inúmeros poluentes quanto outros carvões de área específica superficial maior (Santos, 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Preparo

Para a realização deste estudo foram utilizados resíduos de ossos suínos doados por um frigorífico industrial, localizado na região Oeste do Paraná, Brasil. Os procedimentos do preparo dos ossos e dos experimentos de pirólise foram realizados por Santos (2022).

De acordo com Santos (2022), os ossos foram submetidos a uma etapa inicial de raspagem para remoção dos resíduos de tecido muscular aderidos aos ossos. Após essa fase, os ossos foram enxaguados em água corrente e, posteriormente, submetidos à fervura por um período de 40 minutos. Na sequência, os ossos foram lavados com água destilada e secados em uma estufa a 105 °C por 24 horas. A seguir, os ossos foram fragmentados e classificados em partículas entre 4,75 e 12,7 mm e armazenados em frascos de polietileno, mantidos em refrigeração a 7 °C, para prevenir a deterioração microbológica.

3.2 Pirólise

Os experimentos de pirólise foram realizados em um módulo experimental constituído de um forno mufla, um reator cilíndrico de aço inoxidável e um sistema de injeção e controle de gases, descrito em detalhes por Santos (2022). Aproximadamente 100 g de ossos foram inseridos no reator e aquecidos a uma taxa de aquecimento 7 °C min⁻¹, sob fluxo de 150 ml min⁻¹ de N₂, até atingir as temperaturas pré definidas 450, 550, 650, 750 e 850 °C, mantendo-se nessas temperaturas por duas horas. As amostras de carvão obtidas nas diferentes temperaturas foram denominadas SBC-450, SBC-550, SBC-650, SBC-750 e SBC-850. Um carvão de ossos bovinos comercial, fornecido por uma empresa situada na região noroeste do Paraná, foi utilizado como referência e denominado BC.

3.3 Caracterização

A caracterização da porosidade das amostras foi realizada por meio de isotermas de fisissorção de nitrogênio. As amostras foram previamente secas em estufa por 24 horas a 100 °C. Posteriormente, foram submetidas a um pré-tratamento

a 150°C por 4 horas sob vácuo para retirada de toda umidade e espécies adsorvidas da superfície do material. Em seguida, foram caracterizadas através de isotermas de N₂ registradas na temperatura do nitrogênio líquido (77 K) utilizando o equipamento Nova 2000e da Quantachrome. A área superficial específica, a distribuição de volume dos poros e o volume de microporos foram determinadas pelo método BET, BJH e DR, respectivamente.

Os aspectos morfológicos das amostras de carvão de ossos foram analisados utilizando um microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 250, com voltagem de aceleração de 15kV, ampliação variando de 500x, 2000x e 5000x, e resolução espacial de 200 µm, 20 µm e 50 µm.

Os resultados de adsorção de iodo (número de iodo) e adsorção de corante têxtil preto reativo 5 (RB5), obtidos por Santos (2022) para as amostras de carvão de ossos suínos e carvão de ossos bovinos, foram avaliados em relação aos valores de área superficial específica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

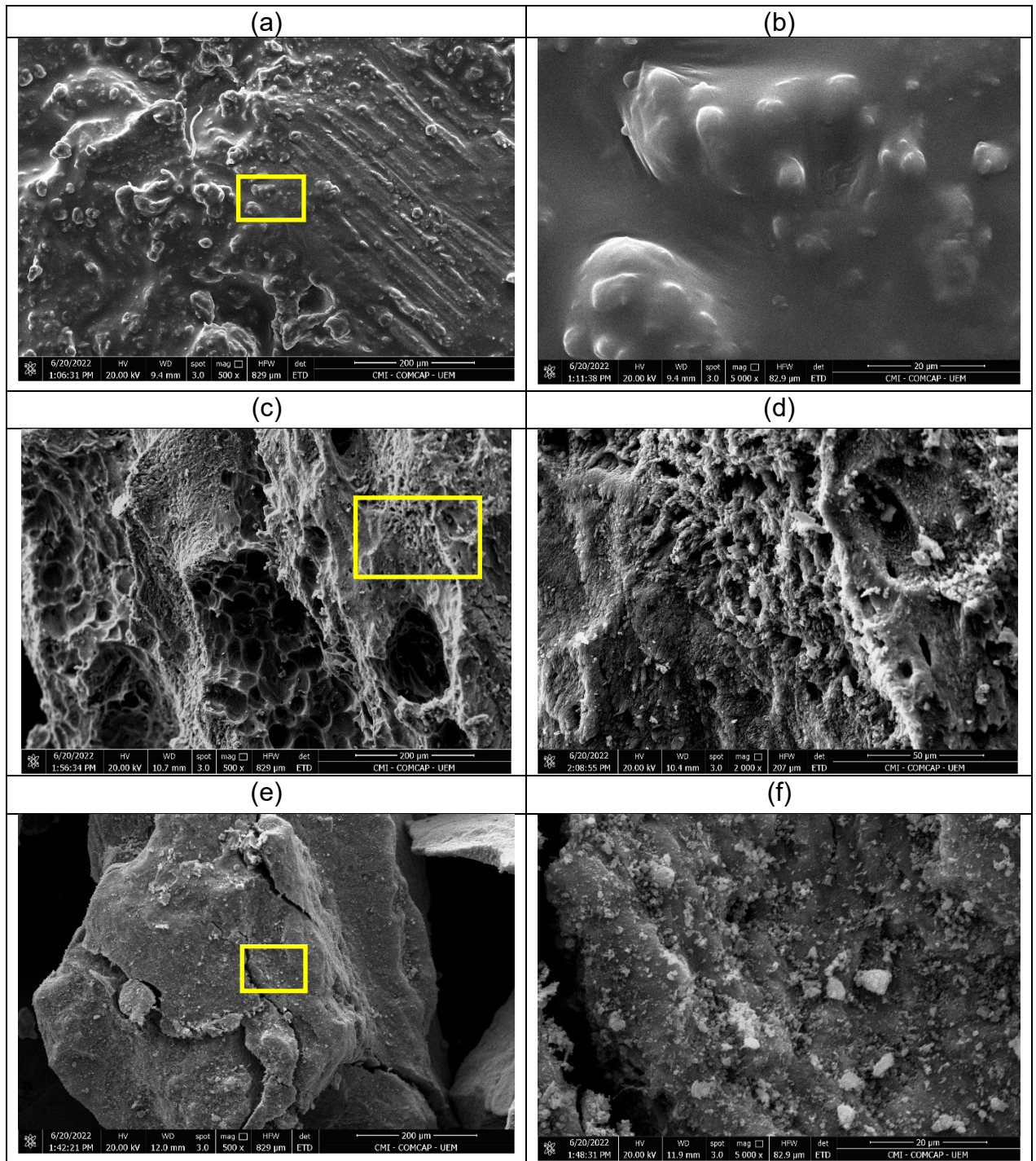
A análise morfológica das amostras foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A MEV fornece imagens tridimensionais detalhadas, possibilitando a identificação de poros, fissuras, cavidades e outras características estruturais relevantes. As micrografias dos ossos suínos antes da pirólise, da amostra SBC-650 e da amostra BC obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), nas ampliações 500x, 2000x e 5000x, são apresentadas na Figura 6

Pode-se observar que os ossos suínos antes da pirólise (Figuras 6-a e 10-b) apresentam uma superfície mais lisa, provavelmente devido à presença de matéria orgânica que não foi completamente removida durante a etapa de preparo dos ossos ou uma parte mais externa do osso onde a estrutura é mais compactada. A amostra SBC-650 (Figuras 6-c e 10-d), apresentou superfície irregular e uma estrutura porosa proveniente de partes esponjosas dos ossos com poros de maior diâmetro. Por outro lado, a amostra BC (Figuras 6-e e 10-f) aparenta ser de partes mais densas dos ossos, demonstrando uma superfície irregular com poros menores.

De fato, a reação de pirólise provoca uma alteração na morfologia dos ossos suínos, aumentando sua área de superfície, o volume e o diâmetro médio dos poros, melhorando assim a capacidade de adsorção. Esse processo ocorre devido à degradação térmica da matéria orgânica e à reorganização da matriz inorgânica, principalmente da hidroxiapatita, o que favorece o desenvolvimento de uma estrutura mais porosa. Além disso, a remoção de compostos voláteis durante a pirólise contribui para a abertura de canais e cavidades que ampliam os caminhos disponíveis para a difusão dos adsorvatos (Wang *et al.*, 2019).

As características de porosidade dos carvões de ossos suínos obtidos em diferentes temperaturas foram avaliadas por meio de isotermas de fisissorção a partir da variação do volume de nitrogênio adsorvido em função da pressão relativa (P/P_0). A partir das curvas obtidas, foi possível avaliar o tipo de porosidade predominante, a presença de histerese e o comportamento da interação entre o gás e a superfície do sólido.

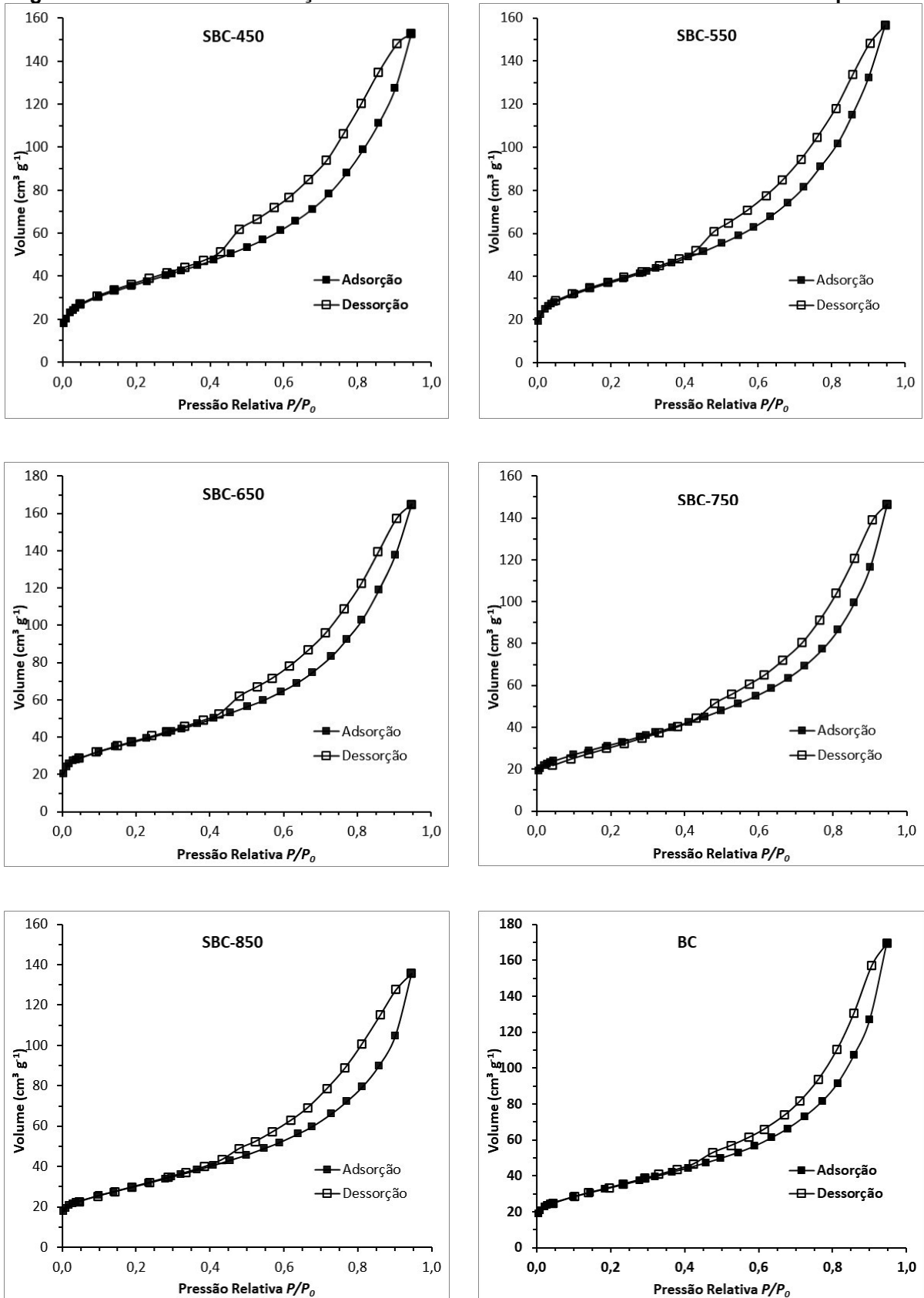
Figura 6 — Micrografias obtidas no MEV: (a) osso suínos antes da pirólise, (c) carvão de ossos suínos pirolizados a 650 °C (SBC-650) e (e) carvão comercial de ossos bovinos (BC). A imagem a direita representa uma ampliação da área destacada.



Fonte: Autoria própria

As Isotermas de adsorção de N₂ dos carvões produzidos em diferentes temperaturas e a isoterma de um carvão comercial de osso bovino (BC) estão apresentadas na Figura 7.

Figura 7 — Isotermas e Adsorção de N₂ dos Carvões Produzidos em Diferentes Temperaturas



Fonte: Autoria própria

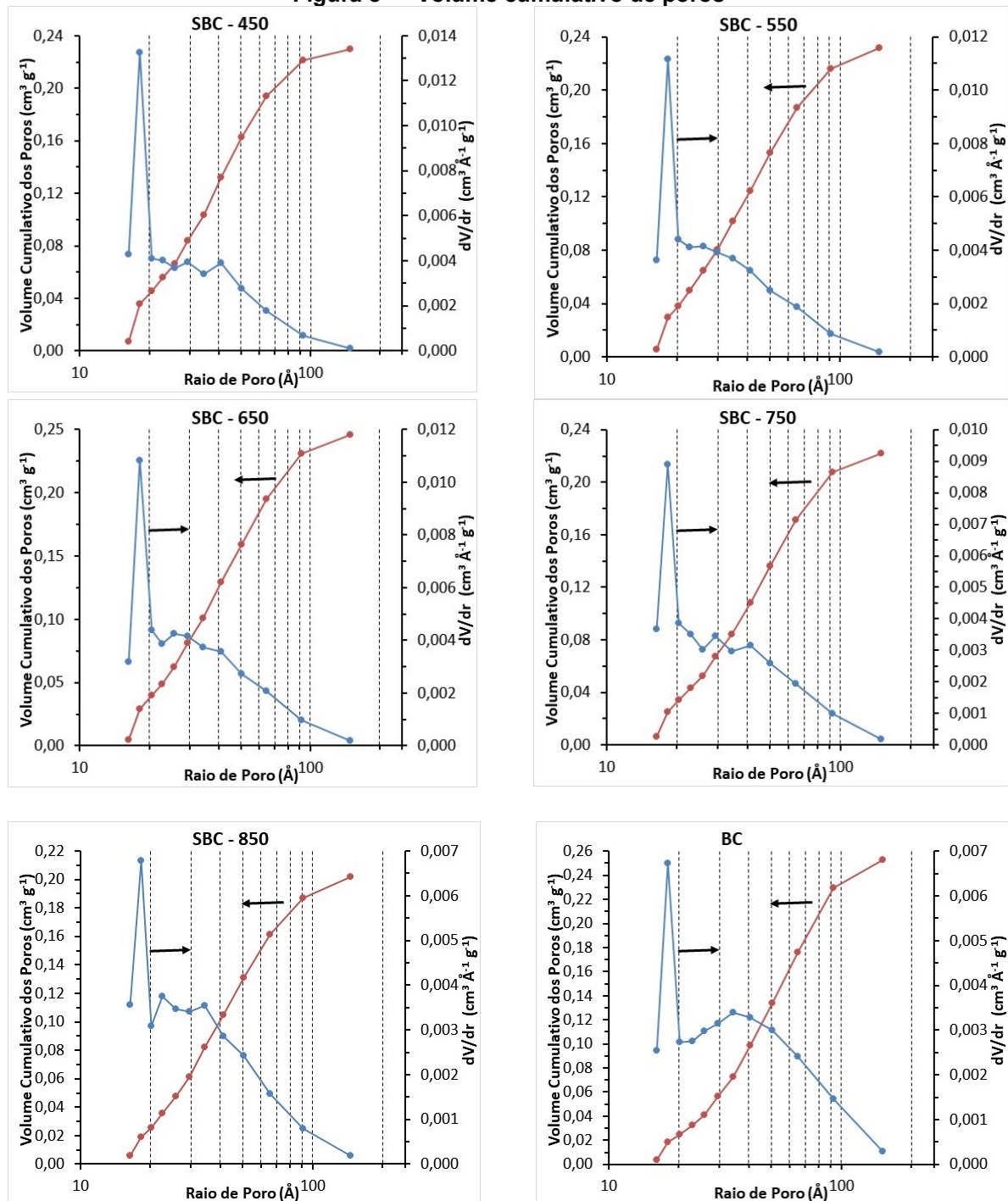
Observa-se que todas as isotermas obtidas apresentaram um comportamento semelhante característico de isotermas do tipo IV(a), conforme descrito na figura 4. Este tipo de isoterma é característico de material mesoporoso, nos quais ocorre um efeito de histerese causado pela condensação capilar dentro dos poros. Rojas-Mayorga *et al.*, (2013), também observaram um comportamento semelhante para isotermas de adsorção de N₂ de carvões de ossos bovinos. Carrales-Alvarado (2023), realizou uma pesquisa sobre a modificação de carvão ósseo por ferro para melhorar sua capacidade de adsorver flúor de uma solução aquosa. Os resultados das isotermas obtidas também tiveram um comportamento semelhante, correspondendo principalmente a materiais mesoporosos e exibindo laços de histerese.

Pode-se observar na Figura 7 que as isotermas apresentam um *loop* de histerese muito semelhante e podem ser referenciadas a histerese do tipo H4, conforme observado na Figura 5, que está relacionada ao preenchimento dos poros por condensação capilar. Este tipo de histerese é frequentemente encontrado em materiais micro-mesoporoso.

Apesar da utilização de diferentes temperaturas de pirólise, não foram observadas grandes diferenças no comportamento das isotermas. Além disso, as isotermas dos carvões produzidos com ossos suínos foram semelhantes à isoterma dos ossos bovinos (BC), indicando tratarem-se de materiais semelhantes uma vez que são provenientes de matéria prima de origem animal.

A Figura 8, ilustra a distribuição do volume cumulativo dos poros. Pode-se observar que todas as amostras tiveram características semelhantes, indicando a presença de uma ampla faixa de tamanho de poros com picos de distribuição de porosidade de raio 18,2 Å, estando de acordo com a classificação da IUPAC e com as isotermas obtidas, o que confirma a natureza mesoporosa do carvão de ossos.

Figura 8 — Volume cumulativo de poros



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades de porosidade e de adsorção dos carvões preparados em diferentes temperaturas e do carvão de ossos bovino. Pode-se observar que os carvões de osso suínos preparados em diferentes temperaturas apresentaram valores de área superficial específica entre 109 a 134 m² g⁻¹ que se assemelha ao carvão de ossos bovinos. Valores semelhantes de área superficial específica também foram observadas por outros pesquisadores para os

carvões de ossos: Ribeiro (2011) — 139 m²/g; Iriarte-Velasco *et al* (2017) — 116,8 a 139,6 m²/g; Sawangjang *et al.*, 2021 — 103,11 m²/g para carvão de ossos bovinos e 83,79 m²/g para ossos suínos.

Tabela 1 — Propriedades de porosidade e de adsorção dos carvões preparados em diferentes temperaturas e do carvão de ossos bovino

Amostra	Área Superficial Específica (m ² g ⁻¹) ^a	Volume Total de Poros (cm ³ g ⁻¹) ^b	Volume de Microporos (cm ³ g ⁻¹) ^c	Diâmetro Médio de Poros (Å)	Adsorção de corante RB5 (mg g ⁻¹) ^d	Número de lodo (mg g ⁻¹) ^e
SBC-450	129.1	0.236	0.057 (24.1 %)	73.26	36.24	136.48
SBC-550	132,0	0.242	0.058 (24.0 %)	73.44	39.35	126.94
SBC-650	134.3	0.255	0.058 (22.8 %)	76.04	41.85	142.13
SBC-750	113,0	0.227	0.048 (21.3 %)	80.26	40.63	166.09
SBC-850	108.7	0.210	0.046 (21.9 %)	77.32	44.14	192.68
BC	119.2	0.262	0.051 (19.4 %)	87.76	40.58	163.72

a – Método BET, b - Método BJH, c - Método DR, d – Adsorção de corante RB5 (Santos, 2022), e – Adsorção de lodo (Santos, 2022)

Os volumes totais de poros dos carvões de ossos suínos apresentaram valores entre 0,210 e 0,255 cm³ g⁻¹. Para o BC, o volume de poro foi um pouco superior, com valor de 0,262 cm³ g⁻¹. Estes valores estão de acordo com o relatado na literatura para os carvões de osso de animais. Hart *et al* (2022) obteve resultados de aproximadamente 0,294 cm³ g⁻¹ de volume de poros. Apesar dos carvões serem predominantemente mesoporosos, observa-se também a presença de microporos com um volume correspondente a uma faixa de 21,3 a 24,1% do volume total de poros.

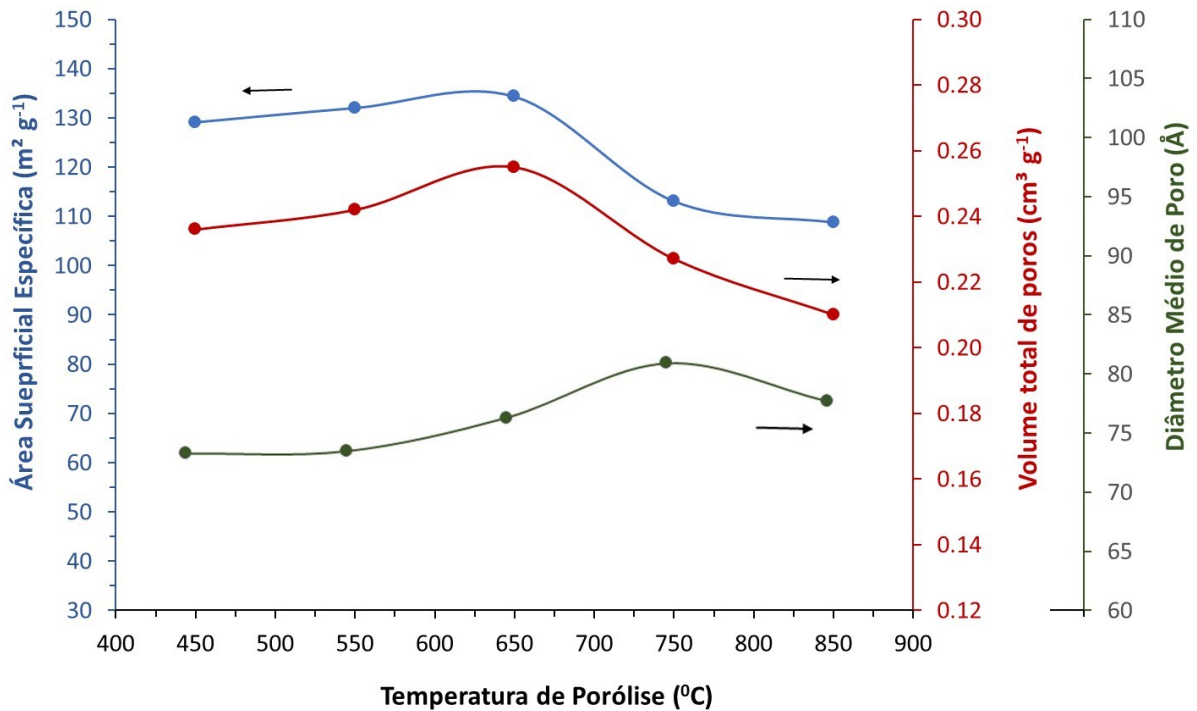
O diâmetro médio de poros dos carvões de ossos suínos ficou em aproximadamente 76 Å, que está de acordo com o observado na Figura 7. O diâmetro médio dos poros aumenta com a temperatura de pirólise, indicando um alargamento da estrutura porosa, especialmente nas amostras SBC-750 e SBC-850.

Comparando-se os resultados da amostra SBC-650 com a amostra BC, verifica-se que, apesar das diferenças observadas na morfologia das amostras (Figura 10), os resultados observados na Tabela 1 indicam que a porosidade e a capacidade adsortiva dos carvões de ossos suínos pirolisados a 650 °C são comparáveis às do carvão comercial de ossos bovinos, demonstrando que esses

materiais podem ser uma alternativa equivalente ao que já é utilizado comercialmente.

Em relação à adsorção do corante obteve-se em média uma adsorção de 40,44 mg g⁻¹ para o corante e 152,9 mg g⁻¹. Este valor foi semelhante ao obtido pelo carvão de ossos bovinos. A Figura 9 apresenta a variação da área superficial específica, volume total e diâmetro médio de poros.

Figura 9 — Influência da temperatura de pirólise na área superficial específica, no volume total e no diâmetro médio de poros



Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 9 que os três parâmetros aumentam juntamente com a elevação da temperatura até aproximadamente 650 °C. Esse comportamento pode ser atribuído à maior liberação de materiais voláteis, carbonatos e grupos funcionais que alteram a organização estrutural da matriz carbonácea, o que favorece o desenvolvimento de uma rede porosa mais aberta. Entretanto, para as temperaturas de 750 °C e 850 °C verifica-se uma pequena diminuição na área superficial específica e volume de poros. Por outro lado, o diâmetro médio dos poros continua aumentando com o aumento da temperatura de pirólise.

Durante a pirólise, quando a temperatura aumenta, substâncias leves e gasosas (voláteis) são liberadas do material. Isso cria espaços vazios, formando

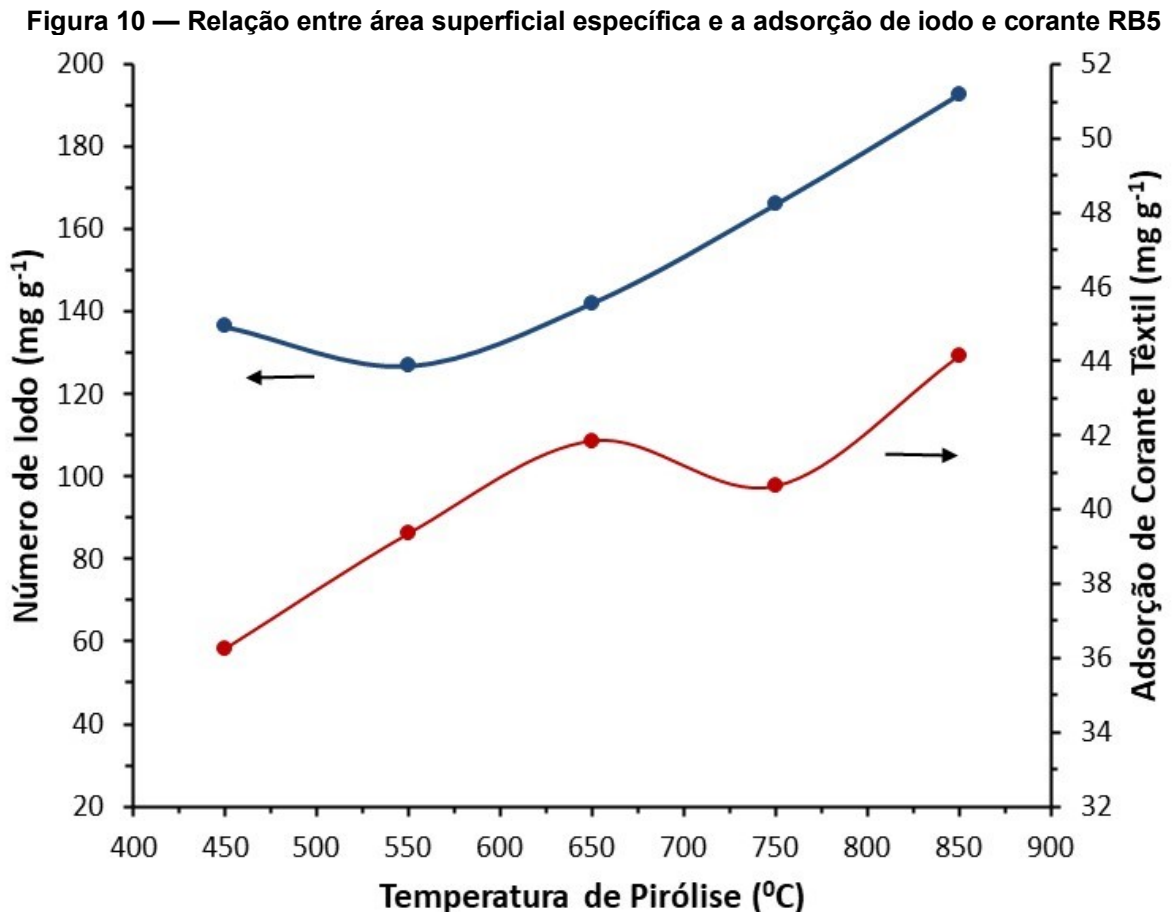
poros. O resultado disso tudo é a formação de mais poros e poros maiores, ou seja, a estrutura se torna mais porosa, com mais espaço para moléculas entrarem ou serem adsorvidas. Estudos como Zhang et al. (2018) e Wang et al. (2020) mostraram que os poros se desenvolveram gradualmente com o aumento da temperatura de pirólise, o que foi devido principalmente à decomposição e condensação de matérias orgânicas.

A temperatura de pirólise exerce um papel importante na definição da área superficial da estrutura porosa final do carvão. À medida que a temperatura aumenta, ocorrem mudanças sutis na reorganização estrutural do material. Essas variações podem estar relacionadas à remoção gradual de compostos voláteis, à quebra de ligações orgânicas e à abertura de poros previamente obstruídos. Mesmo que os valores obtidos não demonstrem grandes contrastes numéricos, o comportamento observado sugere que o ajuste da temperatura pode ser uma ferramenta eficiente para modular a superfície ativa do carvão, otimizando seu desempenho em processos de adsorção específicos. Além disso, pequenas alterações na área superficial podem ter impactos relevantes dependendo da natureza do contaminante a ser adsorvido ou da aplicação pretendida.

De fato, Santos (2022) avaliou a degradação térmica dos ossos suínos por análise termogravimétrica e verificou que a maioria dos compostos voláteis (aproximadamente 40% da massa dos ossos) são desprendidos até 450 °C. Entretanto, de 500 a 900 °C ocorre uma perda de massa gradativa de aproximadamente 12%, a qual pode estar relacionada à decomposição do carbonato, componente presente na composição dos ossos de animais (Patel et al. 2015).

A influência da temperatura de pirólise na adsorção de iodo e do corante têxtil RB5 é apresentada na Figura 10. Pode-se observar que a adsorção tanto do corante RB5 quanto do iodo segue uma tendência semelhante à da área superficial e volume de poros até 650 °C: tem um pequeno aumento com o aumento da temperatura. Para temperaturas entre 750 °C e 850 °C, embora haja uma pequena redução na área superficial específica e volume de poros, a capacidade de remoção desses adsorbatos continua aumentando. Este comportamento pode estar relacionado ao tamanho das moléculas. Como o iodo possui moléculas pequenas comparadas à molécula de corante, ele preenche primeiro os microporos. Conforme a temperatura aumenta os poros vão ficando

maiores e conseqüentemente aumentando a adsorção. Já o corante ele vai preenchendo conforme os poros vão aumentando de tamanho. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento no diâmetro de poros para temperaturas de pirólise maiores.



Fonte: Adaptado de Santos 2022

Os poros maiores podem facilitar o acesso dos adsorbatos à superfície interna dos carvões aumentando a quantidade adsorvida. Esses dados sugerem que a temperatura de pirólise influencia a estrutura porosa do carvão de ossos, afetando sua capacidade adsorvente para diferentes compostos.

Comparando-se os dados de adsorção obtidos nas amostras SBC-650 e SBC-850, verifica-se um aumento de 35,6 % e 5,5 % na quantidade adsorvida de Iodo e RB5, respectivamente. Esses valores mostram que um acréscimo de 200 °C na temperatura de pirólise não expressa um aumento considerável na capacidade adsorvente dos carvões de ossos suínos. Assim, a temperatura de

650 °C se apresenta como um ponto adequado em termos de área superficial, desempenho de adsorção e consumo energético do sistema

No estudo realizado por Kaźmierczak, *et al.*, (2013) foi verificado que a temperatura de pirólise afetou grandemente a capacidade de adsorção dos produtos de pirólise: ao aumentar a temperatura de pirólise de 500 para 800 °C, a adsorção de iodo quase triplicou. Por outro lado, no teste realizado com o corante azul de metileno, os resultados sugeriram que os poros predominantes no material eram pequenos, incapazes de reter moléculas grandes como a do azul de metileno.

De fato, vários fatores internos e externos interferem diretamente no processo de adsorção. Entre os principais estão: a área superficial do adsorvente, o tamanho dos poros, a temperatura, o pH, a velocidade de agitação e as características físico-químicas tanto do material quanto da substância a ser adsorvida. A área superficial do adsorvente é um dos aspectos mais importantes para determinar a eficiência de adsorção, pois, geralmente, quanto maior ela for, maior tende a ser a capacidade adsortiva (Mesquita, 2016).

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, estudou-se a influência da temperatura de pirólise na porosidade dos carvões produzidos a partir de ossos suínos.

A partir das isotermas de adsorção N_2 , verificou-se que os carvões de ossos suínos apresentaram características predominantes de material mesoporoso, com a presença de pequena microporosidade. As áreas superficiais específicas e os volumes totais de poros apresentaram valores entre 109 à 134 $m^2 g^{-1}$ e entre 0,210 e 0,255 $cm^3 g^{-1}$, respectivamente, sendo que apenas 21,3% a 24,1% do volume total dos poros corresponde aos microporos. O diâmetro médio de poros dos carvões de ossos suínos ficou em aproximadamente 76 Å.

Ao avaliar a influência da temperatura de pirólise na porosidade dos carvões de ossos suínos verificou-se que a área superficial específica e volume de poros aumentam juntamente com a elevação da temperatura de 450 °C a 650 °C, tendo uma pequena diminuição para as temperaturas de 750 °C e 850 °C. Por outro lado, o diâmetro médio dos poros aumenta de forma contínua com o aumento da temperatura de pirólise.

A influência da temperatura de pirólise dos carvões de ossos suínos observada na porosidade também se reflete nos resultados de adsorção do corante têxtil RB5 e do iodo. Foi verificado que um aumento na temperatura de pirólise aumentou a capacidade de remoção desses adsorbatos. Esse fato foi atribuído principalmente ao aumento no diâmetro de poros verificado para temperaturas de pirólise maiores. Os poros maiores tendem a facilitar o acesso dos adsorbatos à superfície interna dos carvões aumentando a quantidade adsorvida.

Os resultados de porosidade e de adsorção para o carvão de ossos suínos pirolisados a 650 °C se assemelha aos obtidos para a amostra de carvão comercial de ossos bovinos. Sendo assim, os resíduos de ossos suínos podem servir como matéria prima alternativa e sustentável para a produção de carvão de ossos, com desempenho equivalente aos carvões já comercialmente utilizados.

Além disso, o reaproveitamento desses resíduos da agroindústria representa uma oportunidade de agregar valor a um subproduto comumente utilizado apenas como aditivo para nutrição animal. Contribuindo para a redução de impactos ambientais e ampliando as possibilidades de aplicação em processos de adsorção.

REFERÊNCIAS

ABRA – Associação Brasileira de Reciclagem Animal. **Farinhas: Farinha de Carne e Ossos Bovinos, suína, vísceras de aves, sangue, penas hidrolisadas, peixes.** Disponível em: <https://abra.ind.br/farinhas/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

ALLEGRETTI, L. J. M. **Estudo da formação de fosfatos de cálcio pela mineralização de matrizes de colágeno.** 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

ALMEIDA, B. C. *et al.* Produção de carvão ativado a partir da pirólise da casca de laranja. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 451–472, 2024. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/85880>. Acesso em: 29 jun. 2025.

ALMEIDA, M. B. B. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gásóleo em craqueamento catalítico.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ALVES, D. O. *et al.* **Custo de produção da suinocultura: comparativo de rentabilidade da suinocultura de cria e recria nos períodos de 2019 a 2022, em uma unidade produtiva situada no município de ampére no sudoeste do paraná.** 2023. 14 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Contábeis, Faculdade de Ampére, Ampére, 2023.

ALVES, L. R.; PAIVA, C. A. N. Determinantes do desempenho diferenciado de mesorregiões selecionadas do sul do Brasil entre 1970 e 2000. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE A BASE ECONÔMICA REGIONAL, 6., 2008, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: ENABER, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL – **ABPA. Relatório Anual.** São Paulo: ABPA, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL – **ABPA. Relatório Anual.** São Paulo: ABPA, 2022.

BARBOSA, Felipe Duarte Soares. **Utilização do carvão ativado de ossos bovinos como agente adsorvente para remoção do herbicida 2,4-d (ácido diclorofenoxiacético).** 2022. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

BONECHAR DO BRASIL. **Aplicações do carvão de ossos: adsorção, filtração e uso industrial.** São Paulo: Bonechar do Brasil, 2023. Catálogo técnico.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, n. 2-3, p. 87–102, mar. 2003.

CARRALES-ALVARADO, et al. Bone char modification by iron to improve its capacity for adsorbing fluoride from an aqueous solution. **Sustainable Environment Research**, [S.l.], v. 33, n. 5, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00166-0>. Acesso em: 15 jun. 2025.

COMPER, Fabiano de Souza. **Destinação final de resíduos sólidos provenientes de abates em frigorífico de bovino**. 2022. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Saneamento Ambiental, Instituto Federal do Espírito Santo, Colatina, 2022.

SANTOS, T. R. D. **Reaproveitamento de resíduos de ossos suínos provenientes da agroindústria para produção de bio-óleo e carvão ativado**. 2022. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Processos Químicos e Biotecnológicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2022.

FERREIRA, N. L. **Pirólise de biomassa lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado em Química – Físico-Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

GOMES, Y. C. *et al.* Water defluoridation by adsorption on bovine bone activated carbon. **The Journal Of Engineering And Exact Sciences –Jcec**. Viçosa, p. 1-15. 31 dez. 2023.

GRAAFF, V. **Anatomia humana**. 6. ed. São Paulo: Manole, 2003. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/anatomia-humana-6-ed-van-de-graaffpdf-pdf-free.html>. Acesso em: 04 jun. 2022.

GUEDES, T. S. *et al.* Potencial de adsorção de metais pesados por carvão de ossos bovinos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE MATERIAIS E MEIO AMBIENTE, 21., 2005, Natal. **Anais [...]**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

HART, A. *et al.* Value-added materials recovered from waste bone biomass: technologies and applications. **Royal Society of Chemistry**. RSC Advances, v. 12, 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2017** – Principais resultados. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 18 abr. 2023.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY – IUPAC. **Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units**. Washington, DC: IUPAC, 1971.

IRIARTE-VELASCO, U. *et al.* Methylene blue adsorption by chemically activated waste pork bones. **Coloration Technology**, v. 131, n. 4, p. 322–332, 2015.

IRIARTE-VELASCO, U. *et al.* Preparation of a porous biochar from the acid activation of pork bones. **Food and Bioproducts Processing**, v. 98, p. 341–353, 2016.

JUDAS, Fernando. **ESTRUTURA E DINÂMICA DO TECIDO ÓSSEO**. 2012. 51 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Medicina, Clínica Universitária de Ortopedia dos Huc-Chuc, Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.

KAŹMIERCZAK, Justyna; NOWICKI, Piotr; PIETRZAK, Robert. **Sorption properties of activated carbons obtained from corn cobs by chemical and physical activation**. *Adsorption*, [S.l.], v. 19, p. 273–281, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10450-012-9450-y>. Acesso em: 8 jun. 2025.

LI, Y. *et al.* Uma revisão crítica da produção e utilização avançada de biochar via pirólise seletiva de biomassa lignocelulósica. **Bioresource Technology**, v. 312, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>. Acesso em: 30 abr. 2025.

MESQUITA, A. C. **Remoção de surfactantes aniônicos por carvões ativados produzidos a partir de ossos bovinos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MESQUITA, P. L. **Uso de carvão de ossos bovinos na remoção de contaminantes orgânicos de concentrados de eletrodialise e sua contribuição ao reuso de água na indústria de petróleo**. 2016. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

PACHECO, J. W. **Guia técnico ambiental de frigoríficos: industrialização de carnes (bovina e suína)**. São Paulo: CETESB, 2006. 85 p. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 18 abr. 2023.

PAPPIS, L. R. *et al.* Adsorção de fluoreto por carvões ativados: estudo comparativo entre diferentes materiais. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 1, p. 47–56, 2020.

PATEL, S. *et al.* Synthesis and characterisation of mesoporous bone char obtained by pyrolysis of animal bones, for environmental application. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S.l.], v. 3, n. 4, p. 2368–2377, dez. 2015.

RIBEIRO, M. V. **Estudo do carvão de ossos bovinos no processo de desfluoretação de águas destinadas ao consumo humano**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RIBEIRO, M. V. **Uso de carvão de osso bovino na defluoretação de água para uso em abastecimento público**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

ROESLER, M. R. V. B.; CESCO NETO, E. A. **A produção de suínos e as propostas de gestão de ativos ambientais: o caso da região de Toledo - Paraná**. Informe GEPEC, v. 7, n. 2, 2007.

ROJAS-MAYORGA, C. K. *et al.* Optimization of pyrolysis conditions and adsorption properties of bone char for fluoride removal from water. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 104, p. 10–18, 2013.

SANTOS, Diego. Paraná alcança maior participação da história na produção nacional de suínos. **Agência Estadual de Notícias**, 19 mar. 2025. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Parana-alcanca-maior-participacao-da-historia-na-producao-nacional-de-suinos>. Acesso em: 29 abr. 2025.

SAWANGJANG, B. *et al.* Evaluation of Fluoride Adsorption Mechanism and Capacity of Different Types of Bone Char. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**. [S. l.], p. 02-14. jun. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/13/6878>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SHARMA, G. *et al.* Activated Carbon as Superadsorbent and Sustainable Material for Diverse Applications. **Journal of Environmental Chem. Eng.** v.10, 2022.

SHAHIDA, Muhammad Kashif *et al.* Synthesis of bone char from cattle bones and its application for fluoride removal from the contaminated water. **Groundwater For Sustainable Development**. Korea, p. 324-331. dez. 2019. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352801X18302534?via%3Dihub. Acesso em: 29 jun. 2025.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; PILÓ-VELOSO, D. A pirólise como técnica analítica. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1–10, 2008.

SOUSA, J. R. M.; LIMA, M. Simpósio online sulamericano de tecnologia, engenharia e ciência de alimentos, 2022, Patos de Minas. POTENCIAL DOS RESÍDUOS DO ABATE SUÍNO COMO APROVEITAMENTO NA PRODUÇÃO DE RAÇÃO ANIMAL: UMA REVISÃO. Patos de Minas, Mg: Tecal, 2022. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marieli-De>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SOARES, A. G. **Adsorção de gases em carvão ativado de celulignina**. 2001. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SOUZA, E. A. G. **Produção de biochar a partir do reaproveitamento de casca de eucalipto**. 2023. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeira, Instituto de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2023.

SOUZA, J. P. **Produção e modificação de carvões ativados a partir de matérias-primas de baixo custo: osso bovino e cascas de sementes de moringa**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

TEIXEIRA, V. G. *et al.* Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 808–818, 2001.

TETZLAFF, A. C. **Remoção de corante reativo usando carvão ativado de ossos bovinos magnético**. 2021. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Processos Químicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2021.

THOMMES, M. *et al.* Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**. v. 87, n. 9, p. 1051–1069, 2015.

TOVAR-GÓMEZ, R. *et al.* Adsorption characteristics of bone char for removing fluoride from water and its application in a defluoridation column. **Environmental Technology**, v. 34, n. 17, p. 2537–2546, 2013.

VIEIRA, G. E. G. *et al.* Low temperature conversion (LTC) – An alternative method to treat sludge generated in an industrial wastewater treatment station – **Batch and**

continuous process comparison. *Bioresource Technology*, v. 100, p. 1544–1547, 2009.

WANG, M. Y. *et al.* Comparative evaluation of bone chars derived from bovine parts: Physicochemical properties and copper sorption behavior. ***Science of the Total Environment***, v. 700, p. 134470, 2020.

ZHANG, J. *et al.* Effects of pyrolysis temperature on the physical and chemical structure of biochar derived from vermicompost. ***Bioresource Technology***, v. 270, p. 17–24, 2018.

ZHANG, Y. *et al.* Influence of pork and bone on product characteristics during the fast pyrolysis of pig carcasses. ***Waste Management***, v. 75, p. 352–360, 2018.