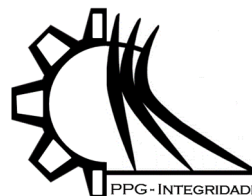




ISSN 2447-6102



70

Artigo

## ESTUDO TÉRMICO DE MATERIAIS BASEADOS EM CINZA DE BAGAÇO DE CERVEJA PARA APLICAÇÃO NA ADSORÇÃO SELETIVA DE COMPOSTOS DE ENXOFRE.

Rodrigues, P.A.A.<sup>1</sup>, Costa, A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Tecnologias Ambientais, Materiais e Energia (LATAME) e Laboratório Biogama. Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, Campus UnB Gama, Brasília, DF. CEP: 72444-210; [Andraderodrigues.pedroaugusto@gmail.com](mailto:Andraderodrigues.pedroaugusto@gmail.com)

<sup>2</sup> Laboratório de Tecnologias Ambientais, Materiais e Energia (LATAME) e Laboratório Biogama. Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, Campus UnB Gama, Brasília, DF. CEP: 72444-210; [andreaacosta@unb.br](mailto:andreaacosta@unb.br)

Received: 30/05/2025; Accepted: 03/06/2025; Published: 10/06/2025

**Resumo:** Catalisadores baseados em bagaço de cerveja representam hoje uma fonte de estudos importante, tendo em vista resultados positivos apresentados por outras biomassas. O bagaço de cerveja (BGE) é uma opção viável no preparo de catalisadores, observando que o resíduo gerado, a cinza do bagaço de cerveja (CBC), apresenta características físico-químicas apropriadas para uso como suporte catalítico. O objetivo principal deste trabalho foi caracterizar a CBC geradas em diferentes temperaturas, e posteriormente foram caracterizá-las por difração de raios X (DRX), espectroscopia por infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX-FRX) e análises térmicas (TG/DTG). O principal alvo é determinar qual é a melhor temperatura de calcinação, para aplicações futuras na síntese de catalisadores capazes de adsorver compostos contendo enxofre.

**Palavras-chave:** Bagaço de Cerveja; Cinza do bagaço de cerveja; Caracterização;

**Abstract:** Catalysts based on brewer's spent grain currently represent an important area of study, considering the positive results obtained with other biomasses. Brewer's spent grain (BSG) is a viable option for catalyst preparation, observing that the generated residue, brewer's spent grain ash (BSGA), exhibits suitable physicochemical characteristics for use as a catalytic support. The main objective of this work was to characterize BSGA generated at different temperatures, and subsequently characterize them using X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), energy-dispersive X-ray fluorescence (EDX-XRF), and thermal analyses (TG/DTG). The primary aim is to determine the optimal calcination temperature for future applications in the synthesis of catalysts capable of adsorbing sulfur-containing compounds.

**Keywords:** Brewer's Spent Grain (BSG); Brewer's Spent Grain Ash (BSGA); Characterization;

### 1. Introdução

O bagaço de cerveja (BGE), principal subproduto da indústria cervejeira, representa um volume significativo de resíduos agroindustriais gerados globalmente. Estima-se que para cada 100 litros de cerveja produzida, cerca de 20 kg de BGE são gerados.<sup>1</sup> Sua composição rica em lignocelulose (celulose, hemicelulose e lignina) e proteínas o torna um material com potencial para diversas aplicações,

incluindo alimentação animal, produção de biogás, extração de compostos de valor agregado e, mais recentemente, como precursor para materiais avançados.<sup>2</sup> No entanto, o grande volume gerado e sua alta umidade representam desafios logísticos e ambientais para as cervejarias, tornando essencial o desenvolvimento de rotas de valorização eficientes e sustentáveis.

A conversão térmica do BGE, como a combustão ou pirólise, é uma alternativa para recuperação energética, aproveitando seu poder calorífico. Este processo, contudo, gera um resíduo sólido final: a cinza do bagaço de cerveja (CBC). Assim como outras cinzas de biomassa, como a cinza da casca de arroz (CCA) e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), a CBC tem despertado interesse como matéria-prima de baixo custo para novas aplicações. A composição química dessas cinzas varia consideravelmente dependendo da biomassa original e das condições do processo térmico (temperatura, tempo, atmosfera). Enquanto a CCA e a CBCA são conhecidas pelo alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), frequentemente superior a 80-90% em condições controladas,<sup>3,4</sup> estudos preliminares, incluindo o presente trabalho, indicam que a CBC pode apresentar teores significativos não apenas de  $\text{SiO}_2$  (tipicamente 35-40%), mas também de pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), além de outros óxidos como  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ .<sup>5,6</sup> Esta composição mista confere à CBC propriedades potencialmente distintas de outras cinzas mais ricas em sílica.

A sílica presente nas cinzas de biomassa, especialmente quando obtida em estado amorfo através de tratamento térmico controlado, é de grande interesse para aplicações em catálise e adsorção. A estrutura amorfa geralmente está associada a uma maior área superficial e reatividade em comparação com as formas cristalinas (como o quartzo). A utilização de cinzas como suporte catalítico na catálise heterogênea é uma área promissora. Na catálise heterogênea, o catalisador (fase sólida) e os reagentes/produtos (fase fluida) estão em fases distintas, facilitando a separação do catalisador ao final do processo, sua regeneração e reutilização, além de permitir o uso de reatores de configuração mais simples.<sup>7,8</sup> O suporte catalítico desempenha um papel crucial, pois além de dispersar a fase ativa (aumentando a eficiência), pode influenciar a atividade e seletividade da reação através de interações metal-suporte ou por suas próprias propriedades ácido-base e texturais.<sup>9</sup> A CBC, com sua composição mista de óxidos, pode oferecer uma superfície com diferentes tipos de sítios ativos (ácidos e básicos) e propriedades texturais interessantes após otimização do processo de calcinação.

Uma aplicação potencial para materiais derivados da CBC é a adsorção seletiva de compostos de enxofre presentes em combustíveis fósseis. A remoção de enxofre (dessulfurização) é mandatória devido a regulamentações ambientais cada vez mais estritas, visando reduzir a emissão de óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), precursores da chuva ácida e poluentes atmosféricos nocivos à saúde.<sup>10</sup> A dessulfurização oxidativa (ODS), combinada com adsorção, tem se mostrado uma alternativa eficaz aos processos convencionais de hidrodessulfurização (HDS), especialmente para remover compostos refratários como dibenzotiofenos.<sup>11</sup> Neste contexto, o desenvolvimento de adsorventes eficientes, de baixo custo e sustentáveis é fundamental. Materiais porosos com sítios ativos adequados, como zeólitas modificadas<sup>12</sup> ou carvões ativados, têm sido investigados. A CBC, após tratamento térmico adequado para otimizar sua estrutura porosa e química de superfície, poderia atuar como um adsorvente direto ou como suporte para fases ativas em processos de ODS ou adsorção direta de compostos sulfurados. Estudos anteriores já demonstraram a capacidade adsorptiva da CBC (ativada ou não) para outras moléculas, como corantes,<sup>13</sup> indicando seu potencial.

Considerando a abundância do BGE, a necessidade de sua valorização e o potencial da CBC como material precursor para aplicações em catálise e adsorção, este trabalho foca no estudo do efeito da temperatura de calcinação nas propriedades físico-químicas da CBC. O objetivo principal é caracterizar detalhadamente as cinzas obtidas em diferentes temperaturas (450°C, 550°C, 650°C e 750°C) utilizando técnicas como análises térmicas (TG/DTG), fluorescência de raios X (EDX-FRX), espectroscopia no infravermelho (FTIR) e difração de raios X (DRX). A compreensão de como a temperatura afeta a composição, estrutura e morfologia da CBC é crucial para determinar as condições ótimas de preparo visando futuras aplicações na síntese de adsorventes e/ou catalisadores para a remoção seletiva de compostos de enxofre.

## 2. Materiais e Métodos

### Materiais

O bagaço de cerveja (BGE) empregado como matéria-prima neste estudo foi coletado diretamente de um lote de produção da cervejaria artesanal Bracitorium, localizada em Brasília-DF. A coleta foi realizada logo após a etapa de mostura e lavagem dos grãos, garantindo a representatividade do resíduo gerado no processo cervejeiro da referida planta. Amostras foram acondicionadas em recipientes limpos e transportadas imediatamente ao laboratório para processamento.

### Preparação da Cinza do Bagaço de Cerveja (CBC)

O tratamento inicial do BGE in natura visou a redução da elevada umidade característica deste resíduo, que pode ultrapassar 80% <sup>14</sup>. As amostras foram espalhadas em bandejas de aço inoxidável e submetidas a uma pré-secagem em estufa com circulação de ar a uma temperatura branda de aproximadamente 50 °C por um período de 24 horas (overnight), ou até atingir umidade residual inferior a 10%. Esta etapa facilita a etapa subsequente de moagem.

Após a pré-secagem, o BGE foi moído utilizando um triturador de alimentos específico para o laboratório para reduzir o tamanho das partículas e aumentar a homogeneidade do material. O material moído foi então dividido para obtenção de amostras representativas para a calcinação.

Porções conhecidas do BGE moído foram transferidas para cadinhos de porcelana. Os cadinhos foram então introduzidos em um forno mufla e submetidos a um programa de calcinação controlado. O programa iniciou com uma rampa de aquecimento até 100 °C, permanecendo nesta temperatura por 1 hora para garantir a remoção completa da umidade residual. Em seguida, aplicou-se uma taxa de aquecimento controlada de 10 °C min<sup>-1</sup> até atingir as temperaturas finais de calcinação estabelecidas: 450 °C, 550 °C, 650 °C e 750 °C. A escolha desta taxa de aquecimento visa promover uma decomposição térmica gradual e controlada da matéria orgânica. As amostras permaneceram em suas respectivas temperaturas finais de patamar por um período de 5 horas, sob atmosfera de ar estático (ambiente oxidante dentro da mufla), para assegurar a combustão completa da matéria orgânica e a formação da cinza (CBC). Após o período de calcinação, o forno foi desligado e as amostras resfriadas lentamente até a temperatura ambiente dentro da própria mufla para evitar choques térmicos. As cinzas resultantes (CBC-450, CBC-550, CBC-650, CBC-750) foram cuidadosamente removidas dos cadinhos, pesadas para cálculo do rendimento de cinzas, e armazenadas até a realização das análises de caracterização.

### **Técnicas de Caracterização**

As amostras de CBC obtidas nas diferentes temperaturas, bem como a amostra de BGE in natura, foram submetidas a um conjunto de técnicas de caracterização para avaliação de suas propriedades térmicas, químicas e estruturais.

#### **Análises Térmicas (TG/DTG/DTA)**

A análise termogravimétrica (TG) foi realizada no BGE in natura para investigar seu perfil de decomposição térmica e auxiliar na definição das temperaturas de calcinação. Utilizou-se um analisador térmico simultâneo (TA Instruments modelo Thermo). Aproximadamente 10 mg da amostra foram acondicionados em um cadinho de alumina e aquecidos, desde a temperatura ambiente (aprox. 25 °C) até 1000 °C, com uma taxa de aquecimento constante de 10 °C/min. O experimento foi conduzido sob atmosfera oxidantes. As curvas TG (variação de massa em função da temperatura), DTG (taxa de variação de massa) e DTA (diferença de temperatura em relação a um material inerte) foram registradas simultaneamente.

#### **Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX/FRX)**

A composição química elementar (expressa em óxidos) das amostras de CBC foi determinada por fluorescência de raios X por energia dispersiva. Utilizou-se um espectrômetro (Marca: Shimadzu, Modelo: EDX 720HS). As amostras de cinza, previamente secas e finamente pulverizadas em almofariz de ágata, foram analisadas como pó solto em porta-amostra específico com filme fino de polipropileno. As análises foram realizadas sob vácuo para melhorar a detecção de elementos leves. A quantificação dos elementos majoritários foi realizada utilizando o método de parâmetros fundamentais (FP) disponível no software do equipamento, que corrige efeitos de matriz e compara as intensidades medidas com padrões teóricos.

#### **Medidas de infravermelho (FTIR)**

Os grupos funcionais presentes na superfície das amostras de CBC e do BGE in natura foram identificados por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier. Os espectros foram obtidos utilizando um espectrômetro (Marca: FT-MIR Shimadzu, Modelo: IRPrestige 21) equipado com um acessório de refletância difusa (DRIFT - Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy). Para cada análise, uma pequena quantidade da amostra em pó foi colocada no porta-amostra do acessório DRIFT. Os espectros foram registrados na região de 4000 a 400 cm<sup>-1</sup>, com resolução espectral de 4 cm<sup>-1</sup> e acúmulo de 64 varreduras para melhorar a relação sinal-ruído.

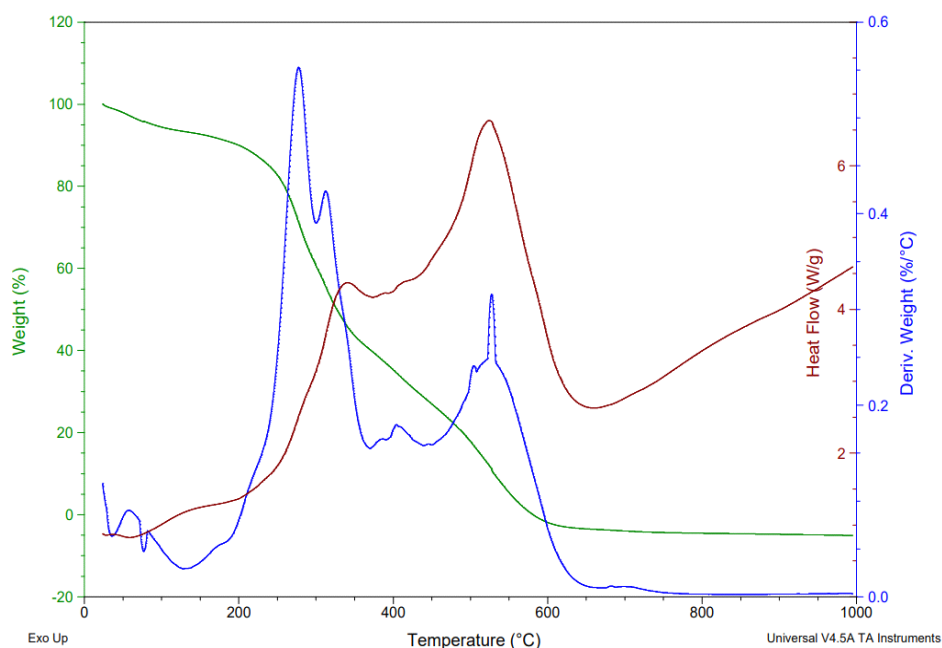
#### **Difração de Raios X (DRX)**

A análise da estrutura cristalina e a identificação das fases presentes nas amostras de CBC foram realizadas por difração de raios X (método do pó). Utilizou-se um difratômetro (Marca: Bruker, Modelo: D8 FOCUS). As amostras em pó foram acondicionadas em um porta-amostra padrão. Os difratogramas foram obtidos varrendo o ângulo de difração (2θ) na faixa de 10° a 90°, com um passo de 0,02° e um tempo de contagem de 1 segundo por passo, resultando em uma taxa de varredura efetiva de aproximadamente 1° min<sup>-1</sup>. A identificação das fases cristalinas foi realizada por comparação dos picos de difração obtidos, com padrões de referência utilizando software apropriado.

### 3. Resultados e Discussões

A análise térmica do BGE in natura (Figura 1 do artigo original) fornece informações cruciais sobre o processo de decomposição térmica em atmosfera oxidante (ar sintético), guiando a escolha das temperaturas de calcinação para a produção das cinzas. A curva TG mostra a perda de massa progressiva com o aumento da temperatura, enquanto a curva DTG (primeira derivada da TG) evidencia as temperaturas onde as taxas de perda de massa são máximas, correspondendo aos principais eventos de decomposição. A curva DTA indica a natureza exotérmica ou endotérmica desses eventos.

#### Análise Térmica (TG/DTG/DTA) do Bagaço de Cerveja in natura.



**Figura 1.** Análise térmica do bagaço de cerveja.

A análise térmica foi realizada no bagaço de cerveja in natura, e apresenta 4 regiões definidas, que são corroboradas pela literatura sobre biomassa lignocelulósica <sup>15</sup>, que serão descritas nos tópicos a seguir.

- **Secagem (até ~150°C):** A primeira região apresenta um pico entre 50 e 100°C, que representa a perda de água presente na amostra.
- **Decomposição da Hemicelulose e Celulose (150 - 350 °C):** Entre 150 e 350°C se encontra a segunda região, a qual apresentou um pico em ~250°C, onde se observa a maior perda de massa. Segundo a literatura é a região onde se inicia a decomposição do material orgânico, principalmente a Hemicelulose e a Celulose. É a região de maior decomposição da planta.

- **Decomposição da Lignina e Carbono Residual (350 - 600 °C):** Na terceira região, entre 350 e 600 °C, é possível observar a decomposição dos compostos lignocelulósicos, por ser uma macromolécula aromática complexa ela decompõe-se em uma temperatura mais alta que a hemicelulose e a celulose.
- **Decomposição de Carbonatos e Formação Final da Cinza (> 600 °C):** Na quarta região, acima de 600 °C, ocorre a degradação do restante dos materiais orgânicos e materiais inorgânicos presentes, o que explica a curva menos acentuada.

Os resultados da análise térmica justificam a escolha das temperaturas de calcinação (450, 550, 650 e 750 °C). A 450 °C, espera-se que a maior parte da hemicelulose e celulose tenha sido decomposta, mas a lignina e o carbono residual podem ainda estar em processo de combustão. Temperaturas mais elevadas (550-750 °C) visam garantir a remoção mais completa da matéria orgânica e investigar possíveis transformações estruturais na cinza inorgânica.

#### Composição Química (EDX/FRX) das Cinzas (CBC)

A Tabela 1 apresenta a composição elementar das CBCs obtidas nas diferentes temperaturas. Um resultado notável e um tanto distinto de outras cinzas de biomassa como CCA e CBCA é a presença de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como componente majoritário (média de 39,20%), superando ligeiramente o teor de SiO<sub>2</sub> (média de 36,55%). Este achado é consistente com alguns relatos na literatura que indicam teores elevados de fósforo no BGE, originário principalmente da cevada.<sup>6</sup> A presença significativa de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, juntamente com CaO (média 10%), MgO (média 7%) e K<sub>2</sub>O (média ~4%), confere à CBC um caráter químico complexo, potencialmente com sítios ácidos (associados a P e Si) e básicos (associados a Ca, Mg, K).

**Tabela 1.** Composição Química da CBC.

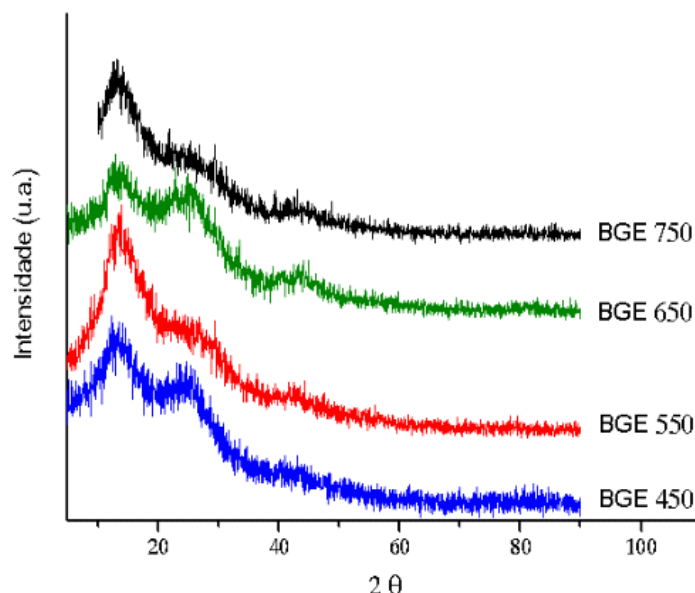
| Composição (%) |                               |                  |      |      |                  |        |
|----------------|-------------------------------|------------------|------|------|------------------|--------|
| (C°)           | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO  | MgO  | K <sub>2</sub> O | Outros |
| 450°C          | 37,4                          | 37,9             | 10,6 | 5,94 | 3,86             | 4,15   |
| 550°C          | 40,2                          | 35,2             | 10,2 | 7    | 4,33             | 2,95   |
| 650°C          | 39,5                          | 35,8             | 9,62 | 7,44 | 4,21             | 3,29   |
| 750°C          | 39,5                          | 37,2             | 9,21 | 7,6  | 4,15             | 2,24   |

A variação da composição com a temperatura de calcinação é relativamente pequena, mostrando a estabilidade dos componentes presentes na amostra e indicando que os materiais apresentam uma volatilização e transformação pequena. Com o tempo a fração “Outros” diminui com o aumento da temperatura, o que pode estar relacionado à remoção mais completa de carbono residual ou outros elementos minoritários voláteis.

#### Análise Estrutural (DRX)

Conforme esperado, os dados de DRX demonstram que a temperatura apresenta influência direta nas características cristalográficas da amostra.

**Figura 2.** Difratomogramas de raios X das amostras estudadas.



Como apresentado na Figura 2, os resultados apresentados demonstram a forma amorfa, característica predominante dos óxidos gerados pelo processo de calcinação. Ao observar as estruturas da CBC, observa-se halos largos e de baixa intensidade, centrados na região de  $2\theta$  (entre  $10-20^\circ$ ,  $20-35^\circ$  e  $35-50^\circ$ ). A ausência de picos de difração nítidos e bem definidos confirma que, nas condições estudadas, não houve cristalização significativa dos componentes da cinza, especialmente da sílica.

A manutenção da sílica em estado amorfo é desejável para muitas aplicações, pois geralmente está associada a maior área superficial e reatividade. O fato de a CBC permanecer amorfa até  $750^\circ\text{C}$  é um indicativo positivo.

A presença de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e outros óxidos também contribui para a complexidade do padrão de difração, podendo formar fases amorfas de fosfatos ou silicofosfatos que se sobrepõem ao halo da sílica amorfa. A falta de picos cristalinos definidos sugere que mesmo os componentes minoritários ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) estão presentes em fases amorfas ou em quantidades/cristalinidade insuficientes para serem detectados por DRX nestas condições.

Tendo em vista as pequenas diferenças observadas entre os difratogramas das amostras calcinadas em diferentes temperaturas podem indicar sutis variações no grau de ordenamento local ou na distribuição de tamanho de domínios amorfos, mas a característica principal de amorficidade é mantida em toda a faixa estudada.

### Análise de Grupos Funcionais (FTIR)

Os espectros de FTIR Figura 3, fornecem informações sobre as ligações químicas e grupos funcionais presentes nas amostras. A comparação entre o BGE in natura (espectro 'e') e as cinzas (espectros 'a' a 'd') evidencia a drástica mudança química ocorrida durante a calcinação.

**Figura 3.** Espectros de FTIR das CBCs: (a)  $450^\circ\text{C}$ ; (b)  $550^\circ\text{C}$ ; (c)  $650^\circ\text{C}$ ; (d)  $750^\circ\text{C}$ ; (e) amostra *in natura*.

No BGE in natura, observam-se bandas largas e intensas características de materiais lignocelulósicos: banda larga em  $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$  (vibração de estiramento O-H de grupos hidroxila em celulose, lignina, água adsorvida), bandas em  $\sim 2920$  e  $\sim 2850\text{ cm}^{-1}$  (estiramento C-H de grupos metil e metileno), banda em  $\sim 1730\text{ cm}^{-1}$  (estiramento C=O de ésteres e ácidos carboxílicos em hemicelulose), bandas em  $\sim 1650\text{ cm}^{-1}$  (deformação O-H de água adsorvida, C=O em lignina/proteínas),  $\sim 1540\text{ cm}^{-1}$  (vibrações do anel aromático da lignina, deformação N-H de amidas/proteínas), e uma região complexa entre  $1450$  e  $1000\text{ cm}^{-1}$  ("região da impressão digital") com múltiplas bandas associadas a vibrações C-O, C-C, C-O-C de polissacarídeos e lignina,<sup>16</sup> segundo Mildemberg (2018)<sup>13</sup>, as bandas entre  $1060$  e  $1180\text{ cm}^{-1}$  podem ser também, bandas de absorção, características de compostos de fósforo presentes nas cinzas. Essas bandas podem ser indicativas de que a CBC possui característica de adsorvente.

Nos espectros das cinzas (CBC-450 a CBC-750), a maioria das bandas associadas à matéria orgânica desaparece ou diminui drasticamente de intensidade, confirmando a eficácia do processo de calcinação na remoção dos componentes orgânicos. As bandas remanescentes são características dos componentes inorgânicos da cinza:

- **Bandas largas e intensas entre  $1200$  e  $900\text{ cm}^{-1}$ :** Esta região é dominada pelas vibrações de estiramento assimétrico Si-O-Si da rede de sílica amorfa (pico principal  $1050\text{-}1090\text{ cm}^{-1}$ ) e por vibrações P-O de grupos fosfato, que também absorvem fortemente nesta região (tipicamente  $\sim 1000\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$ ).<sup>13, 17</sup> A sobreposição dessas bandas torna a atribuição individual difícil, mas a intensidade nesta região confirma a presença majoritária de silicatos e fosfatos.
- **Banda em  $\sim 800\text{ cm}^{-1}$ :** Atribuída à vibração de estiramento simétrico Si-O-Si.
- **Banda em  $\sim 460\text{-}470\text{ cm}^{-1}$ :** Relacionada à vibração de deformação angular (bending) O-Si-O na rede de sílica.
- **Pequenas bandas ou ombros:** Podem existir bandas menores associadas a outros óxidos ou carbonatos residuais, ou a grupos hidroxila remanescentes (Si-OH) ou água adsorvida (banda larga  $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$  e  $\sim 1630\text{ cm}^{-1}$ ), cuja intensidade tende a diminuir com o aumento da temperatura de calcinação.

### Discussão Integrada e Implicações para Adsorção

A natureza amorfa e a composição mista (silicatos e fosfatos) são características promissoras para aplicações em adsorção. Materiais amorfos frequentemente possuem maior área superficial e porosidade que seus análogos cristalinos. A presença de diferentes óxidos pode criar uma superfície quimicamente heterogênea, com sítios ácidos de Lewis e/ou Brønsted (associados a Si-OH, P-OH) e sítios básicos (associados a óxidos metálicos ou oxigênios da rede), que podem interagir seletivamente com diferentes moléculas adsorbatas.

Para a adsorção de compostos de enxofre (como tiofenos, benzotiofenos, dibenzotiofenos presentes em combustíveis), que possuem caráter básico fraco devido ao par de elétrons livres no átomo de enxofre, sítios ácidos na superfície do adsorvente são geralmente favoráveis.<sup>18</sup> A presença de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e SiO<sub>2</sub> na CBC pode gerar tais sítios. Além disso, a interação pode ocorrer por outros mecanismos, como interações  $\pi$ -complexação com anéis aromáticos (se houver carbono residual ou grupos funcionais específicos) ou interações dipolo-dipolo.

A escolha da temperatura ótima de calcinação deve considerar um balanço: garantir a remoção adequada da matéria orgânica, que pode bloquear poros, sem induzir cristalização indesejada, que reduziria a área superficial, e preservando ou gerando os grupos funcionais de interesse na superfície. Com base nos resultados apresentados (DRX amorfo em todas as temperaturas, FTIR mostrando

remoção orgânica significativa a partir de 550°C), a faixa de 550-650 °C parece interessante para investigações futuras, como sugerido na conclusão original.

#### 4. Conclusões

Este estudo investigou sistematicamente o impacto da temperatura de calcinação (variando de 450 °C a 750 °C) nas características físico-químicas da cinza de bagaço de cerveja (CBC), visando avaliar seu potencial como precursor para materiais aplicados na adsorção seletiva de compostos de enxofre. As análises térmicas (TG/DTG) do bagaço in natura confirmaram as faixas de temperatura esperadas para a decomposição dos componentes lignocelulósicos, validando a escolha das temperaturas de calcinação para garantir a remoção da matéria orgânica.

Os resultados da caracterização das cinzas revelaram aspectos importantes. A composição química, determinada por EDX-FRX, mostrou que a CBC é um material complexo, rico não apenas em sílica (SiO<sub>2</sub>, 36-38%), mas também em pentóxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 37-40%), diferindo de outras cinzas de biomassa mais silicosas. A presença significativa de CaO, MgO e K<sub>2</sub>O também foi confirmada. Notavelmente, a composição elementar mostrou pouca variação significativa na faixa de temperatura estudada (450-750 °C), indicando a estabilidade térmica dos componentes inorgânicos majoritários.

A análise estrutural por DRX demonstrou que todas as amostras de CBC obtidas são predominantemente amorfas, independentemente da temperatura de calcinação utilizada dentro da faixa investigada. A ausência de picos cristalinos nítidos, especialmente os relacionados à sílica (como quartzo ou cristobalita), é uma característica favorável, pois a estrutura amorfa está frequentemente associada a uma maior área superficial e reatividade, propriedades desejáveis para adsorventes e suportes catalíticos.

Os espectros de FTIR corroboraram a remoção eficaz da matéria orgânica durante a calcinação e confirmaram a presença de ligações Si-O-Si e P-O como as principais estruturas na matriz inorgânica amorfa. As similaridades observadas nos espectros das amostras calcinadas em diferentes temperaturas sugerem que a estrutura funcional básica é mantida, embora sutis variações possam ocorrer. As bandas associadas aos fosfatos, destacadas no trabalho original, reforçam o potencial adsorptivo do material, possivelmente devido à criação de sítios ativos na superfície.

As temperaturas intermediárias, como 550 °C ou 650 °C, parecem ser um ponto de partida razoável para otimizações futuras, conforme sugerido no estudo original. No entanto, a avaliação definitiva da temperatura ótima exigirá estudos complementares focados nas propriedades texturais (área superficial BET, porosimetria) e na avaliação direta da capacidade adsorptiva para compostos de enxofre, correlacionando desempenho com as características físico-químicas aqui elucidadas.

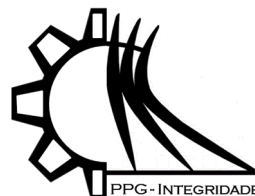
Este trabalho contribui para a valorização de um resíduo agroindustrial abundante, o bagaço de cerveja, abrindo perspectivas para o desenvolvimento de materiais de baixo custo e potencialmente sustentáveis para aplicações ambientais importantes, como a dessulfurização de combustíveis.

**Financiamento:** Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento direto, mas foi realizada com o apoio de: FAP-DF, Finatec, CAPES, CNPq, UnB, laboratório LATAME/FCTE e laboratório do IQ/UnB.

**Agradecimentos:** Gostaria de agradecer ao meu colega Ricardo Miguel, a Profa. Dra. Patrícia Braga, a Profa. Dra. Maria del Pilar e aos técnicos de laboratórios que ajudaram em algum momento da confecção deste artigo.



ISSN 2447-6102



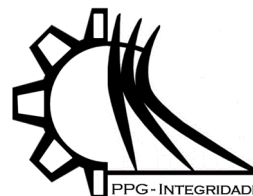
79

## Referências

- Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). *Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications*. Journal of Cereal Science, 43(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
- Lynch, K. M., Steffen, E. J., & Arendt, E. K. (2016 ). *Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health*. Journal of the Institute of Brewing, 122(4), 553-568. <https://doi.org/10.1002/jib.363>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., & Fairbairn, E. M. R. (2009 ). *Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios*. Química Nova, 32(1), 82-87. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100016>
- Soltani, N., Bahrami, A., Pech-Canul, M. I., & González, L. A. (2015 ). *Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials*. Chemical Engineering Journal, 264, 899-935.
- PIMENTEL, Paulo Alexandre. *Análise físico-química e energética do resíduo da terra diatomácea utilizada como auxiliar de filtração na indústria de cerveja*. 2006. vii, 105 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2006
- Ikram, S., et al. (2022 ). *The Potential of Brewer's Spent Grain in the Circular Bioeconomy: Reviewing Pretreatment Strategies and Current Market Status*. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 10, 870744. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.870744>
- Heineck, R. G. *Uso de carvão de bagaço de Malte na adsorção simultânea de paracetamol e diclofenaco sódico*. Universidade do Vale do Itajaí. 2022. Disponível em: <https://biblioteca.univali.br/pergamumweb/vinculos/pdf/Raphael%20Gilioli%20Heineck%202022.pdf>. Acesso em: 23 out. 2024.
- Felipe, G. B. U. *Uso de resíduos de bagaço de malte e eucalipto para a produção de biocarvões utilizados em briquetes autorredutores de minério de ferro*. Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2023. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/10816>. Acesso em: 23 out. 2024.
- Vilé, G., et al. (2020 ). *Role of the Support in Gold-Containing Nanoparticles as Heterogeneous Catalysts*. Chemical Reviews, 120(8), 3879-3939. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00662>
- Stanislaus, A., Marafi, A., & Rana, M. S. (2010 ). *Recent advances in the science and technology of ultra low sulfur diesel (ULSD) production*. Catalysis Today, 153(1-2), 1-68. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.05.011>
- Dehkordi, A.M.; Kiaei, Z.; Sobati, M.A. *Fuel Process. Technol.* 2009, 90, 435. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.010>. Acesso em: 30/10/2024
- Costa, A.A.; Wilson, W.B.; Wang, H.; Campiglia, A.D.; Dias, J.A.; Dias, S.C.L. *Microporous Mesoporous Mater.* 2012, 149, 18



ISSN 2447-6102



80

- MILDEMBERG, Adrielly Nasario. *Obtenção de carvão ativado a partir de bagaço de malte e sua aplicação na remoção de azul de metileno*. 2018. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/58998> Acesso em: 30 out. 2024.
- Jackowski, M., et al. (2022 ). *The Use of Brewer's Spent Grain after Beer Production for Energy Purposes—An Environmental and Economic Analysis*. *Materials*, 15(10), 3703. <https://doi.org/10.3390/ma15103703>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007 ). *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Faix, O. (1991 ). *Classification of lignins from different botanical origins by FT-IR spectroscopy*. *Holzforschung*, 45(s1), 21-27. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1991.45.s1.21>
- Liu, D., et al. (2013 ). *Preparation and characterization of silica-phosphate composite coatings on titanium surface by sol-gel method*. *Applied Surface Science*, 285, 788-794. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.08.124>
- Hernández-Maldonado, A. J., & Yang, R. T. (2004 ). *Desulfurization of transportation fuels by adsorption*. *Catalysis Reviews*, 46(2), 111-150. <https://doi.org/10.1081/CR-200033673>