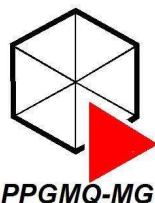




Universidade Federal do Triângulo Mineiro



Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais

Dissertação de Mestrado

Produção e caracterização de carvão ativado proveniente de cascas de grãos de café e de cascas de grãos de girassol

Autor: Guilherme Lucas Silva Borges

Orientadora: Dra. Cássia Regina Cardoso

Coorientador: Dr. Daniel Alves Cerqueira

Uberaba

2024

Guilherme Lucas Silva Borges

Produção e caracterização de carvão ativado proveniente de cascas de grãos de café e de cascas de grãos de girassol

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais, área de concentração “Química” (Linha de Pesquisa: Química Ambiental) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Orientadora: Prof(a). Dr(a). Cássia Regina Cardoso

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Alves Cerqueira

Uberaba

2024

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

B731p	Borges, Guilherme Lucas Silva Produção e caracterização de carvão ativado proveniente de cascas de grãos de café e de cascas de grãos de girassol / Guilherme Lucas Silva Borges. -- 2024. 260 f. : il., graf., tab. Dissertação (Mestrado Multicêntrico em Química de Minas Gerais) -- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2024 Orientadora: Profa. Dra. Cássia Regina Cardoso Coorientador: Prof. Dr. Daniel Alves Cerqueira 1. Carvão ativado. 2. Administração da produção. 3. Biomassa. 4. Café. 5. Girassóis. 6. Cascas. I. Cardoso, Cássia Regina. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título. CDU 661.183.2:620.95
-------	--



Ministério da Educação
Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Coordenação do Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais
Uberaba - MG

ATA DE DEFESA DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação:	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MULTICÊNTRICO EM QUÍMICA DE MINAS GERAIS			
Evento:	EXAME DE DEFESA DE MESTRADO			
Data:	12/09/2024	Início em:	14:00	Término em: 16:00
Número de matrícula aluno:	2023.1010.3			
Nome do aluno:	Guilherme Lucas Silva Borges			
Título do trabalho:	Produção e caracterização de carvão ativado proveniente de cascas de grãos de café e de cascas de grãos de girassol			
Área de concentração:	Química			
Linha de Pesquisa:	Química Ambiental			
Projeto de pesquisa vinculado:	Produção e caracterização de carvão ativado proveniente de cascas de café e de cascas de semente de girassol (APQ-00652-18)			

Reuniu-se de forma remota, utilizando-se a plataforma [GoogleMeet](https://meet.google.com/qwi-roiw-rik) (meet.google.com/qwi-roiw-rik) em conformidade com as recomendações do Ofício Circular n.º 03F/2020/PROPPG/UFTM, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MULTICÊNTRICO EM QUÍMICA DE MINAS GERAIS, assim composta dos Professores Doutores: Anizio Márcio de Faria (Universidade Federal de Uberlândia), Arthur Tadeu Freitas de Almeida Araújo (Universidade Federal do Triângulo Mineiro) e Cássia Regina Cardoso (Universidade Federal do Triângulo Mineiro), orientadora do candidato. Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dra. Cássia Regina Cardoso apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa. A seguir a senhora presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Concluída a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca se reuniu e atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO

Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada, dela sendo lavrada a presente ata, que foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **CASSIA REGINA CARDOSO, Professor do Magistério Superior**, em 12/09/2024, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



Documento assinado eletronicamente por **ARTHUR TADEU FREITAS DE ALMEIDA ARAUJO, Técnico-Administrativo em Educação**, em 12/09/2024, às 16:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANIZIO MARCIO DE FARIA, Usuário Externo**, em 12/09/2024, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1336472** e o código CRC **1866D199**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe e ao meu irmão, Adriana e Pedro, pelo apoio incondicional durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus orientadores, Professora Dra. Cássia Regina Cardoso e Professor Dr. Daniel Alves Cerqueira, pelo suporte, apoio e paciência durante o desenvolvimento desta pesquisa e, também, pela parceria e ensinamentos valiosos.

Agradeço ao Professor Dr. Anizio Marcio de Faria e a técnica Carolina Martins Rodrigues do Laboratório de Química do Instituto de Ciências Exatas e Naturais do Pontal, da Universidade Federal de Uberlândia, pelas análises de caracterização superficial das amostras.

Agradeço aos técnicos Arthur, Diógenes e Lorraine do Laboratório de Química do Instituto de Ciências Exatas, Naturais e Educação, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, pelo apoio e auxílio durante a realização dos ensaios e análises no laboratório.

Agradeço ao Técnico Flaysner Magayver Portela e ao Laboratório de Caracterização de Materiais, da Universidade Federal de Uberlândia, pelas análises de microscopia eletrônica de varredura e microanálise química por espectroscopia por energia dispersiva.

Agradeço à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, ao Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais e à Rede Mineira de Química pelo apoio e infraestrutura oferecida para realização desta pesquisa.

Agradeço à Fundação de Apoio à Pesquisa Mineira (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio e recursos dos projetos FAPEMIG (APQ-00652-18), CNPq (408926/2021-0) e FINEP (01.13.0371.00).

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio e bolsa de mestrado ofertada.

RESUMO

O estudo do emprego de biomassas e resíduos lignocelulósicos na produção de carvão ativado tem apresentado resultados positivos para o desenvolvimento de novas tecnologias que são empregadas com o intuito de colaborar com processos que envolvam a utilização de tais adsorventes. Os resíduos lignocelulósicos provenientes do cultivo de diferentes biomassas são materiais que apresentam produção elevada e, se descartados de forma inadequada, podem ocasionar em problemas ambientais. Qualquer material carbonáceo pode ser empregado para a produção de carvão ativado, desde que apresente baixo teor de componentes inorgânicos, baixo custo, alta disponibilidade, não sofrer degradação na etapa de armazenamento, facilidade na etapa de ativação e produção de bons adsorventes. O presente trabalho tem como objetivo a produção e caracterização de carvões ativados provenientes de cascas de grãos de café e cascas de grãos de girassol, biomassas residuais encontradas em larga escala em território nacional devido às produções de café e óleo de girassol. O método empregado consiste na realização da carbonização prévia das biomassas a 700°C sob atmosfera inerte de nitrogênio (N₂), seguida pelo processo de ativação com o hidróxido de potássio (KOH) em meio seco. Os parâmetros de ativação como a temperatura de ativação (600, 700 e 800°C) e a razão mássica de impregnação (1:1, 1:2 e 1:4) foram avaliados durante a produção dos adsorventes. A caracterização dos carvões ativados produzidos foi realizada a partir de técnicas como: espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), análises de área superficial, volume médio de poros e distribuição de poros a partir de isothermas de adsorção-dessorção de BET e microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises de microscopia indicaram o desenvolvimento de uma estrutura porosa predominantemente formada por mesoporos e microporos, com alto teor de carbono e oxigênio na composição dos adsorventes. A amostra de carvão ativado que apresentou os melhores resultados foi a produzida a partir de cascas de grãos de girassol, ativada a 700°C com razão de impregnação de 1:4 (carvão:KOH), apresentando área superficial de 1326,54 m².g⁻¹, volume médio de poros de 0,7947 cm³.g⁻¹ e diâmetro médio de poros de 2,34 nm. A partir dos resultados obtidos, é possível afirmar que ambas as biomassas estudadas apresentam características químicas e estruturais favoráveis para a produção de carvão ativado e, também, que o método de ativação empregado proporcionou o desenvolvimento de uma estrutura porosa com alto valor de área superficial quando comparada com outros materiais presentes na literatura.

Palavras-chave: Produção de carvão ativado. Biomassas lignocelulósicas. Cascas de grãos de café. Cascas de grãos de girassol.

ABSTRACT

The study of the use of biomass and lignocellulosic waste in the production of activated carbon has shown positive results for the development of new technologies that are used to collaborate with processes that involve the use of those adsorbents. Lignocellulosic residues from the cultivation of different biomasses are materials that are produced on a large scale and, if disposed of inappropriately in the environment, can cause environmental problems. Any carbonaceous material can be used to produce activated carbon, as long as it has a low content of inorganic components, low cost, high availability, does not suffer degradation during storage, is easy to activate and produces good adsorbents. The aim of this work is to produce and characterize activated carbon from coffee seed husks and sunflower seed husks, residual biomass found on a large scale in Brazil due to the production of coffee and sunflower oil. The method used consists of previously carbonizing the biomass at 700°C under an inert atmosphere of nitrogen (N₂), followed by an activation process using potassium hydroxide (KOH) in a dry method. The activation parameters such as the activation temperature (600, 700 and 800°C) and the impregnation mass ratio (1:1, 1:2 and 1:4) were evaluated during the production of the adsorbents. The activated carbons produced were characterized using techniques such as: Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), surface area analysis, average pore volume and pore distribution based on BET adsorption-desorption isotherms and scanning electron microscopy (SEM). The microscopy analyses indicated the development of a porous structure predominantly formed by mesopores and micropores, with a high carbon and oxygen content in the composition of the adsorbents. The activated carbon sample that showed the best results was the one produced from sunflower seed husks, activated at 700°C with an impregnation ratio of 1:4 (coal:KOH), showing a surface area of 1326,54 m².g⁻¹, an average pore volume of 0,7947 cm³.g⁻¹ and an average pore diameter of 2.34 nm. Based on the results obtained, it is possible to state that both biomasses studied have favorable chemical and structural characteristics for the production of activated carbon, and also that the activation method used led to the development of a porous structure with a high surface area value when compared to other materials in the literature.

Keywords: Activated carbon production. Lignocellulosic biomass. Coffee seed husks. Sunflower seed husks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Estrutura geral da biomassa lignocelulósica.	23
Figura 2. Representação de parte da estrutura da celulose.	24
Figura 3. Estrutura dos principais açúcares e monossacarídeos derivados das hemiceluloses.	25
Figura 4. Representação de parte da estrutura de uma hemicelulose.	25
Figura 5. Estrutura proposta para lignina formada a partir dos álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico.	26
Figura 6. Anatomia do fruto maduro do cafeeiro.	30
Figura 7. Anatomia do grão de girassol.	32
Figura 8. Regiões presentes na estrutura porosa do carvão ativado.	44
Figura 9. Exemplo dos possíveis grupos funcionais encontrados na superfície de carvões ativados.	46
Figura 10. Tipos de isotermas de adsorção para um sistema gás-sólido.	66
Figura 11. Resíduos lignocelulósicos utilizados na produção de carvão ativado.	71
Figura 12. Forno mufla utilizado.	83
Figura 13. Esquema representativo do processo de produção dos carvões ativados.	85
Figura 14. Isoterma de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 700°C – 1:4.	98
Figura 15. Distribuição e diâmetro de poros dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café.	100
Figura 16. Perfil predominante de diâmetro de mesoporos (ampliação da Figura 15 para a região entre 1 e 10 nm) dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café.	101
Figura 17. Isoterma de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 700°C – 1:4.	104
Figura 18. Distribuição e diâmetro de poros dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol.	106
Figura 19. Perfil predominante de diâmetro de mesoporos (ampliação da Figura 18 para a região entre 1 e 10 nm) dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol.	107
Figura 20. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café com magnitude de 100 e ampliação de 500 μm	110

Figura 21. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café com magnitude de 1000 x e ampliação de 50 µm.	112
Figura 22. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café com magnitude de 10000 x e ampliação de 5 µm.	113
Figura 23. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café com magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.	114
Figura 24. Gráfico EDS para a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh (CCGCa).	116
Figura 25. Gráfico EDS para a amostra CACa 600°C – 1:2.	117
Figura 26. Gráfico EDS para a amostra CACa 700°C – 1:4.	117
Figura 27. Gráfico EDS para a amostra CACa 800°C – 1:2.	118
Figura 28. Mapeamento por EDS da amostra CCGCa.	119
Figura 29. Mapeamento por EDS da amostra CACa 600°C – 1:2.	119
Figura 30. Mapeamento por EDS da amostra CACa 700°C – 1:4.	120
Figura 31. Mapeamento por EDS da amostra CACa 800°C – 1:2.	120
Figura 32. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol com magnitude de 100 e ampliação de 500 µm.	122
Figura 33. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol com magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm.	124
Figura 34. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol com magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm.	125
Figura 35. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol com magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.	126
Figura 36. Gráfico EDS para a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh (CCGGi).	129
Figura 37. Gráfico EDS para a amostra CAGi 600°C – 1:2.	129
Figura 38. Gráfico EDS para a amostra CAGi 700°C – 1:4.	130
Figura 39. Gráfico EDS para a amostra CAGi 800°C – 1:2.	130
Figura 40. Mapeamento por EDS da amostra CCGGi.	131
Figura 41. Mapeamento por EDS da amostra CAGi 600°C – 1:2.	132
Figura 42. Mapeamento por EDS da amostra CAGi 700°C – 1:4, que apresentou ausência de potássio em sua composição química.	132
Figura 43. Mapeamento por EDS da amostra CAGi 800°C – 1:2.	133
Figura 44. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 600°C.	135

Figura 45. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 700°C.	136
Figura 46. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 800°C.	137
Figura 47. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 600°C.....	140
Figura 48. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 700°C.....	141
Figura 49. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 800°C.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição em porcentagem de diferentes biomassas lignocelulósicas.	23
Tabela 2. Exemplos de agentes ativadores químicos, temperaturas de ativação empregadas durante o método de ativação químico e áreas superficiais obtidas.	39
Tabela 3. Classificação feita pela IUPAC de acordo com o tamanho dos poros na estrutura de materiais porosos.	43
Tabela 4. Produção de carvões ativados a partir de resíduos lignocelulósicos.	54
Tabela 5. Produção de carvão ativado a partir de resíduos lignocelulósicos provenientes do cultivo e uso de grãos de café e grãos de girassol.	60
Tabela 6. Técnicas utilizadas e seus respectivos objetivos para caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos lignocelulósicos.	70
Tabela 7. Análise imediata dos resíduos lignocelulósicos estudados (valores médios e desvio padrão).	88
Tabela 8. Análise da composição química estrutural dos resíduos lignocelulósicos estudados (valores médios e desvio padrão).	90
Tabela 9. Análises imediatas e composição química estrutural de biomassas lignocelulósicas provenientes do cultivo de café e girassol empregadas para a produção de carvão ativado.	92
Tabela 10. Rendimento mássico percentual dos adsorventes produzidos a partir das cascas de grãos de café.	93
Tabela 11. Rendimento mássico percentual dos adsorventes produzidos a partir das cascas de grãos de girassol.	95
Tabela 12. Área superficial aparente (BET), área superficial externa, volume de microporos, volume total de poros e diâmetro médio de poro para os carvões ativados de cascas de grãos de café.	96
Tabela 13. Área superficial aparente (BET), área superficial externa, volume de microporos, volume total de poros e diâmetro médio de poro para os carvões ativados de cascas de grãos de girassol.	102
Tabela 14. Comparação entre os resultados obtidos para as análises texturais dos carvões preparados a partir de cascas de grãos de girassol e trabalhos presentes na literatura.	108
Tabela 15. Elementos químicos presentes nas amostras de carvão proveniente de cascas de grãos de café e nas amostras CACa 600°C – 1:2, CACa 700°C – 1:4 e CACa 800°C – 1:2.	115

Tabela 16. Elementos químicos presentes nas amostras de carvão proveniente de cascas de grãos de girassol e nas amostras CAGi 600°C – 1:2, CAGi 700°C – 1:4 e CAGi 800°C – 1:2.	127
Tabela 17. Resultados obtidos a partir da análise dos espectros de FT-IR das amostras preparadas a partir de cascas de grãos de café.....	134
Tabela 18. Resultados obtidos a partir da análise dos espectros de FT-IR das amostras preparadas a partir de cascas de grãos de girassol.....	139

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1 BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS	22
3.1.1 Tipos de pré-tratamentos	27
3.1.2 Cascas de grãos de café	28
3.1.3 Cascas de grãos de girassol	31
3.2 CARVÃO ATIVADO	33
3.2.1 Métodos de Ativação	35
3.2.1.1 <i>Método de Ativação Física</i>	35
3.2.1.2 <i>Método de Ativação Química</i>	38
3.2.1.3 <i>Método de Ativação Físico-Química</i>	41
3.2.2 Estrutura porosa	43
3.2.3 Características químicas da superfície de carvões ativados	45
3.2.4 Área superficial e Volume de poros	47
3.3 PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS	48
3.3.1 Processos de carbonização e ativação	51
3.3.2 Cascas de grãos de café e de grãos de girassol como precursores na produção de carvão ativado	56
3.4 CARACTERIZAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS	64
3.4.1 Isotermas de adsorção-dessorção de BET	64
3.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	68
3.4.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) ...	69
4 MATERIAIS E METODOLOGIA	71
4.1 MATERIAIS	71
4.1.1 Biomassas	71
4.1.2 Demais materiais utilizados para produção dos carvões ativados	72
4.2 METODOLOGIA	72
4.2.1 Caracterização das biomassas	72
4.2.1.1 <i>Teor de umidade</i>	72
4.2.1.2 <i>Teor de cinzas</i>	73
4.2.1.3 <i>Teor de voláteis</i>	74

4.2.1.4 Teor de carbono fixo.....	75
4.2.1.5 Teor de extrativos	75
4.2.1.6 Teor de lignina.....	77
4.2.1.7 Teor de holocelulose.....	79
4.2.1.8 Teores de alfacelulose e hemicelulose.....	80
4.2.2 Produção de carvão ativado	81
4.2.2.1 Secagem das biomassas	82
4.2.2.2 Moagem das biomassas	82
4.2.2.3 Processo de carbonização	82
4.2.2.4 Etapa de Ativação.....	83
4.2.3 Caracterização do carvão ativado.....	86
4.2.3.1 Determinação do rendimento mássico percentual	86
4.2.3.2 Propriedades texturais.....	86
4.2.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	87
4.2.3.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)	87
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS.....	88
5.1.1 Análises Imediatas e Composição Química Estrutural.....	88
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ADSORVENTES PRODUZIDOS	93
5.2.1 Rendimento dos adsorventes produzidos	93
5.2.2 Propriedades texturais	95
5.2.2.1 Propriedades texturais dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café	96
5.2.2.2 Propriedades texturais dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol.....	102
5.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	109
5.2.5.1 Micrografias dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café.....	109
5.2.5.2 Micrografias dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol.....	121
5.2.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) .	133
5.2.5.1 FT-IR dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café	133
5.2.5.2 FT-IR dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol.....	139
6 CONCLUSÕES.....	145
7 TRABALHOS FUTUROS.....	147

REFERÊNCIAS	148
APÊNDICE A – ISOTERMAS DE ADSORÇÃO-DESORÇÃO DE N₂.....	197
APÊNDICE B – MICROGRAFIAS (MEV)	207
APÊNDICE C – GRÁFICOS E TABELAS ANÁLISE EDS	229
APÊNDICE D – ESPECTROS DE FT-IR	273

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de diferentes grãos, como café e soja, em solo brasileiro é responsável por classificar o Brasil como um dos maiores produtores dessas e de outras *commodities* (CONAB, 2023). Esses produtos são destinados a diferentes setores econômicos como, por exemplo, o setor alimentício, de exportação, farmacêutico e também para o de produção de energia. As matérias-primas provenientes de vegetação terrestre ou oceânica que são empregadas na produção de energia em escala industrial são comumente referenciadas na literatura como biomassas e constituem a maior e mais importante parcela de energia renovável da atualidade (AZEVEDO et al., 2019).

As biomassas, nos últimos anos, se tornaram matérias-primas de interesse das indústrias de energia devido sua capacidade de produzir bioprodutos com características e propriedades similares aos provenientes de matérias-primas fósseis (KUKHARETS et al., 2023). A produção de energia a partir de fontes alternativas renováveis, como as biomassas, é uma forma de contornar a problemática acerca da emissão de gases poluentes na atmosfera terrestre e, também, uma das soluções encontradas para a escassez de recursos fósseis como petróleo e carvão (KOMARNICKA e MURAWSKA, 2021). O processo de queima de combustíveis fósseis é responsável por grande parte da emissão de gás dióxido de carbono na atmosfera, isso promove a intensificação do denominado efeito estufa (YAN, 2021). A utilização da biomassa para produção de biocombustíveis, por exemplo, é uma alternativa válida pois, durante o seu ciclo de vida, mais precisamente durante a fotossíntese, a planta consome grande parte do gás dióxido de carbono presente na atmosfera o que colabora para diminuição dos índices de poluição ambiental provenientes da queima de combustíveis e biocombustíveis, além disso, é um material renovável (ASHOKKUMAR et al., 2022).

Durante a produção em escala industrial de materiais a partir de biomassas, não só apenas no setor de energia, mas como no alimentício e farmacêutico, é possível identificar outros problemas como, por exemplo, a produção de rejeitos (OLUYINKA et al., 2022). Materiais como o bagaço da cana-de-açúcar, cascas de grãos de soja e sabugo do milho acabam se tornando resíduos que geralmente não são utilizados ou são destinados à queima para geração de energia pelas indústrias (VIVIAN et al., 2022) e, dependendo da forma como são descartados, podem colaborar para o processo de poluição do meio ambiente (EMBRAPA, 2022). As biomassas residuais são consideradas matérias-primas de baixo custo que podem ser encontradas em grande escala (EMBRAPA, 2016; NGUEABOUO et al., 2022) e, por apresentarem composição similar aos materiais de origem possuem características que são

interessantes para o uso na produção de bioprodutos, como biocombustíveis de segunda geração e carvão ativado (DEIVASIGAMANI et al., 2023).

A utilização da biomassa lignocelulósica residual implica na necessidade de realização de um processo de modificação das matérias-primas, denominado de pré-tratamento, para que possam ser empregadas efetivamente (GOULART, 2015). Existem diferentes processos de pré-tratamento que podem ser aplicados e a escolha é realizada de acordo com a biomassa que será utilizada (MORO, 2015). Os métodos utilizados podem ser classificados em quatro grupos, sendo: químicos, físicos, físico-químicos e biológicos (BAKSI et al., 2023). Cada processo modifica a biomassa de formas diferentes, e é a partir da etapa de pré-tratamento escolhida que será obtido o bioproduto de interesse (NAKAEMA, 2021).

Um dos métodos de aproveitamento da biomassa lignocelulósica residual que vem sendo discutido recentemente na literatura, diz respeito à produção de carvão ativado, um material poroso que apresenta capacidade adsorvente. Matérias-primas como casca de arroz (ARNELLI, SANTOSO e ASTUTI, 2021), palha de arroz (NAJAFI, SHARIFIAN e ASASIAN-KOLUR, 2022), cascas de laranja (VONNIE et al., 2022), sabugo de milho (LIU et al., 2021), casca de coco (RAHAMAN, DAS e BOSE, 2021), casca de banana (SETIAWAN et al., 2023) e caroço de abacate (SELLAOUI et al., 2021), são precursores comuns apresentados por pesquisadores em seus trabalhos. O estudo acerca da produção de materiais adsorventes, como o carvão ativado, se tornou um tópico importante devido à necessidade de tratamento de resíduos provenientes de indústrias, preocupação essa, que vem aumentando de acordo com o crescimento do setor industrial (DUTTA, ARYA e KUMAR, 2021; GILPAVAS e CORREA-SANCHEZ, 2020).

O carvão ativado pode ser empregado em processos de purificação e remoção de impurezas de águas e rejeitos industriais, na adsorção de compostos metálicos e, também, pode atuar como suporte para catálise de diferentes reações (HEYLMANN et al., 2021). Devido à presença de heteroátomos como oxigênio, nitrogênio e enxofre na forma de grupos funcionais fenólicos, carbonílicos e carboxílicos na superfície dos carvões (CHEN et al., 2020), o processo de adsorção ocorre a partir de interações entre a superfície do material sólido, denominado adsorvente, com as moléculas e átomos presentes no fluido que será tratado, que recebe o nome de adsorvato (FARIAS et al., 2020). Essas interações podem ser classificadas em quimissorção ou fisissorção, a diferença principal entre ambas é que na quimissorção ocorre a formação de ligação química entre o adsorvente e o adsorvato enquanto na fisissorção isso não é observado (GAMA, 2021).

O processo empregado para produção do carvão proveniente de biomassas é constituído basicamente por duas etapas: a carbonização em que o material é pirolisado e, em seguida ou concomitantemente, a ativação na qual o material é ativado e sua estrutura porosa é desenvolvida (WANG et al., 2019). A ativação pode ser realizada a partir de um processo químico que consiste no emprego de reagentes químicos como KOH, ZnCl₂ e H₃PO₄; ou então por um processo físico, no qual o vapor d'água e o dióxido de carbono são exemplos de agentes ativadores (NARITA, 2021). Outros materiais como óxidos metálicos, por apresentarem comportamento ácido-base, podem ser utilizados como ativadores durante o processo de produção de carvão ativado (KONNERTH et al, 2021).

Os carvões ativados podem ser classificados de acordo com suas características como, por exemplo, propriedades da superfície, técnicas de processamento, granulometria e forma, sendo encontrados no mercado, atualmente, carvões em pó, granulados, peletizados, dentre outros (GANJOO et al., 2023). É a partir da caracterização desse material que se obtém informações a respeito da área superficial, do volume de poros e outras características que serão responsáveis por definir se o material produzido é interessante para uso (BRAZIL, 2022).

Estudos prévios relatam que as diferenças em relação à estrutura, propriedades da superfície e textura do carvão ativado proveniente de biomassa se devem principalmente ao precursor utilizado (GONZÁLEZ-GARCÍA, 2018). Assim, o estudo sobre cada biomassa se torna conveniente para avaliar a qualidade dos carvões que podem ser produzidos. Uma das vantagens do emprego de biomassas para a produção de carvão ativado é a possibilidade de uso de qualquer material lignocelulósico, uma vez que esses precursores apresentam características desejáveis para a produção de adsorventes. Além disso, o emprego de biomassas na produção industrial em larga escala de carvão ativado apresenta menores custos (BAKAR et al., 2021).

No Brasil, um dos setores que exerce grande impacto na economia nacional é o setor cafeeiro. Somente em 2023 foram produzidos cerca de 54,94 milhões de sacas de 60 quilogramas de café, sendo o estado de Minas Gerais o principal estado cafeeiro do país, seguido por Espírito Santo e São Paulo (CONAB, 2023). Em 2023 foram destinados à produção de cafés cerca de 1,9 milhão de hectares, o que apresenta um aumento de 3,3% quando comparado com os dados referentes ao ano de 2022 (EMBRAPA, 2023).

Durante o processamento dos grãos de café, são obtidos diferentes resíduos como, por exemplo, o pergaminho, a polpa e a casca (DURÁN et al., 2017). As cascas de café são empregadas como fertilizante de solos por apresentarem altas quantidades de potássio em sua composição (JIANG et al., 2023). No entanto, como a produção desse grão no Brasil é elevada, nem todo o resíduo gerado é utilizado para essa finalidade, havendo um excedente que demanda

tratamento para se evitar a poluição ambiental decorrente de disposição inadequada desse material no meio ambiente.

Além do setor cafeeiro, o cultivo de girassol para a produção de óleo com destino principal às indústrias alimentícia e farmacêutica, tem apresentado grande desenvolvimento nos últimos anos (LINGAMDINNE et al., 2024). Em uma estimativa realizada pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a safra brasileira de grãos de girassol correspondeu a 54,2 mil hectares no ano de 2023 com uma produtividade de 1489 quilogramas por hectare, sendo que as áreas cultivadas estão presentes nas regiões centro-oeste, sudeste e sul do país. A casca dos grãos de girassol é um dos resíduos obtidos durante o processamento da biomassa e pode ser destinada para a alimentação de pequenas aves e bovinos, bem como para a produção de energia em caldeiras (CONAB, 2023) e, assim como a casca de café, se não descartada corretamente pode ocasionar problemas ambientais (RIVERA e ORTEGA-JIMENEZ, 2019).

As cascas de grãos de café e de girassol, são biomassas lignocelulósicas residuais que podem ser empregadas para a produção de carvão ativado. O estudo a respeito da utilização dessas biomassas residuais, como precursores na produção de adsorventes, é importante devido à disponibilidade dessas matérias-primas em solo brasileiro e da necessidade de implementar destinos sustentáveis para esses rejeitos. Além disso, quando se recorre à literatura, pesquisadores afirmam que a produção de carvão ativado a partir de cascas de grãos de café apresenta resultados positivos e, no que se diz respeito da utilização de cascas de grãos de girassol para essa finalidade, não são encontrados muitos trabalhos que relatam sua utilização para a produção de carvão ativado, mas existem informações que apresentam a possibilidade de seu emprego em processos de pirólise e ativação (ISLAM et al., 2023; BAYSAL et al., 2018; MORALI, DEMIRAL e SENSOZ, 2018).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho apresenta como foco principal preparar e caracterizar físico-química e morfologicamente carvões ativados provenientes de cascas de grãos de café e cascas de grãos de girassol.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Produzir o carvão ativado em mufla com atmosfera inerte de nitrogênio, utilizando carbonização prévia à ativação química. Submetendo as biomassas a um processo de carbonização prévia e, posteriormente, adição de KOH em diferentes razões mássicas com variação da temperatura de ativação empregada visando à avaliação dos efeitos dessas variáveis na qualidade dos carvões ativados produzidos.
- 2) Caracterizar a superfície e morfologia dos adsorventes produzidos, utilizando análises de determinação de área superficial, volume total de poros, volume de microporos, diâmetro médio de poros, distribuição de poros, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR).
- 3) Comparar as propriedades de área superficial, volume total de poros e diâmetro médio de poros dos materiais produzidos com outros materiais apresentados em trabalhos anteriores, verificando a possibilidade da geração de materiais mais econômicos que os convencionais, com elevadas áreas superficiais.
- 4) Avaliar a partir de análises de composição química estrutural o emprego das cascas de grãos de café e das cascas de grãos de girassol como materiais precursores para a produção de carvão ativado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS

A matéria orgânica não fossilizada e biodegradável proveniente de plantas e micro-organismos pode ser compreendida como biomassa (BEZERRA, 2019). Existem diferentes fontes de biomassa, sendo possível citar: resíduos agrícolas e industriais, resíduos de processamento de alimentos e plantas aquáticas como as algas (COELHO, 2018). São exemplos de biomassas a cana-de-açúcar, milho, soja e trigo, sendo que, a partir desses materiais, o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, a espiga do milho e a casca da soja são biomassas residuais (CAI et al., 2023).

A utilização de biomassas para produção de energia e outros bioprodutos tem sido muito discutida recentemente na literatura. Com a problemática acerca do aumento da emissão dos gases de efeito estufa e a tendência de esgotamento das reservas de carvão e petróleo, a necessidade de identificar alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para substituir, gradualmente, a utilização de combustíveis fósseis passou a ser foco de estudo na busca para contornar os problemas atuais (SANTOS et al., 2019).

Por ser uma matéria-prima abundante, renovável e de baixo custo, além de ser capaz de consumir o gás carbônico emitido no processo de queima para produção de energia durante seu desenvolvimento natural, as biomassas vegetais se tornaram materiais de interesse por parte dos pesquisadores (CABRAL et al., 2017). A sua utilização para produção de diferentes produtos também é vista como uma forma de colaborar para a diminuição da poluição do meio ambiente, uma vez que o descarte incorreto dos resíduos provenientes do processamento dessas matérias-primas na indústria pode colaborar para problemas ambientais (MAHALINGAM et al., 2022).

Devido às características dos componentes presentes em sua composição que, basicamente, são: celulose, lignina e hemicelulose, as biomassas vegetais são classificadas como precursores lignocelulósicos que podem ser aplicados para a produção de diferentes bioprodutos (WOICIECHOWSKI et al., 2020). A porcentagem referente à celulose, hemicelulose e lignina presentes na composição das biomassas lignocelulósicas variam de acordo com o precursor analisado (OKOLIE et al., 2021), conforme apresentado na Tabela 1. A representação da estrutura geral da biomassa lignocelulósica é ilustrada na Figura 1.

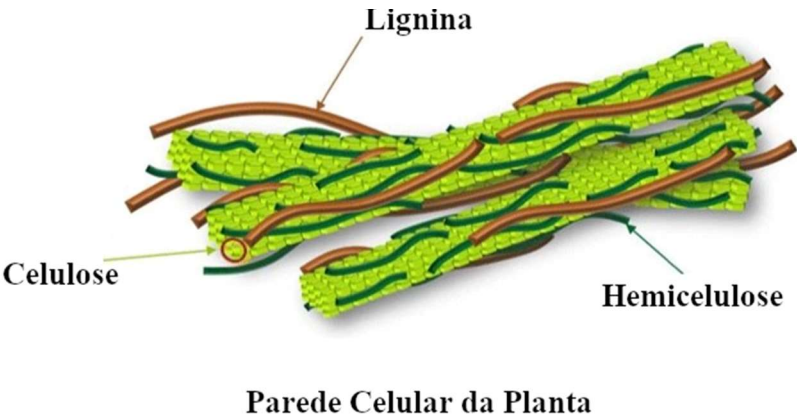
Tabela 1. Composição em porcentagem de diferentes biomassas lignocelulósicas.

Composição de diferentes biomassas lignocelulósicas presentes na literatura				
Biomassa	Composição (% base seca)			Referência
	Celulose	Hemicelulose	Lignina*	
Eucalipto	47,9 ± 1,0	16,0 ± 0,8	26,0 ± 0,8	(Vázquez et al., 2023)
Talos de Sorgo	23,6 ± 1,0	29,9 ± 0,7	24,8 ± 0,6	(Wan et al., 2019)
Coroa de Abacaxi	17,4 ± 0,5	19,1 ± 0,1	24,3 ± 0,5	(Pereira et al., 2021)
Casca de Arroz	49,6 ± 0,9	10,4 ± 0,3	21,8 ± 0,9	(Ponce et al., 2021)
Grãos de Café	12,4 ± 0,3	44,1 ± 0,7	20,6 ± 0,2	(Rijo et al., 2021)
Talo de Girassol	36,3 ± 0,2	10,1 ± 0,1	18,2 ± 0,6	(Souza et al., 2020)
Talos de Algodão	37,5 ± 0,3	21,8 ± 1,7	17,8 ± 1,0	(Wan et al., 2019)
Resíduos de Banana	36,2 ± 0,6	28,7 ± 0,6	14,7 ± 0,7	(Franqueto et al., 2020)
Bagaço de Cana-de-Açúcar	49,8 ± 0,7	30,2 ± 0,9	12,0 ± 0,6	(Calixto et al., 2022)
Sabugo de Milho	40,3 ± 0,1	43,5 ± 0,9	9,3 ± 0,2	(Laltha et al., 2021)

*Dados referentes à porcentagem de lignina total.

FONTE: Do autor, 2024.

Figura 1. Estrutura geral da biomassa lignocelulósica.

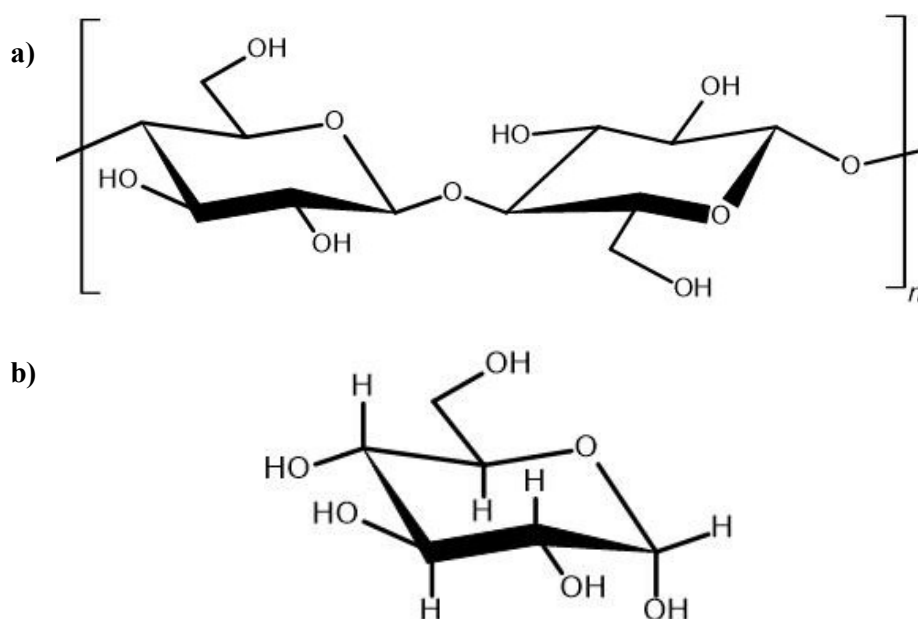


FONTE: Adaptado de JENSEN et al., 2017.

A celulose compõe a parede celular das matérias-primas vegetais (WU et al., 2022) e é compreendida como um polímero formado por D-glicopirranose (Figura 2b) ligadas covalentemente por ligações β -(1,4)glicosídicas apresentando o dissacarídeo celobiose como uma unidade básica de repetição (WANG et al., 2021). Parte da estrutura da celulose é

representada de forma simplificada na Figura 2a. Cada D-glicopirranose em sua estrutura apresenta grupos hidroxila reativos, que são capazes de formar ligações de hidrogênio, o que promove uma interação mais intensa das microfibrilas de celulose e, com isso, uma forte estrutura semicristalina (HO; ONG e WU, 2019). As fibras de celulose, presentes na composição da biomassa lignocelulósica, são envolvidas por uma matriz que consiste em lignina e hemicelulose (RADIONOVA et al., 2022).

Figura 2. Representação de parte da estrutura da celulose.

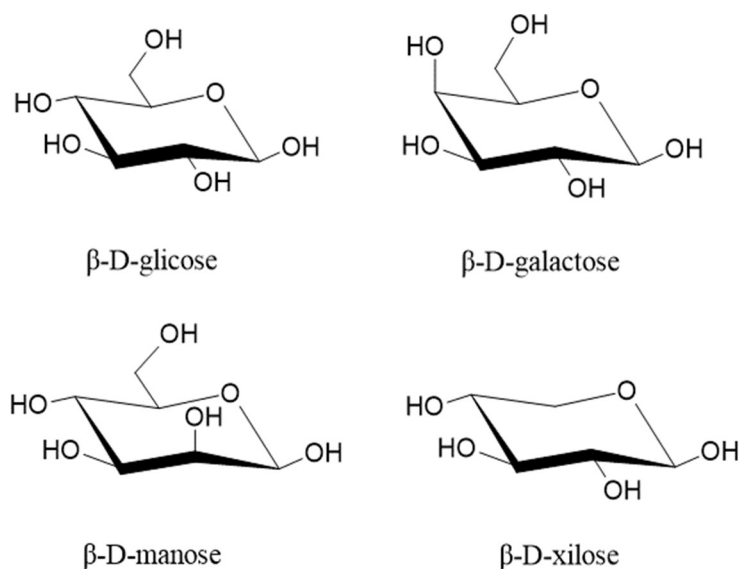


FONTE: Adaptado de HENRIQUE, 2014; ZANINE, 2016.

Nota: a) Celobiose; b) D-glicopirranose.

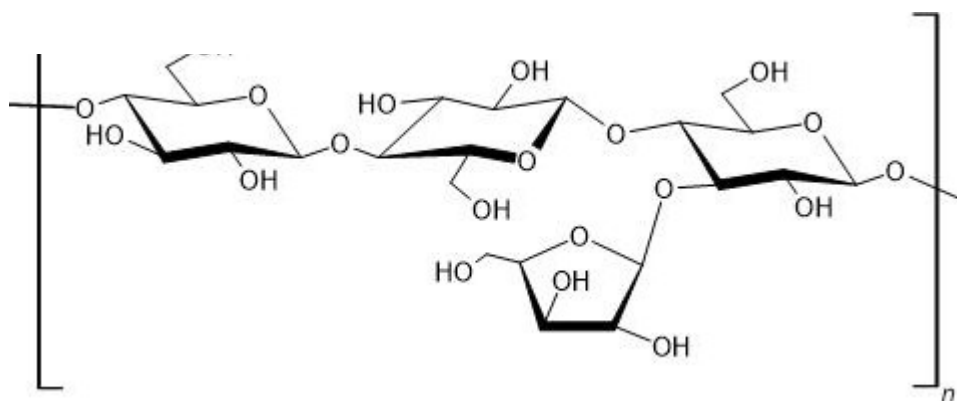
As hemiceluloses, polissacarídeos naturais, são o segundo componente mais abundante na composição de materiais lignocelulósicos sendo compostas por polímeros de β -D-glicose, β -D-galactose, β -D-manose, β -D-xilose e outros monossacarídeos de cinco e seis carbonos (DULIE et al., 2021; RAO et al., 2023). A Figura 3 apresenta os principais açúcares e monossacarídeos derivados das hemiceluloses. Devido à composição estrutural, apresentam propriedades físicas e químicas como: alto peso molecular, não apresentam toxicidade e são classificadas como não iônicas (LU et al., 2021). A Figura 4 representa parte da estrutura de forma simplificada de uma hemicelulose.

Figura 3. Estrutura dos principais açúcares e monossacarídeos derivados das hemiceluloses.



FONTE: Adaptado de SOUZA, 2012; BRAGA, 2018.

Figura 4. Representação de parte da estrutura de uma hemicelulose.

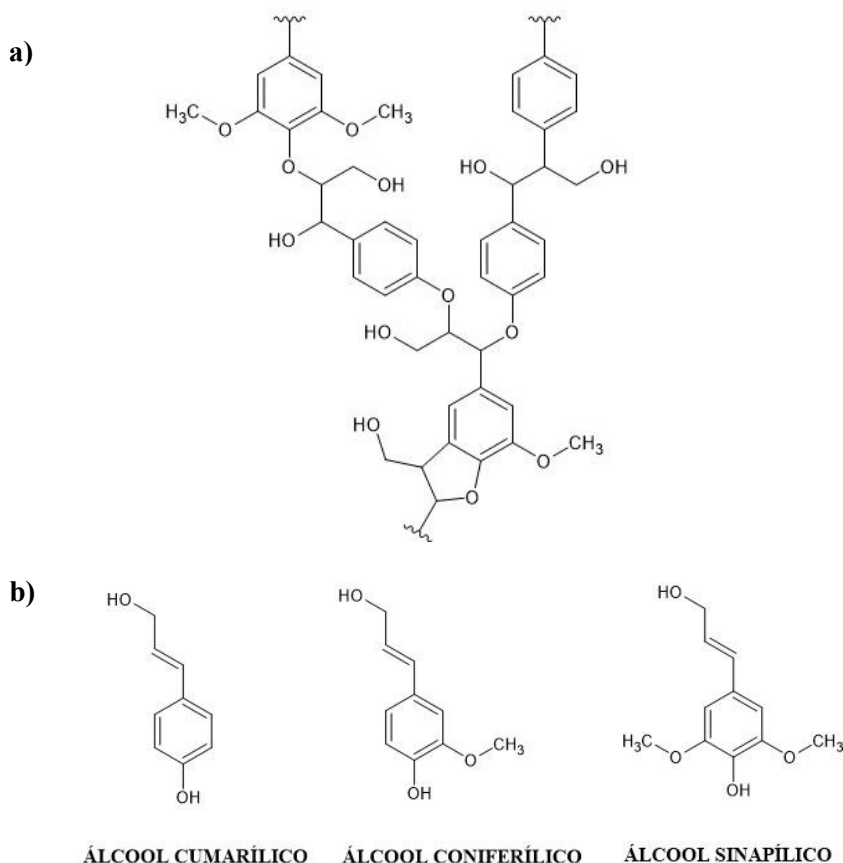


FONTE: Adaptado de TOMASINI, 2020; SILVA, 2019; SALVE, 2020.

Ao que se refere à parcela de lignina presente na composição das biomassas lignocelulósicas, esse é o componente não-carboidrato mais encontrado e responsável por conferir resistência e características hidrofóbicas à parede celular das plantas, protegendo os polissacarídeos da degradação microbiana (YOO et al., 2020). É uma macromolécula formada a partir da polimerização desidrogenativa de três álcoois: cumarílico, coniferílico e sinapílico, apresentados na Figura 5b e, que são diferenciados pelos grupos metoxilas substituintes no anel aromático (OLIVEIRA, 2021; POMPEU, 2019). Dentre os três principais componentes da biomassa, a lignina é o único componente polimérico aromático com uma estrutura formada

principalmente por ligações do tipo éter e carbono-carbono (ZHANG et al., 2022). A Figura 5a apresenta parte da estrutura de uma lignina de forma simplificada.

Figura 5. Estrutura proposta para lignina formada a partir dos álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico.



FONTE: Adaptado de LIMA, 2023; ARRUDA, 2021; FILHO, 2016; PILÓ-VELOSO, 1989.

Nota: a) Parte da estrutura proposta para a lignina obtida a partir do *Eucalyptus grandis*;
b) Estrutura dos álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico.

Cada componente dos materiais lignocelulósicos pode ser utilizado para uma finalidade diferente, sendo que, se a celulose e hemicelulose são hidrolisadas os açúcares formados podem ser fermentados e, então, destinados para a produção de biocombustíveis (PINHEIRO, 2022). A lignina é o componente mais resistente termicamente do material lignocelulósico, sendo o principal componente responsável pela produção de carvão sendo possível, também, ser convertida em fibras de carbono, resinas fenólicas e epóxi (SANTOS, 2022). Com isso,

diferentes processos podem ser aplicados para a separação dos componentes da biomassa lignocelulósica de acordo com o objetivo de produção.

As biomassas lignocelulósicas, além de serem precursores que apresentam grande potencial para a produção de energia renovável, são materiais carbonáceos que podem ser aplicados em processos de produção de calor, de produtos químicos e outros bioprodutos (ONG et al., 2021). Para que possa ser utilizado como precursor, é necessário submeter o material lignocelulósico a um processo de pré-tratamento que permite um maior acesso aos componentes da biomassa, proporcionando, assim, que os procedimentos de interesse possam ser desenvolvidos de maneira eficaz. Por isso, o pré-tratamento do material é considerado como um passo fundamental para a utilização da biomassa lignocelulósica como matéria-prima (ASHOKKUMAR et al., 2022).

3.1.1 Tipos de pré-tratamentos

Existem quatro classes diferentes de pré-tratamentos que podem ser aplicados para o uso das biomassas lignocelulósicas, são eles: tratamentos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos (LIMA, 2019). Os processos de pré-tratamento são aplicados, geralmente, com o intuito de promover a separação dos componentes estruturais da biomassa lignocelulósica tornando-os mais disponíveis para processos de biodegradabilidade, sendo a escolha da rota de processamento feita de acordo com o produto que se pretende obter (HALDAR e PURKAIT, 2021).

A realização de um pré-tratamento físico envolve etapas de densificação, secagem ou extrusão com o intuito de produzir pellets, briquetes, óleos vegetais dentre outros (FERREIRA, 2018). O processo físico não altera a composição da biomassa, mas envolve a redução do tamanho da matéria-prima e sua cristalinidade. São etapas capazes de aumentar a acessibilidade de enzimas à celulose ao promover mudanças na estrutura da matéria-prima e, também, o aumento da área superficial (CASOTTO, 2022).

A técnica de moagem permite a redução do tamanho do precursor não sendo produzido nenhum tipo de efluente e promove alterações no grau de polimerização, porosidade, área superficial e cristalinidade do material (NAKAEMA, 2021). Além disso, a granulometria do material pode ser variada e dependerá da peneira utilizada no equipamento de moagem e do objetivo da rota de produção (KUMARI e SINGH, 2018). Existem outras técnicas de tratamento físico como, por exemplo, a cavitação que envolve a formação, crescimento e colapso de bolhas de gás ou vapor na estrutura do material e que proporcionam efeitos mecânicos capazes de

promover a desintegração estrutural e aumento da porosidade da biomassa (BIMESTRE, CANETTIERI e TUNA, 2021).

Quando se trata de um pré-tratamento químico, este envolve a utilização de líquidos iônicos, solventes verdes, tratamento com ácido forte ou diluído, tratamento alcalino-básico e tratamento com solventes orgânicos aquosos (LEE, TRAN e LEE, 2022). Dentre os possíveis reagentes o uso de compostos ácidos e básicos são os mais recorrentes. Quando se utiliza de ácidos diluídos para o pré-tratamento de biomassas, os resultados obtidos apresentam pouca degradação de açúcares e formação de inibidores que são indesejáveis durante a produção de bioprodutos (GUTIERREZ et al., 2023).

O tratamento utilizando compostos básicos necessitam de condições de temperatura e pressão amenas e, quando comparado com o tratamento ácido, a formação de inibidores é considerada menor (ALENCAR et al., 2020). Os compostos químicos mais frequentemente utilizados são: hidróxido de sódio (IBRAHIM et al., 2017) e hidróxido de cálcio (DRESCH et al., 2019).

Pré-tratamentos físico-químicos, consistem em práticas que combinam métodos físicos e químicos como, por exemplo, explosão de vapor, explosão de dióxido de carbono e tratamento oxidativo (HALDER et al., 2019). O pré-tratamento biológico envolve a utilização de microrganismos que são capazes de promover reações metabólicas que, por sua vez, são favoráveis na produção de enzimas extracelulares que podem ser aplicadas, por exemplo, no processo de produção de biocombustíveis (MIRANDA et al., 2021).

A utilização de um pré-tratamento biológico pode ser interessante quando o processo implica a não necessidade de utilização de compostos químicos, porém, por depender da ação de microrganismos o período no qual o precursor precisa ser submetido ao pré-tratamento biológico é uma desvantagem do processo quando comparado com os demais tipos de pré-tratamento (BHUTTO et al., 2017). Para os pré-tratamentos biológicos e químicos são realizados procedimentos que envolvem fermentação alcoólica, fermentação anaeróbica, processos de transesterificação entre outros (GAETA et al., 2020).

3.1.2 Cascas de grãos de café

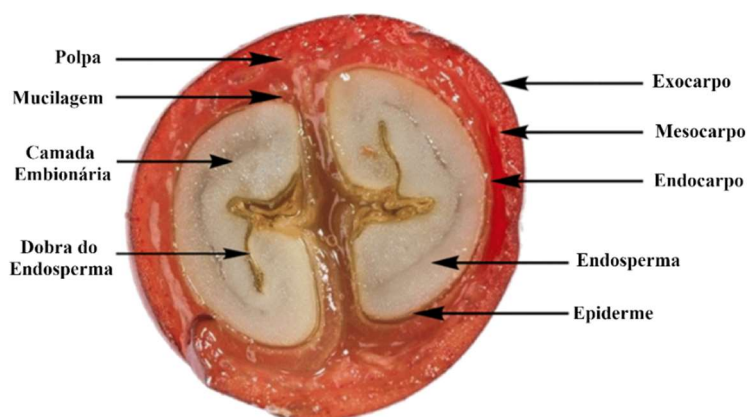
O Brasil é o segundo maior produtor de café do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos, e grande exportador dos grãos. Além disso, a produção cafeeira representa uma cultura com características sociais por estar relacionada, em sua maioria, às lavouras familiares que realizam o plantio dos grãos (BRASIL, 2023). A produção de café é, atualmente, em torno de

4,89 quilos por hectare sendo uma das principais *commodities* agrícolas mundiais em valor de mercado (MEDEIROS e RODRIGUES, 2017). A importância do plantio e produção de café em território brasileiro não é um fator recente, ao longo do século XIX e início do século XX o café foi a grande riqueza brasileira, sendo um produto influente até os dias atuais para a economia nacional (ALMEIDA e ENGEL, 2016).

Diferentes regiões no Brasil são referenciadas como produtoras de café, ao todo são 33 regiões que colaboram para que o país possa ser considerado como um dos maiores produtores e exportadores dos grãos (TAVARES et al, 2021). A produção cafeeira ocupa uma área de cerca de 240 mil hectares, estando a maioria desta área localizada em regiões de Cerrado, que representam mais de 10% da área e mais de 25% da produção de café no país (VICENTE et al., 2017). As informações referentes à cultura de café no Brasil são realizadas pela CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, e pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística a partir de informações municipais coletadas com a aplicação de questionários a produtores, cooperativas e representantes de órgãos públicos e privados.

O processo de plantio e produção do café em grãos e moído consiste na colheita do fruto do cafeeiro, seguida por um processo de secagem para posterior separação da casca e outras partes que não são de interesse principal e, então, os grãos podem ser torrados, moídos e, em seguida, enviados para comercialização (AMORIM e ASSIS, 2021). As etapas de processamento na lavoura de café podem variar de acordo com o produto que será obtido ao final da produção, geralmente, a casca e a polpa do fruto são removidas por meio do processo de beneficiamento e correspondem a cerca de 45% de massa seca do fruto (STROUB, 2021). O fruto é constituído basicamente pelo exocarpo (casca), mesocarpo (polpa/mucilagem), endocarpo (pergaminho) e endosperma (grão) (DURÁN et al., 2017). A Figura 6 ilustra a anatomia do fruto maduro.

Figura 6. Anatomia do fruto maduro do cafeeiro.



FONTE: Adaptado de BASTIAN et al., 2021.

A etapa de beneficiamento consiste num conjunto de operações que promovem o descascamento do caf e e a retirada de impurezas como pedras e torr es, como resultado   obtido o caf e em grão pronto para ser classificado por tamanho e densidade do grão e posteriormente armazenado (ELETROBRAS, 2015). Destinos para os resíduos do processamento de gr os de caf e vêm sendo apresentados na literatura, trabalhos relatam o emprego da pele prata do caf e (CALCIOLARI et al., 2022; ARRUDA et al., 2016), dos gr os de caf e (LAKSACI et al., 2017; REN et al., 2021), do pergaminho (ÁNGEL-MERAZ et al., 2020), de resíduos provenientes do consumo de caf e (WANG et al., 2022; VALDIVIA, OSORIO e RODRÍGUEZ, 2020) e das cascas de caf e (LI et al., 2016; RODRIGUEZ et al., 2018; THI, TA e VAN, 2020; PICCOLI et al., 2020; ARAGAW et al., 2022; LIZA et al., 2021; TRAN et al., 2021), para produção de diferentes bioprodutos.

Um t pico muito discutido, atualmente,   a utilização da casca dos gr os de caf e para a produção de carvão ativado que   um material de valor agregado empregado em diferentes processos de tratamento de fluídos por adsorção. A casca dos gr os de caf e   um resíduo formado basicamente por celulose, hemicelulose e lignina (HUEBRA, 2016), portanto, pode ser considerada como uma biomassa lignocelulósica residual.   costumeiramente direcionada para a queima em caldeiras para a produção de energia, porém, como a produção desse material   elevada a possibilidade de sua aplicação em outros setores se torna de interesse por parte de pesquisadores.

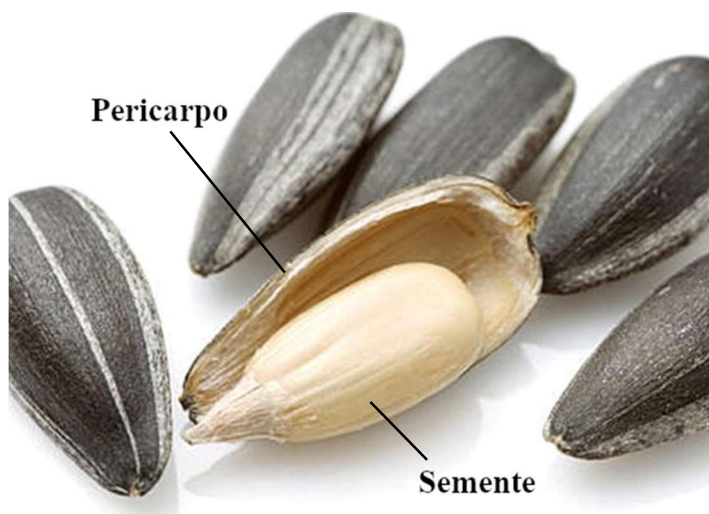
3.1.3 Cascas de grãos de girassol

O girassol é uma planta encontrada em diferentes regiões do Brasil, e por possuir propriedades físico-químicas que se adequam ao clima é cultivado em todos os continentes (FREITAS et al., 2021). Tem sido considerado, nos últimos anos, como uma boa opção de rotação e sucessão de culturas em regiões produtoras de grãos por apresentar uma melhor tolerância à seca quando comparado ao milho ou ao sorgo, baixa incidência de pragas e doenças e, também, por conferir benefícios às culturas seguintes (SILVA, 2017). A partir dos grãos do girassol é possível extrair óleo que é utilizado no setor alimentício, farmacêutico, cosmético e também no setor de produção de energia quando é matéria-prima para obtenção de biodiesel (CASTRO e LEITE, 2018).

Devido à facilidade de adaptação do girassol, é possível cultivá-lo em território brasileiro durante o ano todo. Porém, a produção média pode sofrer variações devido às condições de produção do girassol, como a fertilidade do solo, emprego de tecnologias, ocorrências de doenças e deficiência de água no solo (VIANA et al., 2018). Com isso, existem indicações para que os agricultores evitem o cultivo em épocas favoráveis ao aparecimento de enfermidades e possíveis pragas que dificultem o desenvolvimento da planta e, conseqüentemente, o rendimento da produção (SILVEIRA et al., 2005; FERNANDES et al., 2016).

No Brasil, a cultura de girassol está, em sua maioria, destinada à produção do óleo proveniente dos grãos da planta. A produção do grão de girassol em território brasileiro apresentou crescimento nos últimos anos devido ao aumento da área plantada e da produtividade que entre os anos de 2022 e 2023 apresentou uma produção de 64,1 mil toneladas configurando um aumento de 55,9% quando comparada com a safra anterior (ZEFERINO e RAMOS, 2023). O fruto do girassol, conhecido como grão, possui forma oblonga, geralmente achatada, sendo composto por pericarpo (casca), e semente (BIRIS et al., 2019). A Figura 7 ilustra a anatomia do grão de girassol.

Figura 7. Anatomia do grão de girassol.



FONTE: Adaptado de KHURANA e SINGH, 2021.

O processo de produção de óleo de girassol em larga escala consiste, basicamente, nas etapas de limpeza dos grãos, descascamento ou beneficiamento, prensagem e extração (CARRÃO-PANIZZI e MANDARINO, 2005). Durante a produção de óleo, alguns resíduos são produzidos como, por exemplo, as cascas dos grãos de girassol que são descartadas após o processo de beneficiamento do material (HAVRYSH et al., 2023). A casca possui uma baixa percentagem de óleo, sendo de 0,4 a 1,7%, e proteína bruta com cerca de 50% de fibra crua (SANTOS, 2014). Esse resíduo, geralmente, constitui a parcela de farelo destinada à alimentação de animais, queima para geração de energia ou é descartado (SMANIOTTO, 2016).

Os resíduos obtidos a partir do processamento dos grãos de girassol podem receber diferentes destinos, como a aplicação do miolo do girassol na coprodução de pectina e glicose, que são materiais que exercem influência no ramo alimentício (ZHANG et al., 2021); o uso dos resíduos sólidos, em geral, para a produção de biometano e biodiesel (EBRAHIMIAN et al., 2022; ANISIMOVA e KOLOMYTSA, 2020) e a utilização de sementes e talos na produção de biocombustíveis (BRAZIL et al., 2019; ZHURKA et al., 2020; SAHOO et al., 2023).

Apesar de não serem encontrados muitos estudos que relatam a utilização das cascas de grãos de girassol, este resíduo apresenta boa capacidade de aplicação para a produção de biocombustíveis sólidos (DE'NOBILI et al., 2021). Isso porque, apresenta composição lignocelulósica e é um resíduo de fácil obtenção uma vez que após o processamento de cerca de 1 tonelada de grãos, são geradas em torno de 150 a 200 kg de cascas (GELETUKHA et al.,

2020). Destaca-se a utilização das cascas de grãos de girassol em processos agrícolas industriais como a produção de pellets e briquetes para posterior aplicação na fertilização de solos (CUI et al., 2019; COSMIN, AUREL e CATALIN, 2019; KAZMI et al., 2023); processos de tratamento de solos (HÓRAK et al., 2023; GANDARIASBEITIA et al., 2022); produção de bio-carvão (GLUBA et al., 2021; KLIMEK-KOPYRA et al., 2021) e, também, na produção de adsorventes para o tratamento de resíduos industriais (TADAYON, BAHROLOLOOM e JAVADPOUR, 2023; KAMINSKA et al., 2021).

3.2 CARVÃO ATIVADO

O carvão ativado é um material carbonáceo adsorvente que pode ser utilizado em processos de adsorção de gases da atmosfera como CO₂ e gás natural (NEGARA et al., 2016; ABD, OTHMAN e KIM, 2021), como catalisador em reações (VIEIRA, 2015; AYINLA et al., 2019), para tratamento de resíduos industriais (MANASA, SAMBASIVAM e RAN, 2022), dentre outras aplicações. Sua utilização em técnicas de adsorção é indicada devido à elevada área superficial e a combinação entre sua estrutura porosa e propriedades químicas da superfície, bem como, da facilidade de aquisição da matéria-prima para sua produção (FRANÇOIS et al., 2016). É o material adsorvente mais empregado e eficiente no tratamento de água e resíduos industriais por promover a adsorção de compostos que causam odor, cor, gosto e toxicidade a fluidos. Apesar de ser considerado um material indicado para a remoção de contaminantes, o carvão ativado comercial apresenta utilização limitada devido ao custo de produção que é considerado alto (MORAIS et al., 2019).

O carvão ativado comercial é normalmente produzido a partir de matérias-primas de origem mineral como carvão mineral e coque de petróleo, ou sintética a partir de fibras rayon e PAN-poliacrilonitrila (ARAÚJO et al., 2017). Sua produção em termos mundiais é de cerca de 400.000 toneladas, sendo utilizados durante o processo, aproximadamente, 1 milhão de toneladas de diferentes precursores (TEIXEIRA, 2020). O mercado global de carvão ativado no ano de 2022 foi avaliado em 3,62 bilhões de dólares e a previsão é de que ocorra um crescimento anual de 2,6% de 2023 a 2030 (GRAND VIEW RESEARCH, 2024).

No Brasil, apesar de ser um país que apresenta uma diversidade de possíveis materiais precursores para a produção de carvão ativado, é comum que ocorra a importação do material adsorvente (LIMA et al., 2021; MENDES et al., 2017). Porém, existem empresas que investem na produção de carvão ativado em solo brasileiro, sendo possível destacar as empresas: Tobasa Bioindustrial localizada em Tocantins que produz carvão ativado a partir do endocarpo do coco

de babaçu; Bonechar e Brascarbo, ambas fundadas no Paraná e que produzem carvão ativado de origem animal a partir da farinha de osso de animais principalmente bovinos; Bahiacarbon Agro Industrial LTDA, na Bahia, que produz o carvão utilizando o dendê como matéria-prima. (TOBASA, 2024; BONECHAR, 2024; BRASCARBO, 2024; BAHIACARBON, 2024).

O carvão ativado é, atualmente, comercializado de diferentes formas devido às possíveis granulometrias que podem ser produzidas, sendo possível encontrá-lo na forma granular (GAC – *Granular Activated Carbon*), peletizado ou extrudado e, também, pulverizado ou em pó (PAC – *Powdered Activated Carbon*) (SANTOS et al., 2021). O GAC é normalmente utilizado em colunas de leito fixo e podem ser regenerados quando os sítios de adsorção são saturados, sendo utilizado de forma contínua em estações de tratamento de água (SANTOS et al., 2021), mas também indicados para o tratamento de gases por apresentar tamanho de partícula maior que quando comparado com os demais tipos, sendo entre 0,5-4 mm (LOPES et al., 2018).

O PAC apresenta tamanho de partícula menor que 0,2 mm, geralmente, é empregado no tratamento de líquidos a partir da mistura direta entre adsorvente e o fluido, sendo separado a partir de métodos de separação como centrifugação, filtração, dentre outros (FISCHER et al., 2019). O carvão ativado classificado como peletizado ou extrudado possui tamanho de partícula de 0,8 a 4 mm, ambos consistem na mistura entre carvão ativado em pó e um ligante termoplástico (RASHIDI e YUSUP, 2017). A diferença entre as denominações está no formato que o material possuirá ao final da produção, o carvão ativado extrudado passa por um orifício para se obter a forma cilíndrica e o peletizado o material é prensado em uma forma para obter um formato de pastilha (CÂNDIDO, 2019).

Outra possibilidade é o carvão ativado comercializado na forma de pó. Esse tipo de carvão possui tamanho de partículas em torno de 1-150 μm e é comumente empregado na corrente de processos de fluídos líquidos ou gasosos sendo que, após o tempo de contato, são separados por meio de métodos físicos de separação (FERREIRA, 2019).

A produção em escala industrial pode ser realizada a partir de diversas matérias-primas carbonáceas e, as propriedades do material produzido não são apenas determinadas pela natureza do precursor, mas também do método de preparação e das condições em que o processo é realizado (RAJAN e ANISH, 2022). Os processos cruciais para a produção de carvão ativado são a carbonização por meio do processo de pirólise e a ativação do material precursor, isso porque, são essas duas etapas que conferem ao material as principais propriedades de superfície e estrutura porosa de adsorvente (BAKAR et al., 2023). Durante a carbonização do

material, espécies voláteis e não-carbono são removidas e, com a estrutura porosa, uma massa de carbono fixo é encontrada (HAN, YANG e JONSSON, 2020).

O processo de pirólise dos materiais precursores é conduzido de acordo com o objetivo da rota de produção, para a produção de carvão é indicada a realização da pirólise lenta do material (PRUSOV et al., 2021). A pirólise lenta é um processo que apresenta benefícios para a produção de carvão, isso porque, é conduzida sob temperaturas menores que 800°C e maiores que 200°C com atmosfera inerte, geralmente de gás nitrogênio (N₂), o que promove um aumento do rendimento mássico do material produzido quando comparado com o processo de pirólise rápida (SOSA et al., 2022). A pirólise rápida é conduzida, geralmente, entre 800-1300°C e é comumente empregada durante a produção de bio-óleo sendo produzida uma pequena parcela de carvão e gás (ELKHALIFA et al., 2019).

Após a realização da carbonização, o carvão obtido não apresenta uma boa capacidade de adsorção, uma vez que possui uma estrutura de poros menos desenvolvida (MANGUEIRA, 2014). Por isso, é submetido a um processo de ativação em que a estrutura porosa do material é reforçada. Esse processo pode ser realizado por três maneiras: ativação física, ativação química e ativação físico-química, que têm como objetivo em comum o aumento da área superficial do material ao promover um aumento do diâmetro dos poros menores e o desenvolvimento de novos poros na superfície dos materiais adsorventes (RAJAN e ANISH, 2022).

3.2.1 Métodos de Ativação

A etapa de ativação do material carbonizado é a etapa subsequente ao processo de pirólise em que processos físicos, químicos ou físico-químicos podem ser empregados para promover o aumento da área superficial do material a partir do desenvolvimento de sua porosidade (FORTUNATO, 2018).

3.2.1.1 Método de Ativação Física

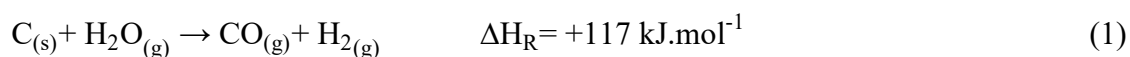
O método de ativação física consiste basicamente em duas etapas: a carbonização do material sob atmosfera inerte, seguida pela ativação empregando gás oxidante como agente ativador (ZHAO et al., 2020). Geralmente, os carvões ativados a partir do método físico apresentam uma estrutura porosa bastante fina, o que os torna apropriados para o uso na

adsorção de gases (ODA, 2017). As temperaturas usadas durante o processo de carbonização variam entre 300 a 800°C e, durante a ativação do carvão entre 700 e 1000°C, utilizando-se geralmente vapor (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), ar atmosférico ou a combinação desses gases como agentes ativadores (BRESSAN, GEREMIAS e SOUZA, 2020). Na etapa de ativação, o carbono presente na matriz do material reage com o agente ativador produzindo óxidos de carbono provocando a remoção de parte do material carbonáceo presente no interior das partículas e, promovendo, assim, o desenvolvimento da estrutura porosa (OLIVEIRA, 2016).

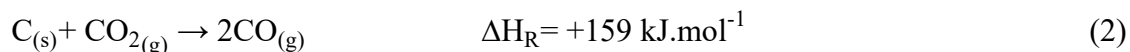
As condições experimentais e o uso de poucos equipamentos para realização da ativação física, são consideradas vantagens da aplicação desse método (SUÁREZ e CENTENO, 2020). Porém, existe uma dificuldade de controlar os fatores de ativação e a vazão de gás que entra na câmara. Se forem utilizados oxigênio (O₂) ou ar como agentes ativadores, devido à alta reatividade desses gases, a reação com o carbono presente no carvão acontece de forma muito rápida resultando em uma combustão sem controle, o que causa perda de carbono da superfície e promove a formação de uma grande quantidade de óxidos (SHAHCHERAGH, MOHAGHEGHI, SHIRPAY, 2023).

O dióxido de carbono é responsável por promover a formação de microporos estreitos, enquanto, o vapor é um agente ativador capaz de promover a ampliação de microporos, porém, em sua maioria produz carvões com um maior volume de meso e macroporos (SANTOS, 2021). Apesar de ambos agentes ativadores desenvolverem a microporosidade dos adsorventes no estágio inicial da ativação, o CO₂ continua a desenvolver a microporosidade durante os estágios seguintes do processo, o que não ocorre quando se trata do vapor que apresenta reatividade maior a altas temperaturas favorecendo, assim, a formação de meso e macroporos (SANTOS, 2021; FRAGA, 2013).

A compreensão das reações que ocorrem quando o CO₂ ou o vapor de água entram em contato com o carbono presente na superfície do carvão, elucidam a forma como cada agente ativador promove o desenvolvimento de poros na superfície do material. A molécula de água, quando comparada com a de CO₂ é menor, o que facilita a ativação usando o vapor de água e, além disso, a reação entre o vapor e o carbono é um processo endotérmico que é considerado fácil de ser controlado (SAJJADI, CHEN, EGEBO, 2017). A Equação 1 representa a reação entre o vapor e a matriz de carbono do carvão (CÂNDIDO, 2019).



Quando se trata da utilização de CO₂, a reação que ocorre entre o gás e o carbono presente na matriz do carvão também se trata de uma reação endotérmica, como é possível observar a partir da Equação 2 (CÂNDIDO, 2019).



Como discutido anteriormente, a ativação a partir do vapor promove a formação de carvões ativados com um maior volume de meso e macroporos, isso está relacionado com o fato de que a reação, quando comparada com o CO₂, é menos endotérmica e, portanto, mais favorecida energeticamente o que faz com que seja menos seletiva e promova a formação de uma superfície porosa menos uniforme, enquanto que, a reação com CO₂ por ser mais endotérmica, permite um maior controle e resulta em carvões ativados com maior uniformidade de poros (CÂNDIDO, 2019; SAJJADI, CHEN, EGEBOR, 2017).

No trabalho de Aznar, 2011, o processo de ativação de carvão produzido a partir de grãos de café foi realizado utilizando vapor como agente ativador. A ativação foi conduzida em três temperaturas diferentes, 600, 700 e 800°C e, assim que se deu início ao processo foi injetada no forno, em um fluxo constante de 20 mL/h, água por 2 horas. O autor concluiu que as amostras que foram submetidas a 800°C apresentaram um menor rendimento e menor área superficial (533,14 m²/g), devido a maior reatividade da água em altas temperaturas. Além disso, apesar de terem apresentado bom volume de microporos, também, foram verificados altos teores de cinzas que estão relacionados com a quantidade de matéria inorgânica agregada à superfície do carvão e que, em altas quantidades, prejudicam o processo de adsorção por modificarem as interações entre o adsorvente e o adsorvato (ENCARNAÇÃO, RAMOS, NETO, 2019).

Na pesquisa desenvolvida por Tsai e Jiang, 2023, os autores estudaram o processo de ativação física via CO₂ de um carvão produzido a partir de cascas de noz morcego, uma castanha asiática. O processo de ativação foi realizado na faixa de temperatura de 600 a 900°C com variação de 30°C, e com um fluxo de CO₂ de 50 cm³/min por 150 minutos. Os autores concluíram que a melhor temperatura de ativação foi de 800°C pois apresentou resultados com maior área superficial (972,56 m²/g) e volume de microporos. O resultado obtido pelos autores exemplifica o fato de o dióxido de carbono ser um agente ativador que apresenta uma reatividade menor a altas temperaturas do que quando comparado com o vapor e que, nessas condições, permite maior controle do processo de ativação promovendo a obtenção de carvões

ativados com características porosas consideradas de interesse (PALLARÉS, CENCERRADO, ARAUZO, 2018).

Devido ao fato de que o processo de ativação física não requer a utilização de reagentes químicos, esse método é considerado o mais utilizado para a produção de carvão ativado em escala industrial (MENA, 2019). Essa característica do processo é interessante uma vez que promove tanto a redução do custo de produção como, também, a diminuição da poluição secundária associada ao uso de reagentes químicos e, por isso, também é considerado como um método mais verde (PALLARÉS, CENCERRADO, ARAUZO, 2018). A diminuição da poluição é uma vantagem do processo de ativação física pois, não é necessário realizar processos de lavagem do material após a ativação, o que é uma etapa presente no método de ativação química (RIOMLI et al., 2019).

3.2.1.2 Método de Ativação Química

O método de ativação química consiste no emprego de reagentes químicos como agentes ativadores. O material precursor moído é impregnado com o agente químico sólido ou em solução líquida e, em seguida, sob atmosfera inerte é ativado em uma faixa de temperatura de 400 a 1000°C (MENA, 2019; ZHOU, LUO e ZHAO, 2018). Após a ativação, o carvão ativado passa por um processo de lavagem com uma solução aquosa, geralmente, quando é utilizada alguma base como agente ativador o processo de lavagem dos carvões é realizado com o emprego de uma solução de ácido clorídrico (HCl) e água destilada, para remoção do agente ativador, desobstrução dos poros e ajuste do pH para próximo de 7 (LÜTKE, 2016).

Diferentes agentes ativadores podem ser utilizados durante o processo químico de ativação como, por exemplo, ácido nítrico (HNO_3), ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido fosfórico (H_3PO_4), hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH), carbonato de potássio (K_2CO_3), cloreto de zinco (ZnCl_2), permanganato de potássio (KMnO_4), dentre outros. Além disso, a temperatura de ativação empregada varia de acordo com o agente químico utilizado sendo, comumente, empregadas temperaturas na faixa de 400 e 500°C para ativações com H_3PO_4 e ZnCl_2 e temperaturas acima de 700°C para KOH, por exemplo (CÂNDIDO, 2019). Na Tabela 2 é possível identificar o uso de diferentes agentes ativadores, bem como, o emprego de diferentes temperaturas durante o método químico de ativação em trabalhos presentes na literatura.

Tabela 2. Exemplos de agentes ativadores químicos, temperaturas de ativação empregadas durante o método de ativação químico e áreas superficiais obtidas.

Material Precursor	Agente Ativador	Temperatura de Ativação (°C)	Área Superficial (m ² .g ⁻¹)	Referência
Grãos de Café	NaOH	650	2025,9	(Norouzi et al., 2018)
Casca de Noz	H ₃ PO ₄	450	2000	(Yang et al., 2020)
Resíduos de Madeira	ZnCl ₂	500	1430	(Bosch et al., 2022)
Casca de Arroz	KOH	750	1422	(Wang et al., 2022)
Casca de Banana	H ₃ PO ₄	583	1290	(Danish et al., 2022)
Fibra de Linho	K ₂ CO ₃	800	1007	(Illingworth et al., 2022)
Esterco de Vaca	KOH	700	950	(Tsai et al., 2019)
Casca de Baobá	H ₃ PO ₄	500	904,49	(Nedjai et al., 2021)
Resíduos de Eucalipto	HNO ₃	700	840	(Kunusa et al., 2021)
Bagaço de Cana-de-Açúcar	KOH	700	753,3	(Jawad et al., 2021)
Casca de Grãos de Café	ZnCl ₂	500	613,14	(Laverde et al., 2021)
Casca de Arroz	KMnO ₄	400	499,31	(Zhang et al., 2017)
Borra de Café	H ₂ SO ₄	400	432	(Nadew et al., 2023)

FONTE: Do autor, 2024.

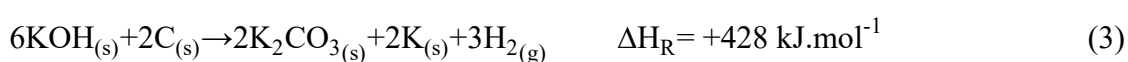
A função do agente ativador é promover o desenvolvimento da estrutura porosa do precursor e, no caso dos agentes químicos, ocorrem processos de degradação do material celulósico a partir da ação desidratante e degradante provocada pelos reagentes químicos (MENA, 2019). Dessa forma, e a partir das reações envolvidas durante o processo de ativação, ocorre o desenvolvimento da estrutura porosa e a formação e/ou reorganização de grupos funcionais na superfície do material (ANDINI et al., 2023). Além disso, a desidratação causada pelo agente ativador é responsável por evitar a formação de líquidos, também denominados de alcatrão, durante a ativação do material precursor (OLIVEIRA, 2016).

Os agentes ativadores mais empregados são o ZnCl₂, H₃PO₄, NaOH e KOH (TOGIBASA et al., 2021). O uso de cloreto de zinco e ácido fosfórico leva à produção de carvões ativados com uma maior proporção de mesoporos e, por isso, são indicados para utilização em processos que envolvam moléculas maiores e para atuarem como suporte em processos catalíticos (CÂNDIDO, 2019). O interesse pelo uso de cloreto de zinco como agente

ativador tem se intensificado, isso porque, é um composto que atua como um ácido de Lewis e pode ser utilizado como agente desidratante para remoção seletiva de átomos de hidrogênio e oxigênio do material precursor contribuindo, assim, para a formação de uma estrutura porosa com alta área superficial e para a redução da formação de alcatrão (ZHAO et al., 2022).

O uso de hidróxidos, como o hidróxido de potássio, se diferencia dos agentes anteriormente citados pelo fato de que a reação entre o KOH e o material precursor, para desenvolvimento da estrutura porosa, ocorrerão de forma significativa a partir de 700°C (MONGE, MARTÍNEZ, RÓDENAS et al., 2022). Os adsorventes produzidos nessas condições apresentam áreas superficiais maiores quando comparados com os carvões ativados com H₃PO₄, sendo encontradas áreas superficiais com cerca de 3000 m².g⁻¹ quando KOH é utilizado como agente ativador (ELMOUWAHIDI et al., 2017). Porém, quando comparados com os carvões ativados com ZnCl₂, os adsorventes produzidos com hidróxidos, apresentam menor rendimento devido à reação química com alta reatividade que ocorre durante o aumento da temperatura no processo de ativação (HARIMISA et al., 2022).

Segundo o trabalho de Nandi et al., 2023, a principal função do KOH durante a etapa de ativação é promover a oxidação do material precursor. Nesse processo, são produzidos gases que colaboram para a criação de pequenos mesoporos e microporos na estrutura do carvão. Quando o KOH reage com o carbono proveniente do material precursor, geralmente, são produzidos K₂CO₃, potássio metálico, H₂, como é possível identificar a partir da Equação 3 (SINGH et al., 2017; SERAFIN et al., 2019; NANDI et al., 2023; FISCHER et al., 2024).



Quando o KOH reage com o carbono, em torno de 400°C ocorre o início da formação de K₂CO₃ e em aproximadamente 600°C todo o KOH foi transformado em K₂CO₃. A partir de 700°C, o K₂CO₃ produzido se decompõe e produz K₂O, CO e CO₂. Porém, a formação de monóxido de carbono e dióxido de carbono é lenta a temperaturas mais baixas e é observada de maneira significativa quando a temperatura se aproxima de 800°C (HARIMISA et al., 2022). Além disso, o potássio metálico produzido, presente de forma intercalada na estrutura do carvão, reagirá com dióxido de carbono promovendo, também, a formação de monóxido de carbono entre 700 e 800°C (CHEN et al., 2020), como representado nas Equações 4 a 7 (NANDI et al., 2023; HARIMISA et al., 2022; FISCHER et al., 2024).



Devido a ativação com KOH produzir carvões com uma maior distribuição de microporos, é indicado o emprego desses materiais em processos de adsorção que envolvam partículas menores (CASCO et al., 2015). Apesar de serem obtidos carvões ativados com maiores áreas superficiais, o uso de hidróxidos implica na utilização de altas razões de impregnação para a obtenção de volumes elevados de poros (CÂNDIDO, 2019).

A etapa de impregnação pode ser realizada de formas diferentes durante o método de ativação química. Como citado anteriormente, trabalhos relatam a realização da impregnação do material precursor e, em seguida, a mistura é submetida à pirólise sob atmosfera inerte. Porém, essa etapa do processo pode ser realizada após a carbonização do material precursor sob atmosfera inerte (BRITO, 2020). Nesse caso, o carvão previamente produzido é impregnado com o agente ativador e, então, passa pelo processo de ativação. A razão de impregnação também é identificada como um fator importante e influente nas características do carvão ativado proveniente de tratamento químico (YAHYA et al., 2015). Geralmente, o incremento na razão de impregnação ocasiona a geração de carvão ativado com maior porosidade e área superficial, porém diminui os rendimentos mássicos do adsorvente (SUHDI, RODIAWAN, WANG, 2022; ZAKARIA et al., 2021).

3.2.1.3 Método de Ativação Físico-Química

O método de ativação físico-química, consiste em um processo de ativação que combina os métodos de ativação física e química. O processo, geralmente, se inicia com a ativação química do carvão, promovendo a formação de um material predominantemente microporoso que, em seguida, é tratado com um oxidante físico que proporciona um aumento no volume de poros (JJAGWE et al., 2020). Durante o emprego desse método de ativação, geralmente, é

necessária uma menor quantidade de reagentes químicos quando comparado com o método de ativação química, porém, quando a comparação se estende aos resultados referentes à área superficial são observados valores menores para carvões ativados via método físico-químico (ZHONG et al., 2019).

Na pesquisa desenvolvida por Barczak et al., 2023, os autores estudaram os efeitos da ativação via método físico-químico de um carvão produzido a partir de aço, uma planta medicinal também conhecida como cálamus (*Acorus calamus L.*). A proposta do trabalho foi de realizar o processo de ativação física inicialmente utilizando CO₂ como agente ativador e, em seguida, submeter o material a um processo de ativação química utilizando KOH como agente ativador. A temperatura utilizada para a ativação física foi de 800°C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e um fluxo de gás de 3.3 L.h⁻¹. Para a ativação com KOH foram estabelecidas as condições de uma razão de impregnação de 1:1 a 4:1 (KOH:CA) e uma taxa de aquecimento de 4 °C/min até 900°C.

Os autores concluíram que a melhor razão de impregnação encontrada durante a pesquisa foi de 3:1 (KOH:CA), a qual apresentou área superficial de 1652 m².g⁻¹. Além disso, a fase inicial em que é realizada a ativação física do carvão, promove o desenvolvimento da área superficial gerando macroporos e mesoporos e, também, colabora para a eliminação de frações de resíduos voláteis e de cinzas provenientes do processo de pirólise do precursor. Já o processo subsequente de ativação química do material, promove o desenvolvimento da estrutura porosa ao realizar a expansão de poros pré-existentes.

Os resultados obtidos pelos autores do trabalho vão de acordo com propostas apresentadas em outros estudos presentes na literatura, que afirmam que a combinação entre os métodos de ativação física e química proporcionam a formação de uma estrutura porosa formada predominantemente por macroporos e mesoporos o que acarreta na produção de adsorventes com valores menores de área superficial quando comparados com outros materiais adsorventes preparados a partir de outros métodos de ativação que apresentam um maior volume médio de microporos (WEI et al., 2022; ZHANG et al., 2019; KÖSE, PISKIN, AYDINOL, 2018).

3.2.2 Estrutura porosa

A estrutura porosa de carvões ativados é composta por macroporos, mesoporos e microporos, que são regiões encontradas na superfície do adsorvente em que o adsorvato ficará retido durante o processo de adsorção (COELHO e ROZÁRIO, 2018; HEIDARINEJAD et al., 2020). A União Internacional de Química Aplicada (IUPAC – *International Union of Pure and Applied Chemistry*), classificou as três regiões de materiais porosos de acordo com um tamanho específico de poro, conforme é possível observar na Tabela 3.

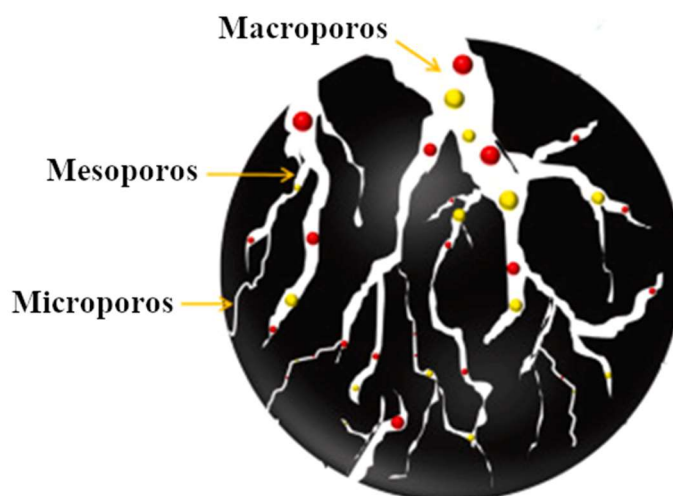
Tabela 3. Classificação feita pela IUPAC de acordo com o tamanho dos poros na estrutura de materiais porosos.

Tipo de Poro	Tamanho do Poro
Microporo	$< 2 \text{ nm}$
Mesoporo	$\geq 2 \leq 50 \text{ nm}$
Macroporo	$> 50 \text{ nm}$

FONTE: IUPAC Goldbook, 2019; WU et al., 2020.

A classificação feita pela IUPAC é baseada a partir da análise das isotermas de adsorção e dessorção de N_2 a 77K, até 1 atm de pressão sendo que a adsorção em multicamada, a condensação capilar (histerese) e o preenchimento são os processos que ocorrem nos macroporos, mesoporos e microporos, respectivamente, e que colaboram para a compreensão de cada região da estrutura porosa (CÂNDIDO, 2019; THOMMES et al., 2015). A Figura 8 ilustra a estrutura porosa presente na superfície do carvão ativado.

Figura 8. Regiões presentes na estrutura porosa do carvão ativado.



FONTE: Adaptado de SULTANA et al., 2022.

Devido ao fato de que durante o processo de adsorção, as moléculas do adsorvato ficarão retidas na estrutura porosa do adsorvente, os macroporos, mesoporos e microporos exercem uma importante função. Uma maior capacidade de adsorção é observada na faixa de tamanho de poro de microporos a mesoporos (SHABIR et al., 2020). Isso é compreendido devido ao fato de que os valores de área superficial observados para os materiais porosos estão relacionados com as regiões em que estão presentes os microporos, mesoporos e macroporos e, conseqüentemente, influenciam a capacidade adsortiva dos materiais uma vez que as partículas de adsorvato ficarão retidas nas paredes dos poros. Um maior volume de microporos na superfície de materiais porosos implica em um maior valor de área superficial, quando comparase com uma superfície porosa que apresenta uma região com um maior volume de mesoporos e macroporos (ÇEÇEN, 2014; CÂNDIDO, 2019).

A estrutura porosa pode ser estudada e elucidada a partir da análise de microscopia eletrônica de varredura, na qual é possível obter imagens com altas resoluções que revelam a morfologia e a quantidade dos diferentes poros existentes (ZHANG et al., 2017; AMIN, CHUNG e SHAH, 2023). Essa técnica é muito versátil e usada frequentemente para análise microestrutural de materiais sólidos, pode ser necessária a realização de um processo chamado metalização nas amostras caso o sólido a ser investigado não seja condutivo, sendo então feita uma cobertura ultrafina de material eletricamente condutivo na amostra, geralmente, para

amostras de carvão ativado realiza-se a metalização das amostras com uma fina camada de ouro (COSTA, FARIA e SOUSA, 2021).

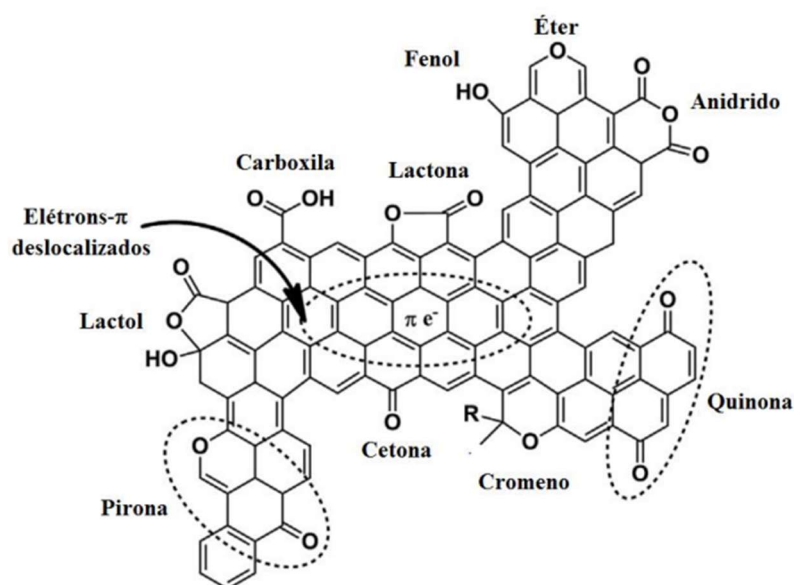
3.2.3 Características químicas da superfície de carvões ativados

O carvão ativado é um material considerado amorfo, constituído basicamente por carbono, além de oxigênio e hidrogênio, podendo conter na superfície outros heteroátomos de acordo com o material precursor utilizado (MORAIS, 2017). Em sua superfície estão presentes alguns grupos funcionais oxigenados como, por exemplo, álcoois, fenóis e ácidos carboxílicos (VALLE et al., 2019). A quantidade de grupos funcionais e os tipos que serão encontrados vão variar de acordo com o método de ativação empregado (NOWICKI, KAZMIERCZAK e PIETRZAK, 2015).

Devido a presença dos grupos funcionais e de elétrons deslocalizados da estrutura na superfície do carvão ativado, o material pode apresentar características ácidas, básicas ou neutras, que podem ser alteradas por meio de tratamento com agentes oxidantes e variação da temperatura de processo (TEIXEIRA, 2020). Grupos carboxilas, lactonas e fenóis determinam características ácidas, enquanto piranos, cromenos, e hidroxilas características básicas e, grupos funcionais como quinonas e carbonilas conferem o caráter neutro de acordo com a acidez e basicidade em soluções aquosas (LIU e XIAO, 2018). As características químicas da superfície são importantes pois, carvões ativados que apresentam superfícies com grupos ácidos adsorvem preferivelmente materiais básicos e, os que apresentam grupos básicos apresentam uma tendência em adsorver materiais ácidos (CÂNDIDO, 2019).

A Figura 9, exemplifica os grupos funcionais que podem ser encontrados na superfície de carvões ativados.

Figura 9. Exemplo dos possíveis grupos funcionais encontrados na superfície de carvões ativados.



FONTE: CÂNDIDO, 2019.

A análise quantitativa dos grupos funcionais presentes na superfície do carvão ativado não é considerada simples, devido a possível presença de diversos grupos. Uma técnica que pode ser utilizada para caracterização de grupos funcionais presentes na superfície de materiais carbonáceos é a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) (TSAI e JIANG, 2023). A técnica consiste na absorção da radiação a partir de vibrações de átomos e moléculas em uma faixa ou estiramento específico (COSTA, FARIA e SOUSA, 2021).

Outros métodos podem ser empregados para a detectar a presença de grupos funcionais na superfície de carvões ativados como: método de Boehm, que consiste na titulação do carvão ativado com diferentes reagentes (NOBRE et al., 2015); e, também, a dessorção a temperatura programada (TPD), que consiste na adsorção de uma molécula sobre a superfície do carvão que é aquecido a uma taxa de aquecimento constante sob fluxo de um gás inerte e, então, os gases dessorvidos são acompanhados para realização da análise (MAGALHÃES, 2018; PADILHA, 2007).

Estudos vêm sendo realizados e, existem discussões acerca da possibilidade de modificação dos grupos funcionais a partir de tratamentos térmicos e químicos (BOLIGON, 2015). O tratamento térmico realizado a altas temperaturas (acima de 700°C) sob atmosfera inerte é utilizado no intuito de remover seletivamente algumas funcionalidades da superfície ácida (JAIME, 2016), uma vez que, nessa faixa de temperatura, grupamentos éteres, carbonílicos e fenólicos, por exemplo, sofrem decomposição e promovem o surgimento de

sítios ativos que formarão novos grupamentos a partir da interação com a atmosfera (QIU et al., 2023).

Tratamentos químicos podem ser utilizados para realizar a modificação da superfície química de carvões ativados, geralmente, com o objetivo de controlar a adsorção de moléculas (BERGER, 2015). Um exemplo é a realização de uma série de tratamentos utilizando amônia e altas temperaturas para produzir uma superfície básica (PEGO, 2016). Outro método é a sulfuração da superfície, que incorpora uma grande quantidade de enxofre na superfície do carvão ativado na forma de hidrosulfetos, dissulfeto de carbono, dentre outros grupos. Porém, a sulfuração promove a redução da área superficial, o que não é de interesse quando se trata da produção de carvões ativados (CÂNDIDO, 2019).

3.2.4 Área superficial e Volume de poros

A discussão acerca da eficiência do carvão ativado está, principalmente, relacionada com a área superficial do material e o volume de poros da superfície que são algumas das características que influenciam o processo de adsorção (FRANCO et al., 2021). Quanto maior a área superficial apresentada pelo material e a presença de sítios ativos na superfície do material, maior será a capacidade de adsorção do carvão ativado (ARNELLI, SANTOSO e ASTUTI, 2021). Os carvões ativados, geralmente, apresentam área superficial em torno de 800 a 1500 m².g⁻¹, e dependendo das condições de produção podem ser encontrados materiais com aproximadamente 4000 m².g⁻¹ de área superficial (PEGO, 2016).

A temperatura final de carbonização é um fator importante na determinação dessas características pois, a área superficial e o volume de poros, geralmente, são formados pelo consumo de carbono durante o processo de produção de carvão ativado (PARK et al., 2022). Além disso, a concentração do agente ativador também exerce influência nos resultados referentes à área superficial e ao volume de poros do material. Segundo o trabalho de Kumar e Jena, 2015, que estudaram as influências na preparação de carvão ativado a partir de resíduos agrícolas lignocelulósicos, o efeito da razão de impregnação do ativador é maior quando comparado com o aumento da temperatura de carbonização quando se trata da análise dessas características do material. Resultados semelhantes foram observados no trabalho de Mistar et al., 2018, em que o efeito do ativador e da temperatura de pirólise foram estudados. Os autores concluíram que a variação na temperatura de pirólise e da razão de impregnação do material exerceram grande influência nas características resultantes da superfície adsorvente.

A determinação da área superficial pode ser realizada a partir da quantificação de gás adsorvido pelo material adsorvente em uma dada pressão, sendo utilizado, geralmente, o gás nitrogênio (N_2) (MAGALHÃES, 2018). Um método indicado para a determinação do valor de área superficial de carvão ativado é a análise BET, desenvolvida por Brunauer, Emmett e Teller (GONZÁLEZ-GARCÍA, 2018). Essa análise descreve a adsorção de moléculas sobre uma superfície sólida, sendo baseada nas isotermas de adsorção-dessorção em um sistema gás-sólido que indicam a forma como os processos ocorrem (DELFINO, 2018).

Além dos dados referentes à área superficial, a partir das isotermas de adsorção-dessorção de BET, é possível obter informações a respeito do volume de poros de materiais adsorventes utilizando-se de isotermas de adsorção e dessorção de gases (NOBRE et al., 2015). A técnica de adsorção de gás para análise do volume de poros consiste no processo de condensação de gás, geralmente, nitrogênio nos poros do material adsorvente e, a partir disso, o volume de poros é determinado de acordo com a quantidade de gás convertido para volume líquido condensado (PINHEIRO, 2015). Os resultados obtidos são avaliados de acordo com isotermas que envolvem a quantidade de gás adsorvido no adsorvente, medida como função da pressão parcial de equilíbrio à uma temperatura constante. Essas medições ocorrem a temperaturas nas quais o gás, à pressão atmosférica, está no estado líquido (PINHEIRO, 2015).

3.3 PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS

Os carvões ativados são materiais empregados em processos de tratamentos de fluidos provenientes de resíduos industriais ou de uso doméstico a partir do processo de adsorção. Dentre as aplicações é possível citar o uso no tratamento de água (JIANG et al., 2019; ALVES et al., 2021), da poluição atmosférica (RUHIAT e GUNTARA, 2020; ZHAO et al., 2022), na indústria alimentícia (CHAEMSANIT, MATAN e MATAN, 2017; VALLADARES et al., 2019) e em processos de remoção de metais pesados (WANG et al., 2023; LI et al., 2022).

Apesar de existirem diferentes métodos para o tratamento de resíduos, o uso de carvões ativados produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos se tornou um método bastante aplicado devido ao baixo custo e sua simples aplicação (KASSIMI et al., 2020). São encontrados estudos que reportam a aplicação de carvão ativado produzido a partir de biomassas residuais para processos de adsorção de compostos provenientes de pesticidas (ZIENLINSKI et al., 2022; HARABI et al., 2024), compostos fenólicos e corantes (YUAN, PASSEPORT, HOFMANN, 2022; NIZAM et al., 2021; HUSIEN et al., 2022).

Os resíduos lignocelulósicos utilizados para a produção de carvão ativado podem ser classificados a partir de sua origem em duas categorias: são agrícolas os provenientes de processamentos da agricultura; e industriais aqueles obtidos a partir de etapas do beneficiamento da matéria-prima na indústria (BARHOUM et al., 2020). A classificação de resíduos agrícolas ainda pode ser compreendida de duas formas diferentes, os resíduos do campo que são aqueles descartados no próprio campo após corte ou seleção como cascas, talos e caules; e resíduos de processamento que são descartados após corte para ajuste de formato, por exemplo (GUPTA et al., 2022).

A biomassa residual apresenta elevada disponibilidade, com isso, existe a necessidade de promover métodos que proporcionem um destino sustentável para esse material que, geralmente, é destinado à queima para produção de energia. Devido à composição, estrutura e propriedades desses materiais é possível sua aplicação para produção de bioprodutos, como durante a produção de carvão ativado (ARAÚJO et al., 2018). O processo de conversão da biomassa lignocelulósica em carvão ativado é uma prática considerada de baixo custo e, também, é uma oportunidade para suprir as demandas industriais de forma sustentável (LEE et al., 2020).

A utilização de resíduos lignocelulósicos para produção de carvão ativado é uma prática bastante referenciada na literatura e, geralmente, são utilizados resíduos agrícolas como precursores. Trabalhos apontam a utilização de troncos de banana (DANISH et al., 2022), casca de amendoim (WANG, NAM e NAM, 2020), lascas de eucalipto (MOPOUNG e DEJANG, 2021), resíduos de chá (ZHOU, LUO e ZHAO, 2018), resíduos de castanha-do-brasil (SILVA et al., 2023), endocarpo do coco de dendê (MENESES et al., 2021), bagaço de cana-de-açúcar (SANTOS, 2021), sabugo de milho (KOUASSI et al., 2023), palha de arroz (ARNELLI, SANTOSO e ASTUTI, 2021) dentre outras biomassas residuais.

O material precursor para a produção de carvão ativado pode ser qualquer material carbonáceo, porém, a escolha da matéria-prima deve seguir alguns parâmetros como: baixo teor de componentes inorgânicos, baixo custo e disponibilidade, não sofrer degradação na etapa de armazenamento, facilidade na etapa de ativação e produção de bons adsorventes (FORTUNATO, 2018). A produção a partir da biomassa lignocelulósica apresenta algumas vantagens como: a disponibilidade de diversos precursores; são matérias-primas abundantes e renováveis; o processo de síntese é relativamente simples devido à alta reatividade da biomassa; e sua utilização contribui para a diminuição do impacto no meio ambiente por ser uma matéria-prima biodegradável (GONZÁLEZ-GARCÍA, 2018).

Quando analisada a composição de cada resíduo lignocelulósico será observa-se diferenças nos percentuais de celulose, hemicelulose e lignina de cada precursor, até mesmo quando comparados os que pertencem a uma mesma classe (DESHPADE et al., 2022). As diferenças estão relacionadas, de forma geral, às questões do cultivo dessas biomassas como: região, clima, diferentes tipos de solo e o uso de diferentes fertilizantes (ZOGHLAMI e PAËS, 2019). Com isso, torna-se necessária a realização de análises que permitam obter informações a respeito da composição dessas matérias-primas.

A partir de técnicas estabelecidas previamente, é possível determinar os teores de lignina, celulose e hemicelulose de cada material precursor e, com isso, obter informações a respeito da composição do material lignocelulósico. Segundo Jjagwe et al., 2021, os teores de lignina, celulose e hemicelulose em base seca, geralmente, correspondem a 4%-50%, 8%-53% e 8%-40% do material, respectivamente. Outras análises, denominadas análises imediatas e com metodologias definidas, são comumente realizadas como: a determinação dos teores de umidade, cinzas, voláteis, carbono fixo e extrativos, que são parâmetros que permitem avaliar a qualidade do carvão que será produzido (BASSO, 2017).

Para a utilização dos resíduos lignocelulósicos na produção de carvão ativado, é necessário submeter o material a processos de pré-tratamento. O pré-tratamento pode ser realizado a partir de métodos físicos, químicos e/ou biológicos com o intuito de preparar a biomassa lignocelulósica para posterior uso durante os processos de conversão em bioprodutos (TANG et al., 2021; ZHANG, PEI, WANG, 2015). Um dos procedimentos que é comumente realizado durante essa etapa é a moagem da biomassa, em que a granulometria do material é definida, sendo realizada em equipamentos como moinho de facas ou moinho de bolas após o material precursor ser submetido a uma etapa de secagem para remoção de água presente na composição (EGUCHI et al., 2020; MENDES et al., 2015).

A moagem permite o aumento da área superficial a partir da redução do tamanho das partículas, o que promove uma diminuição do grau de polimerização da celulose e da distorção de ligações químicas (SHEN et al., 2020). Além disso, quando comparada com outros processos de pré-tratamento apresenta vantagens, como a fácil operação do equipamento, posterior realização de uma carbonização uniforme e a não necessidade de uso de reagentes químicos ou de tratamentos subsequentes (UKANWA et al., 2019). Segundo Kumar et al., 2020, a realização do processo de moagem da biomassa é uma técnica reproduzível, que apresenta baixo custo, proporciona mudanças nas propriedades físico-químicas do material e promove, também, a remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos, sendo a aplicação do processo de moagem favorável para a produção de adsorventes.

Diferentes métodos de pré-tratamento podem ser realizados, inclusive a combinação de diferentes métodos. No trabalho de Lee et al., 2021, os autores estudaram a influência da realização de um pré-tratamento químico após a moagem da biomassa para a produção de carvão ativado proveniente da casca de coco. O material lignocelulósico foi preparado por via ácida (H_3PO_4), via básica (NaOH) e com água. As condições de pré-tratamento foram estabelecidas com o intuito de promover mudanças e controlar a textura porosa da biomassa e preparar o precursor para o processo térmico durante a ativação. Os autores concluíram que o pré-tratamento químico colabora para evitar influências de compostos inorgânicos, em grande parte provenientes do uso de fertilizantes, que durante o processo térmico sofrem fusão a temperaturas baixas e podem obstruir os poros que serão formados.

Segundo Narita, 2022, a realização do processo de pré-tratamento é uma etapa que exerce grande influência no processo de pirólise. O autor estudou o uso de resíduos têxteis de algodão, que quando submetidos a processos de pirólise em altas temperaturas podem se fundir ou sofrer degradação. Durante o trabalho, a etapa de pré-tratamento desenvolvida a partir da impregnação com uma solução de H_3PO_4 , que por promover a formação de éster fosfato e grupos hidroxilas, foi responsável por retardar a chama em fibras celulósicas possibilitando uma maior estabilidade durante o processo de produção do carvão ativado. Porém, a utilização de reagentes químicos implica também na geração de resíduos químicos que sem o devido descarte podem causar problemas ambientais.

3.3.1 Processos de carbonização e ativação

Após a realização dos processos de pré-tratamento, o resíduo lignocelulósico com granulometria definida é submetido então a um processo de carbonização e ativação. A carbonização é um processo térmico de decomposição de materiais carbonáceos em que, geralmente, são utilizadas temperaturas de 300 a 900°C e atmosfera inerte (CONTESCU et al., 2018). A atmosfera inerte pode ser estabelecida a partir do uso de um gás inerte como, por exemplo, nitrogênio e argônio, e sua função é eliminar espécies diferentes de carbono formadas durante o aumento da temperatura e produzir uma massa de carbono fixo (YOUSFI et al., 2020).

Quando a biomassa é submetida a esse processo ocorre um aumento da estabilidade química e da característica hidrofóbica do material, além do desenvolvimento inicial da porosidade (JJAGWE et al., 2021). Na carbonização ocorre a remoção de oxigênio o que previne a oxidação da biomassa e, também, limita a formação de gases e água durante os processos térmicos (GONZÁLEZ-GARCÍA, 2018). A carbonização das biomassas

lignocelulósicas é um processo de pirólise e requer uma taxa de aquecimento lenta, em torno de menos de 10 °C/min, de 300 a 800°C com duração de 1 a 3 horas (MALKI et al., 2023).

A temperatura de pirólise exerce grande influência durante a produção de carvão ativado, sendo um parâmetro que pode afetar a composição elementar, a distribuição de tamanhos dos poros, volume de poros e a química da superfície dos materiais adsorventes (MISHRA, SINGH, ACHARYA, 2024). De acordo com Jjagwe et al., 2021, o processo de pirólise consiste em quatro estágios: a desidratação da biomassa a temperaturas abaixo de 200°C, início da decomposição do material com liberação de ácidos orgânicos entre 170 e 270°C, continuação da decomposição da biomassa e formação do carvão entre 270 e 350°C e, por fim, a remoção de resquícios de voláteis a temperaturas acima de 350°C.

A etapa de ativação do material, consiste na aplicação dos métodos físicos, químicos ou físico-químicos para o desenvolvimento da estrutura porosa dos carvões. O processo de ativação é influenciado pela temperatura e o tempo em que é realizado, a temperaturas baixas o desenvolvimento da área superficial é pequeno devido a redução da volatilização de componentes orgânicos (CORREA et al., 2017). Quando é realizado a temperaturas mais altas a reação entre o material precursor e o agente ativador é mais favorável, o que leva a formação de um maior volume de microporos que influenciam de forma positiva na área superficial do material (ROSE et al., 2023). A realização de um processo de ativação em um curto espaço de tempo não permite a formação de microporos e mesoporos, enquanto que durante longos períodos pode ocorrer a destruição dos poros formados (VAKILI et al., 2023).

O processo de ativação química pode ser realizado de duas formas diferentes. Em uma etapa quando a biomassa é impregnada com o agente ativador e, então, carbonizada; ou em duas etapas quando o material precursor passa por uma carbonização prévia e, em seguida, é impregnado com o agente ativador e submetido ao processo térmico de ativação (OGINNI et al., 2019). A realização de uma carbonização prévia é comum quando ocorre o emprego de bases fortes como NaOH ou KOH, isso porque, essas bases podem dissolver a matéria orgânica do material precursor impedindo que a ativação do material seja satisfatória (LEWOYEHU, 2021). Geralmente, a realização da carbonização prévia para a ativação em duas etapas ocorre em temperaturas entre 300 e 700°C (FU et al., 2023; CHENG et al., 2021), enquanto que a etapa de ativação é conduzida entre 600 e 800°C (MISTAR, ALFATAH, SUPARDAN, 2020).

As temperaturas e os tempos referentes aos processos de carbonização e ativação, bem como a razão de impregnação, são fatores que influenciam o rendimento dos carvões ativados. O rendimento é comumente definido como a razão entre a massa final de carvão ativado produzido, após a impregnação, lavagem e secagem, e a massa inicial do material precursor

utilizada, seja após ou não a realização da etapa de carbonização prévia (BAKAR et al., 2023). A condução dos processos de pirólise a altas temperaturas promove uma diminuição significativa no rendimento dos carvões ativados, enquanto que, com o aumento do tempo e da razão de impregnação, apesar de também promoverem redução no rendimento, a variação é menor quando comparada aos efeitos causados pela realização da pirólise a temperaturas mais altas (RASHIDI e YUSUP, 2021; LI et al., 2017).

No trabalho desenvolvido por Karakehya, 2023, a ativação em uma etapa do material precursor foi conduzida a uma temperatura de pirólise de 800°C (10 °C/min), e para o processo em duas etapas a biomassa foi carbonizada a 300°C sob atmosfera inerte, em seguida impregnada com KOH e pirolisada a 800°C (10 °C/min). O carvão ativado obtido por uma etapa apresentou área superficial de 1186 m².g⁻¹ e volume de microporos de 0,44 cm³.g⁻¹ enquanto o obtido por duas etapas apresentou área superficial igual a 2048 m².g⁻¹ e volume de microporos de 0,72 cm³.g⁻¹. Os resultados obtidos apontam que o processo de ativação em duas etapas apresenta resultados melhores, porém, são informações que podem variar de acordo com o material precursor utilizado e as condições do processo de ativação (OGINNI et al., 2019).

A Tabela 4 reúne informações a respeito de condições de produção de carvões ativados a partir de resíduos lignocelulósicos relatadas na literatura

Tabela 4. Produção de carvões ativados a partir de resíduos lignocelulósicos.

Biomassa	Carbonização	Ativação ^a	Área Superficial BET ^b (m ² .g ⁻¹)	Volume de Poros ^c (cm ³ .g ⁻¹)	Rendimento (%)	Referência
Sabugo de milho	450°C (10 °C.min ⁻¹) por 1 h sob atmosfera inerte de N ₂ .	Razão de impregnação de 1:4 (carvão:NaOH), 650°C (10 °C.min ⁻¹) sob atmosfera inerte de N ₂ por 2 h.	3291	2,12	-	(Yu et al., 2019)
Cascas de arroz	750°C (7,5 °C.min ⁻¹) por 100 min sob atmosfera inerte de N ₂ (350 cm ³ .min ⁻¹).	Razão de impregnação de 1:4 (carvão:KOH), 850°C (9,5 °C.min ⁻¹) sob atmosfera inerte de Ar (250 cm ³ .min ⁻¹) por 1,5 h.	3050	-	-	(Yerdauletov et al., 2023)
Cascas de abóbora	500°C sob atmosfera inerte de N ₂ por 2 h.	Razão de impregnação 1:4 (carvão:KOH), 800°C sob atmosfera inerte de N ₂ por 1 h.	2919	1,84	-	(Yu et al., 2019)
Folhas de louro-cereja	600°C por 1 h sob atmosfera inerte de N ₂ (200 mL.min ⁻¹).	Razão de impregnação de 1:4 (carvão:KOH), 850°C sob atmosfera inerte de N ₂ (200 mL.min ⁻¹) por 1 h.	1928	0,850	24,3	(Toprak, 2020)
Talo de juta	-	Razão de impregnação 1:1 (biomassa:KOH), 800°C (3 °C.min ⁻¹) sob atmosfera inerte de N ₂ por 1 h.	1903	1,01	-	(Manasa et al., 2020)
Lascas de tronco de mamoeiro	-	Razão de impregnação 1:2 (biomassa:ZnCl ₂), 400°C por 1 h.	1575	0,890	69	(Udeh e James, 2022)
Cascas de castanha	-	Razão de impregnação 1:1 (biomassa:H ₃ PO ₄), 500°C por 1:30 h.	1287	0,890	40,97	(Patel et al., 2021)
Cascas de castanha	600°C por 1 h.	Vapor a 950°C por 1 h.	1248	-	21	(Léon et al., 2020)

Continua na próxima página.

Continuação Tabela 4. Produção de carvões ativados a partir de resíduos lignocelulósicos.

Casca de noqueira	700°C sob atmosfera inerte de N ₂ (1000 mL.min ⁻¹) por 10 min.	CO ₂ (1000 mL.min ⁻¹), 900°C (10 °C.min ⁻¹) por 3 h.	1228	0,579	11,47	(Zhao et al., 2020)
Pinhas de pinheiro	-	Razão de impregnação 1:1 (biomassa:KOH), 900°C (5 °C.min ⁻¹) sob atmosfera de He (100 mL.min ⁻¹) por 2 h.	1173	0,451	-	(Stelitano et al., 2020)
Resíduo de abacaxi	-	Razão de impregnação 1:1 (biomassa:H ₃ PO ₄), 500°C por 1:30 h.	987	0,830	35,48	(Patel et al., 2021)
Palha de cevada	500°C (10 °C.min ⁻¹) por 1 h sob atmosfera inerte de N ₂ (2500 cm ³ .min ⁻¹).	CO ₂ (2500 cm ³ .min ⁻¹) a 800°C (10 °C.min ⁻¹) por 1 h.	789	0,350	-	(Pallarés et al., 2018)
Casca de macadâmia	350°C por 60 min.	Razão de impregnação 1:1 (carvão:K ₂ CO ₃), 650°C por 90 min.	459	0,230	79,8	(Dao e Luu, 2020)
Resíduos de bamboo	800°C por 1:30 h.	Razão de impregnação 1:1,5 (carvão:H ₃ PO ₄), 800°C sob atmosfera inerte de N ₂ (150 mL.min ⁻¹) por 100 minutos.	398	0,340	-	(Negara et al., 2020)
Talos de Ahar	-	Razão de impregnação de 1:2 (biomassa:KOH), 800°C (10 °C.min ⁻¹) sob atmosfera inerte de Ar (200 mL.min ⁻¹) por 2 h.	304	0,177	-	(Prakash et al., 2021)

^{a, b, c} Condições consideradas ideais e os melhores resultados obtidos após a realização dos experimentos, segundo os autores dos trabalhos.

FONTE: Do autor, 2024 (RASOULI et al., 2023;LOBATO-PERALTA et al., 2021)

3.3.2 Cascas de grãos de café e de grãos de girassol como precursores na produção de carvão ativado

Vários resíduos lignocelulósicos podem ser convertidos em carvão ativado, dentre os possíveis precursores é possível destacar os provenientes do cultivo e produção industrial do café. A produção de grãos de café no mundo entre os anos de 2022 e 2023 foi estimada em 167,2 milhões de sacas de 60 kg e, somente no Brasil, apresentou um total de cerca de 58 mil sacas beneficiadas, essa estatística corresponde ao material que será transportado para indústrias e comercialização, ou seja, o material já passou pelo processo de beneficiamento sendo separado das cascas e demais resíduos que não são de interesse (CONAB, 2024). São esses resíduos, como as cascas dos grãos de café, que devido à alta disponibilidade e descarte inadequado podem contribuir para poluição do meio ambiente (ABETO et al., 2023).

A partir disso, são encontrados trabalhos que relatam o uso das cascas dos grãos de café para a produção de carvão ativado (ARAGAW et al., 2022; THI, TA e VAN, 2021), bem como de outros resíduos lignocelulósicos provenientes do beneficiamento e uso do café como, por exemplo, o endocarpo (ÁNGEL-MERAZ et al., 2020; MARIANA et al., 2021), os rejeitos provenientes do consumo (LIM et al., 2020; CAMPOS et al., 2021) e, também, dos próprios grãos de café (DULYASEREE et al., 2021; ALCARAZ et al., 2019). As cascas de grãos de café podem ser utilizadas como precursores para a produção de carvão ativado por serem materiais que apresentam alto teor de carbono fixo, matérias-primas que apresentam alta composição lignocelulósica e, também, por apresentarem disponibilidade em grande escala devido ao consumo expressivo dos produtos provenientes do cultivo de café (RAMIREZ et al., 2020; PAGALAN et al., 2020).

Diferentes métodos de conversão das cascas de grãos de café em carvão ativado podem ser empregados e, com isso, torna-se necessário avaliar as condições e influências do processo de conversão desse resíduo em carvão. Parâmetros como temperatura de carbonização (HENDRAWAN et al., 2019; ZHAO et al., 2023), razão de impregnação (ZAKARIA, JAMALLUDDIN e BAKAR, 2019; SUHDI, RODIAWAN e WANG, 2022), temperatura e tempo de ativação (KWIATKOWSKI et al., 2021; ÜNER e BAYRAK, 2018) são comumente estudadas por pesquisadores da área. É a partir da variação das condições de produção e por meio da caracterização dos materiais produzidos, que é possível obter informações a respeito das rotas de conversão do material precursor.

Na pesquisa desenvolvida por Sun et al., 2020, os autores avaliaram o efeito do processo de carbonização das cascas de grãos de café na produção de carvão ativado. Foram estudadas

as temperaturas de 400, 500, 600, 650 e 700°C para o processo de carbonização prévia do material precursor por 40 minutos e sob atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de 100 L.h⁻¹. Para a etapa de ativação, as amostras de carvão foram impregnadas com KOH numa proporção de 1:3 (carvão:KOH) e, em seguida, submetidas à pirolise a 800°C por 10 minutos e sob atmosfera inerte de nitrogênio com um fluxo de 48 L.h⁻¹. A partir dessas condições, os resultados obtidos indicaram que a melhor temperatura para carbonização prévia das cascas de café foi de 700°C, uma vez que os carvões apresentaram uma estrutura porosa bem desenvolvida formada majoritariamente por microporos e área superficial de 2817 m².g⁻¹ (SUN et al., 2020).

A etapa de ativação foi um dos parâmetros estudados por Laverde et al., 2019, em que os autores avaliaram o processo a partir da variação da temperatura de ativação para a produção de carvão ativado usando cascas de grãos de café como material precursor. As temperaturas estudadas foram de 500, 650 e 800°C e o agente ativador empregado foi o hidróxido de sódio (NaOH). As ativações foram realizadas após a carbonização prévia do precursor que, em seguida, foi impregnado com o agente ativador numa proporção de 1:3 (carvão:NaOH). Segundo os autores, a influência da temperatura de ativação na produção de carvão ativado está relacionada com as mudanças que ocorrem nos grupos funcionais presentes na superfície do material e, também, na composição elementar dos materiais. Além disso, quando a temperatura foi de 800°C um aumento na área superficial e no volume de poros dos carvões produzidos foi observado e, com isso, os autores indicaram essa temperatura como ideal para a produção dos adsorventes.

O estudo dos efeitos da razão de impregnação é feito a partir da variação entre a quantidade de agente ativador utilizada e a massa do material precursor previamente ou não carbonizado. O intuito dessa análise é compreender os efeitos provocados pela presença do agente ativador durante o processo de ativação, sendo comum encontrar esse tipo de investigação em trabalhos que utilizam o método químico de ativação (HEIDARINEJAD et al., 2019; ZIEZIO et al., 2020; REN et al., 2021). No que se diz respeito aos resíduos provenientes dos grãos de café, a variação da razão de impregnação é diversa. No trabalho desenvolvido por Jung et al., 2017, cascas de grãos de café foram carbonizadas e impregnadas com soluções de KOH com concentrações de 0, 5, 10 e 15 mol.L⁻¹. Os autores concluíram que com o aumento na razão de impregnação, ocorre o desenvolvimento das características porosas dos materiais como maior volume de microporos e mesoporos e maior área superficial.

O mesmo foi observado por Hgeig et al., 2019, no trabalho em que avaliaram o efeito da razão de impregnação de cascas de grãos de café ao utilizar uma solução de H₃PO₄ como

agente ativador. Os autores afirmaram que o aumento da razão de impregnação entre o material precursor e o agente ativador proporcionou a obtenção de carvões ativados com maior volume de poros e área superficial quando comparados com os demais produzidos. Além disso, apesar de serem obtidos carvões ativados com bom desenvolvimento das características porosas, os adsorventes quando produzidos com maiores razões de impregnação, apresentaram uma redução mínima no rendimento que é justificada pelo fato de o agente ativador ser previamente diluído (MAGUANA et al., 2018; SAEED et al., 2021).

Além do setor cafeeiro, é possível destacar a influência do setor de produção de óleos a partir de grãos como, por exemplo, a produção proveniente do cultivo de grãos de girassol. Entre os anos de 2023/2024, a produção de grãos de girassol em solo brasileiro foi de 83,6 mil toneladas de grãos, que foram majoritariamente destinados às indústrias de óleo e comercialização (CONAB, 2024). Mundialmente, a produção ultrapassa cerca de 700 milhões de sementes por ano, sendo a Ucrânia, Rússia, Argentina e China os maiores países produtores dos grãos (HUBETSKA et al., 2021; MORENO et al., 2018). Além disso, nos últimos anos a indústria alimentícia tem intensificado a busca por alimentos provenientes do cultivo de girassóis como o óleo e o os grãos devido aos valores nutricionais apresentados por esses produtos (LINGAMDINNE et al., 2024).

Com isso, é possível afirmar que o crescimento da demanda comercial dos grãos de girassol é uma prática que leva a uma intensificação do cultivo e, conseqüentemente, da formação de resíduos que, de forma semelhante ao que ocorre com os do processamento de grãos de café, precisam de uma destinação correta para evitar impactos ambientais (ANASTOPOULOS et al., 2021). Os rejeitos industriais desse setor podem ser destinados à produção de bioprodutos, sendo o carvão ativado um desses materiais de interesse. Resíduos como as cascas dos grãos de girassol (SRISUWAN et al., 2018; BAHIRAEI e BEHIN, 2021), o caule (WANG et al., 2020; LINGAMDINNE et al., 2024) e a palha proveniente do processamento da planta (LIMA, OLIVEIRA e FRANCA, 2022; CHEN, 2017), são relatados como possíveis precursores. Essas biomassas residuais podem ser utilizadas para a produção de materiais adsorventes por apresentarem composição básica de materiais lignocelulósicos, características químicas diversas como a presença de grupos funcionais oxigenados como hidroxila e carbonila e, também, por serem materiais de fácil obtenção (ZHAO et al., 2022; LINGAMDINNE et al., 2024).

O uso de resíduos lignocelulósicos provenientes do cultivo de girassol para produção de carvão ativado, assim como outros precursores, também requer a definição de parâmetros que colaborem para a obtenção de adsorventes com características próprias para uso. Com isso,

torna-se de interesse o estudo dessa biomassa como material precursor para compreensão do processo de conversão do material em carvão ativado. Na pesquisa desenvolvida por Kaminska et al., 2021, os autores estudaram a preparação de carvões ativados ao submeter diferentes precursores a um mesmo processo de conversão. Cascas de grãos de girassol e de grãos de café foram duas das biomassas lignocelulósicas utilizadas durante o processo de produção dos carvões.

Os autores utilizaram KOH como agente ativador numa razão de impregnação de 1:1, as biomassas foram impregnadas e submetidas a um processo de pirólise sob atmosfera inerte de gás nitrogênio (N_2) por 1 hora a $800^{\circ}C$. Quando comparados os resultados, os carvões ativados obtidos a partir das cascas dos grãos de girassol apresentaram área superficial de $1366\text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e volume total de poros de $0,584\text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$ enquanto que, os carvões obtidos a partir das cascas dos grãos de café apresentaram área superficial de $1566\text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e volume total de poros de $0,694\text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$. Apesar de os materiais produzidos a partir dos resíduos provenientes do cultivo de girassol apresentarem resultados inferiores ao serem comparados com os obtidos a partir das cascas de grãos de café, quando se estende a comparação para com outros tipos de precursores, observa-se que os adsorventes produzidos a partir da biomassa residual do girassol apresentam características interessantes e áreas superficiais relativamente altas (JJAGWE et al., 2021; REZA et al., 2020; SOSA et al., 2023).

Na Tabela 5, são apresentadas algumas informações a respeito de trabalhos presentes na literatura que discutem a produção de carvão ativado a partir de resíduos lignocelulósicos provenientes do cultivo e uso de grãos de café e de grãos de girassol.

Tabela 5. Produção de carvão ativado a partir de resíduos lignocelulósicos provenientes do cultivo e uso de grãos de café e grãos de girassol.

Biomassa	Pré-tratamento	Carbonização Prévia	Agente Ativador	Ativação ^a	Área Superficial BET ^b (m ² .g ⁻¹)	Volume de Poros ^c (cm ³ .g ⁻¹)	Aplicação	Referência
Cascas de grãos de Café	As amostras foram secas a 70°C por 24 h e então moídas.	Atmosfera inerte (N ₂) a 500°C (4 °C.min ⁻¹).	KOH	As amostras impregnadas na proporção 1:2 foram pirolisadas a 800°C (10 °C.min ⁻¹) sob atmosfera inerte (N ₂).	2275	0,890	—	(RAMIREZ et al., 2020)
Resíduo do consumo de grãos de café moídos	As amostras foram lavadas com água destilada, secas a 105°C por 24 h e, em seguida, moídas (250 µm).	—	H ₃ PO ₄	As amostras impregnadas em uma solução de 85% (m/m) foram pirolisadas a 500°C por 1 h sob atmosfera inerte (N ₂ , 0,1 L.min ⁻¹).	2118	0,182	Adsorção de matéria orgânica	(FERRAZ; YUAN, 2020)
Grãos de Café	As amostras foram lavadas com água destilada, secas a 110°C e, em seguida, moídas (entre 300 e 500 µm).	Atmosfera inerte (N ₂) a 400°C (300 °C.min ⁻¹) por 1 h.	KOH e CO ₂	As amostras impregnadas foram pirolisadas a 800°C (300 °C.min ⁻¹) por 1 h sob atmosfera inerte (N ₂), em seguida, a atmosfera foi alterada para um fluxo de CO ₂ e, então, novamente foi estabelecida a atmosfera inerte (N ₂).	1865	0,960	Adsorção de fenol e azul de metileno	(LAKSACI et al., 2017)
Grãos de Café	As amostras foram lavadas com água destilada, secas a 110°C e, em seguida, moídas (entre 300 e 500 µm).	Atmosfera inerte (N ₂) a 400°C (300 °C.min ⁻¹) por 1 h.	KOH	As amostras impregnadas foram pirolisadas a 800°C (300 °C.min ⁻¹) por 1 h sob atmosfera inerte (N ₂).	1668	0,660	Adsorção de fenol e azul de metileno	(LAKSACI et al., 2017)

Continua na próxima página.

Continuação Tabela 5. Produção de carvão ativado a partir de resíduos lignocelulósicos provenientes do cultivo e consumo de grãos de café e de grãos de girassol.

Cascas de grãos de Café	As amostras foram lavadas com água destilada e secas a 70°C por 24 h e, em seguida, foram moídas.	—	KOH	As amostras impregnadas na proporção 1:1 foram pirolisadas a 800°C por 2 h sob atmosfera inerte (N ₂).	1566	0,694	—	(KAMIŃSKA et al., 2021)
Resíduo do consumo de grãos de café moídos	As amostras foram secas a 110°C por 3 dias.	Atmosfera inerte (Ar) a 450°C (50 °C.min ⁻¹) por 30 min.	KOH	As amostras impregnadas foram pirolisadas a 750°C por 2 h.	1422,1	0,655	Adsorção de H ₂ S	(Wang et al., 2022)
Resíduo do consumo de grãos de café moídos	As amostras foram secas a 110°C por 24 h.	—	H ₃ PO ₄ e FeCl ₃	As amostras impregnadas na proporção 0,5:0,5:1 foram pirolisadas a 600°C por 1,5 h.	1030	0,547	Adsorção de bisfenol	(NAGANATHAN et al., 2021)
Cascas de grãos de Café	As amostras foram moídas.	Atmosfera inerte (N ₂ , 60 mL.min ⁻¹) a 500°C (5 °C.min ⁻¹).	NaOH	As amostras impregnadas na proporção 1:3 foram pirolisadas a 800°C (5 °C.min ⁻¹).	1004	0,540	Adsorção de compostos orgânicos.	(PAREDES-LAVERDE et al., 2019)
Cascas de grãos de Café	Amostras foram secas a 100°C por 3 h e então moídas (entre 600 e 1400 µm).	Atmosfera inerte (N ₂ , 100 mL.min ⁻¹) a 800°C por 1 h.	CaCl ₂	As amostras impregnadas foram pirolisadas a 850°C (10 °C.min ⁻¹) sob atmosfera inerte (N ₂ , 100 mL.min ⁻¹).	750	0,400	Adsorção de corante <i>Victoria Blue B</i> .	(PORTELA et al., 2023)
Cascas de grãos de Café	As amostras foram secas a 180°C por 6 h e então moídas (500 µm).	—	KOH	As amostras impregnadas na proporção 1:7 foram pirolisadas a 800°C (4 °C.min ⁻¹) sob atmosfera inerte (N ₂).	743,8	0,448	Adsorção de corante azul de metileno	(TRAN et al., 2021)

Continua na próxima página.

Continuação Tabela 5. Produção de carvão ativado a partir de resíduos lignocelulósicos provenientes do cultivo e consumo de grãos de café e de grãos de girassol.

Cascas de grãos de Café	Amostras foram secas a 60°C por 48 h e, em seguida, moídas (40 mesh).	—	H ₂ SO ₄	As amostras impregnadas na proporção 1:2 foram pirolisadas até 450°C (10 °C.min ⁻¹).	700	—	Adsorção de corante azul de metileno	(DEIVASIGA MANI et al., 2023)
Cascas de grãos de Café	As amostras foram lavadas com água destilada e secas a 80°C por 24 h e, em seguida, foram moídas (< 90 µm).	—	H ₃ PO ₄	As amostras impregnadas na proporção 1:1 foram pirolisadas a 600°C por 1 h.	547,35	0,390	Adsorção de cloridrato de ondansetrona	(SARKAR et al., 2019)
Cascas de grãos de Café	Amostras foram lavadas com água destilada, secas a 105°C por 24 h e moídas (1-2 mm).	Atmosfera inerte (N ₂ , 70 mL.min ⁻¹), a 10 °C.min ⁻¹ até 500°C.	Vapor	Atmosfera inerte (Vapor, 10 mL.min ⁻¹), até 800°C (20 °C.min ⁻¹).	383	0,061	Adsorção de Ni(II).	(RODIGUEZ et al., 2018)
Cascas de grãos de Girassol	As amostras foram lavadas com água destilada, secas a 80°C por 12 h e, em seguida, moídas (150 µm).	Atmosfera inerte (N ₂) a 400°C (10 °C.min ⁻¹) por 1 h.	KOH	As amostras impregnadas na proporção 1:3 foram pirolisadas a 700°C (10 °C.min ⁻¹) por 1 h sob atmosfera inerte (N ₂).	2139	0,96	Adsorção de CO ₂	(BAHIRAEI; BEHIN, 2021)
Sementes de Girassol	As amostras foram lavadas com água destilada, secas a 100°C por 12 h e, em seguida, moídas.	—	H ₃ PO ₄	As amostras impregnadas foram pirolisadas a 600°C (5 °C.min ⁻¹) sob atmosfera inerte (N ₂).	1402	1,71	Catalisador em reações de esterificação	(ALVEAR-DAZA et al., 2021)

Continua na próxima página.

Continuação Tabela 5. Produção de carvão ativado a partir de resíduos lignocelulósicos provenientes do cultivo e consumo de grãos de café e de grãos de girassol.

Cascas de grãos de Girassol	As amostras foram lavadas com água destilada e secas a 50°C por 24 h e, em seguida, foram moídas.	–	KOH	As amostras impregnadas na proporção 1:1 foram pirolisadas a 800°C por 2 h sob atmosfera inerte (N ₂).	1366	0,694	–	(KAMIŃSKA et al., 2021)
Grãos de Girassol	As amostras foram moídas.	–	H ₃ PO ₄	As amostras impregnadas na proporção 1:1 foram pirolisadas a 500°C (10 °C.min ⁻¹).	893,70	0,612	Adsorção de fenilalanina	(LIMA; OLIVEIRA; FRANCA, 2022)
Palha de Girassol	As amostras foram lavadas com água, secas a 115°C e, em seguida, moídas (90 mesh).	–	H ₃ PO ₄	As amostras impregnadas na proporção 1:3 foram secadas a 180°C por 2 h e, em seguida, pirolisadas a 600°C (10 °C.min ⁻¹) por 2 h.	794,01	2,023	Adsorção corante ácido fucsina	(ZHAO; CHEN; JIAO, 2023)
Cascas de grãos de Girassol	As amostras foram secas a 100°C e, em seguida, moídas.	Amostras carbonizadas a 600°C (10 °C.min ⁻¹) por 2 h.	KOH	As amostras impregnadas na proporção 1:2 foram pirolisadas a 800°C (5 °C.min ⁻¹) por 5 h.	477,79	0,3346	Adsorção de gases	(ISLAM et al., 2023)

^{a, b, c} Condições consideradas ideais e os melhores resultados obtidos após a realização dos experimentos, segundo os autores dos trabalhos.

FONTE: Do autor, 2024.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS

Após a produção de carvões ativados a partir de resíduos lignocelulósicos, os adsorventes são comumente caracterizados de acordo com técnicas que permitem a obtenção de diferentes informações sobre características superficiais e morfológicas. Os resultados obtidos apresentam diversos dados a respeito das propriedades dos carvões ativados que estão diretamente relacionadas com os materiais precursores empregados durante a rota de produção (UDDIN et al., 2023). A partir disso, análises de área superficial, volume total de poros, diâmetro médio de poros, presença de grupos funcionais na superfície dos adsorventes e a elucidação da estrutura e superfície porosa são realizadas com o intuito de caracterizar os carvões ativados produzidos e avaliar o emprego de determinados resíduos lignocelulósicos durante a produção de adsorventes (LIAO, KELLEY e YAO, 2019).

Diferentes trabalhos na literatura relatam os processos de caracterização de adsorventes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos (FLETCHER et al., 2024, LUO et al., 2023, STRAWN et al., 2023, SANTOS et al., 2022). As análises são realizadas a partir de diferentes técnicas como: isotermas de adsorção-dessorção de BET; espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Cada técnica fornece uma informação diferente a respeito dos materiais adsorventes e, assim, é possível caracterizar os carvões ativados produzidos.

3.4.1 Isotermas de adsorção-dessorção de N₂

A isoterma de Brunauer-Emmett-Teller (BET), consiste de um modelo matemático que explica a adsorção em multicamadas e é empregado para avaliação de processos que envolvem etapas de adsorção e dessorção (BEHERE e YOON, 2021). A equação proposta é comumente empregada em processos de adsorção gás-sólido, em sistemas de adsorção com pressão relativa entre 0,05 a 0,30, mas também pode ser empregada para o estudo de sistemas líquido-sólido. O modelo BET assume que a energia de adsorção encontrada a partir da segunda camada formada na superfície do adsorvente é a mesma observada para as camadas anteriores (AMBROZ et al., 2018).

A Equação 8 representa a equação de BET na forma não linear e a Equação 9 apresenta sua forma linear (BRIÃO et al., 2022).

$$q_e = \frac{q_s C_{BET} C_e}{(C_s - C_e) \left[1 + (C_{BET} - 1) \left(\frac{C_e}{C_s} \right) \right]} \quad (8)$$

$$\frac{C_e}{q_e (C_s - C_e)} = \frac{1}{q_s C_{BET}} + \frac{(C_{BET} - 1) C_e}{q_s C_{BET} C_s} \quad (9)$$

q_e é a quantidade de material adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio, q_s é a capacidade teórica de saturação da primeira camada, C_e é a concentração do adsorvato no equilíbrio, C_{BET} é uma constante que está relacionada com a energia de ligação superficial e C_s concentração saturada de adsorvato da primeira camada. O parâmetro C_{BET} quando apresenta valor negativo indica que o modelo de isoterma é inadequado para o estudo do processo adsorvivo em questão (GHOUTI e DA'ANA, 2020).

A Equação 9 pode ser reescrita em termos de pressão, conforme a Equação 10 em que n^a é a quantidade de material adsorvido a uma pressão relativa p/p_0 , n_m^a representa a capacidade teórica de saturação da primeira camada, C é uma constante, p é a pressão no equilíbrio e p_0 a pressão inicial do sistema (ESPINAL, 2012).

$$\frac{p}{n^a (p_0 - p)} = \frac{1}{n_m^a C} + \frac{(C - 1) p}{n_m^a C p_0} \quad (10)$$

Esse modelo tem sido frequentemente utilizado na determinação de informações a respeito dos aspectos texturais de superfície como: área superficial; tamanho, distribuição e volume de poros, de adsorventes como o carvão ativado (SILVA et al., 2023). As amostras de materiais porosos são analisadas, geralmente, a partir de um instrumento chamado Micromeritics ASAP (*Accelerated Surface Area and Porosimetry System*), em que é empregado o gás nitrogênio (N_2) ou argônio (Ar) devido a capacidade desses gases de serem adsorvidos e dessorvidos na superfície desses materiais adsorventes (NEMR et al., 2022). As medidas obtidas após a realização das análises por meio do ASAP, são calculadas a partir de diferentes equações. Para determinação da área superficial (A_{BET}) é preciso ter conhecimento do valor referente ao parâmetro n_m^a e da área de seção transversal molecular (a_m) para então calcular o valor da área. A equação utilizada é apresentada na Equação 11 (AMBROZ et al., 2018).

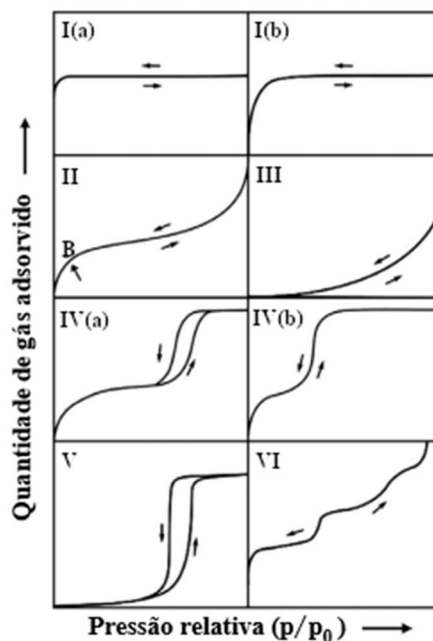
$$A_{BET} = n_m^a L a_m \quad (11)$$

L é a constante de Avogadro e m a massa de adsorvente.

Segundo Majd et al., 2022, a análise de área superficial a partir do modelo de BET é realizada em equipamentos a baixas temperaturas em que a pressão do gás empregado, geralmente nitrogênio a 77K, é alterada em uma rota de adsorção-dessorção em que são medidas as pressões parciais do sistema ao longo do processo. Após a obtenção da isoterma de adsorção-dessorção, é feita uma comparação com curvas de referência e, a partir disso, é feita a descrição dos poros presentes na superfície do material adsorvente. As informações a respeito da área superficial de materiais adsorventes é uma das características que são discutidas para avaliar novos materiais adsorventes produzidos (TIAN e WU, 2017).

As isotermas de referência utilizadas para avaliar os resultados foram propostas pela IUPAC, que classifica as isotermas de adsorção de um equilíbrio gás-sólido em seis tipos de acordo com as características do adsorvente. A Figura 10 apresenta os seis tipos de isoterma de adsorção para um equilíbrio gás-sólido.

Figura 10. Tipos de isotermas de adsorção para um sistema gás-sólido.



FONTE: Adaptado de SCHLUMBERGER e THOMMES, 2021.

Isotermas classificadas no tipo I correspondem a processos de adsorção reversíveis em que foram empregados adsorventes microporosos e são baseadas na formação de monocamadas. A isoterma do tipo I pode ser dividida em duas classes, do tipo I(a) que estão relacionadas ao uso de adsorventes que apresentam poros mais estreitos e do tipo I(b) em que

os adsorventes apresentam tamanho de poros mais largos (GAMA, 2021). Esse tipo de isotermas de adsorção pode ser descrito pela equação de Langmuir (GHOUTI e DA'ANA, 2020).

As isotermas do tipo II também são reversíveis e, geralmente, representam processos de adsorção física sendo que a pressões baixas descreve o processo de adsorção em mesoporos e a formação de monocamadas e a pressões consideradas altas, próximo do ponto de saturação, processos de adsorção em mesoporos e a formação de multicamadas (MUTTAKIN et al., 2018). O tipo III de isotermas de adsorção é característico de processos em que as interações entre as moléculas do adsorvato são maiores quando comparadas com as interações entre o adsorvato e o adsorvente. Além disso, são processos que não apresentam a formação de monocamadas (SULTAN, MIYAZAKI e KOYAMA, 2018).

Isotermas de adsorção do tipo IV descrevem especificamente processos de adsorção em materiais mesoporosos identificando a condensação do gás nos poros, processo que recebe o nome de histerese, que ocorre entre as etapas de dessorção e a adsorção (GHOUTI e DA'ANA, 2020). São isotermas que podem ser classificadas em duas classes: tipo IV(a) que descreve o processo adsorvativo considerando o fenômeno de histerese em poros mais largos, e tipo IV(b) em que a histerese não ocorre e são isotermas reversíveis (GAMA, 2021). As isotermas do tipo V indicam a presença de mesoporos na superfície do material adsorvente e são características de processos com interações adsorvato-adsorvente menos intensas (MUTTAKIN et al., 2018). Aquelas classificadas como tipo VI são isotermas que descrevem processos em que, a temperaturas baixas, as camadas se tornam mais evidentes e a isoterma apresenta multicamadas (GHOUTI e DA'ANA, 2020).

A avaliação do diâmetro médio de poros, do volume total de poros e do volume de microporos de materiais adsorventes é feita a partir dos dados obtidos a partir dos ensaios de isotermas de adsorção-dessorção de BET. Para a determinação do diâmetro médio de poro é empregada a relação entre o volume total de poros e o valor de área superficial BET determinada a partir dos ensaios de isotermas de BET. A Equação 12 representa a relação utilizada durante o ASAP para determinar o diâmetro médio de poro, na qual: $\bar{D}_p$ é o diâmetro médio de poro, V_p é o volume total de poros e A_{BET} é a área superficial calculada (MICROMERITICS, 2020).

$$\bar{D}_p = \frac{4V_p}{A_{BET}} \quad (12)$$

As informações acerca dos valores de volume total de poros de materiais adsorventes são obtidas a partir do volume de nitrogênio líquido adsorvido na pressão relativa de 0,99, e os dados referentes ao volume de microporos é determinado a partir do método *t-plot* (LI, LI e ZHU, 2021). No método *t-plot*, gráficos que relacionam os volumes experimentais de nitrogênio adsorvido em função da espessura estatística da camada adsorvida são plotados e, juntamente com a isoterma experimental de adsorção-dessorção, são capazes de fornecer informações a respeito do sistema de poros (LIPPENS e BOER, 1965). Além dos dados de volume de microporos, o método *t-plot* também fornece as informações referentes aos valores de área superficial externa dos materiais adsorventes (LI, LI e ZHU, 2021).

3.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento que utiliza um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para obtenção de imagens de alta resolução. A técnica fornece informações sobre a morfologia e permite a identificação de elementos químicos de uma amostra sólida, sendo um dos métodos mais versáteis para observação e análise de características microestruturais de materiais (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007). Além disso, as imagens obtidas possuem aparência tridimensional, o que permite conduzir a avaliação das amostras com grande profundidade de foco (COSTA, 2016).

Quando ocorre a interação entre o feixe de elétrons com a amostra são liberados elétrons (secundários, retroespalhados e outros), raios X característicos e fótons que podem ser coletados por detectores, produzindo um sinal que resultará na imagem que será observada (MORTADA et al., 2023). Os elétrons secundários (SE), que são gerados pelas interações entre o feixe de elétrons e a amostra, possuem baixa energia e são capazes de formar imagens com alta resolução e permitem a observação de variações do relevo da superfície observada, sendo de grande interesse durante a realização da técnica (HUSSAIN et al., 2023). Os elétrons retroespalhados (BSE), possuem maior energia e sofrem espalhamento elástico produzindo uma imagem que fornece informações a respeito da topografia do material e da composição da amostra (DAIEM et al., 2020).

Durante a caracterização de carvões ativados, a microscopia eletrônica de varredura é empregada para avaliar a superfície dos adsorventes produzidos traçando comparativos acerca do desenvolvimento da estrutura porosa de acordo com a variação dos parâmetros de produção dos adsorventes (KASSAHUN et al., 2022; BEDADA et al., 2020; MOHAMMADIFARD et al., 2022; LI, LI e ZHU, 2021). Além disso, essa técnica também é utilizada para a identificação

dos elementos químicos presentes na amostra a partir da realização da microanálise química por espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS) (VELMURUGAN et al., 2022; ALTINTIG, SARICI e KARATAS, 2023; AJAY e DINESH, 2021).

Além das informações a respeito da composição química dos materiais, é possível utilizar os dados de microanálise química por EDS para obter informações a respeito da estabilidade dos adsorventes produzidos (LENG et al., 2019). De acordo com a norma europeia EBC (*European Biochar Certificate*), a razão molar de oxigênio e carbono orgânico (O/C_{org}) presentes na composição química dos materiais é uma informação necessária para obter informações de estabilidade dos materiais, sendo indicado que a razão molar dos carvões seja menor que 0,4 (EBC, 2012). A razão molar O/C_{org} é um indicativo do nível de oxidação e da estabilidade dos carvões, segundo Bakshi et al., 2020, altos valores de razão molar O/C_{org} indicam baixa estabilidade e altos níveis de oxidação. A razão O/C_{org} pode ser obtida a partir dos dados de EDS que informam a composição química em porcentagem mássica, a partir da relação apresentada na Equação 13, na qual X_a corresponde à porcentagem de oxigênio presente na composição da amostra e X_b a porcentagem de carbono orgânico, ambas indicadas pela análise de composição química percentual.

$$\text{Razão O/C}_{\text{org}} = \left(\frac{X_a}{100} \right) \times 16 / \left(\frac{X_b}{100} \right) \times 12 \quad (13)$$

3.4.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)

A técnica de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier vem sendo amplamente utilizada como um dos principais métodos de caracterização na avaliação de carvões ativados produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos (KISHIBAYEV et al., 2021; ABEWAA et al., 2023; PATEL, MUTEEN e MONDAL, 2020; MUBARAK, ZAYED e AHMED, 2022). Esse método é baseado na absorção da radiação infravermelha, no qual as frequências de radiação no infravermelho absorvidas equivalem às frequências vibracionais naturais da molécula em questão, e a energia absorvida promove o aumento da amplitude dos movimentos vibracionais das ligações na molécula (PAVIA et al., 2016). Devido ao fato de cada tipo de ligação apresentar sua própria frequência natural de vibração, é possível levantar informações estruturais de moléculas e materiais (YAZID et al., 2024).

Para realização das análises de materiais sólidos, a depender do equipamento, torna-se necessário realizar o preparo da amostra utilizando pastilha de KBr ou uma suspensão de Nujol (HANIF et al., 2021). Instrumentos modernos de FT-IR, possuem um acessório denominado de RTA – Reflectância Total Atenuada, esse acessório descarta a necessidade de preparo da amostra e consistem no emprego de cristais, como diamante, que são cortados e montados em ângulos precisos e que são responsáveis por refletir a radiação infravermelha na amostra (ALI et al., 2020; PAVIA et al., 2016). São necessárias pequenas quantidades de amostra, que são posicionadas diretamente no equipamento e, como resultado, é obtido um espectro no formato de um gráfico de intensidade *versus* frequência.

Apesar de ser uma análise considerada rápida, para interpretar os dados obtidos, é necessário que o espectro seja comparado e associado a outros para que seja possível traçar conclusões (TEIXEIRA, 2020). A utilização da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier é uma técnica indicada para a determinação dos grupos funcionais presentes na superfície dos materiais adsorventes, pois, os espectros obtidos apresentam melhor razão sinal/ruído quando comparados com outras técnicas (PAVIA et al., 2016; BLÄKER et al., 2019).

A Tabela 6 reúne as técnicas utilizadas e seus objetivos para caracterização de carvões ativados preparados a partir de resíduos lignocelulósicos.

Tabela 6. Técnicas utilizadas e seus respectivos objetivos para caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos lignocelulósicos.

Técnicas	Objetivos	Referências
Isotermas de BET	Determinação da área superficial, área superficial externa. volume total de poros e diâmetro médio de poros	(Burbano et al., 2023; Oliveira et al., 2021; Yildiz et al., 2022; Konnerth et al., 2021)
FT-IR*	Identificação de possíveis grupos funcionais presentes na superfície dos adsorventes	(Arefyeva et al., 2020; Raihan et al., 2020; Blesson e Rao, 2024; Singh, 2024)
MEV**	Caracterização morfológica dos adsorventes e elucidação da estrutura porosa	(Cruz et al., 2019; Maysarah et al., 2023; Thi et al., 2020; Pandikumar et al., 2022)

*Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier; **Microscopia eletrônica de varredura.;

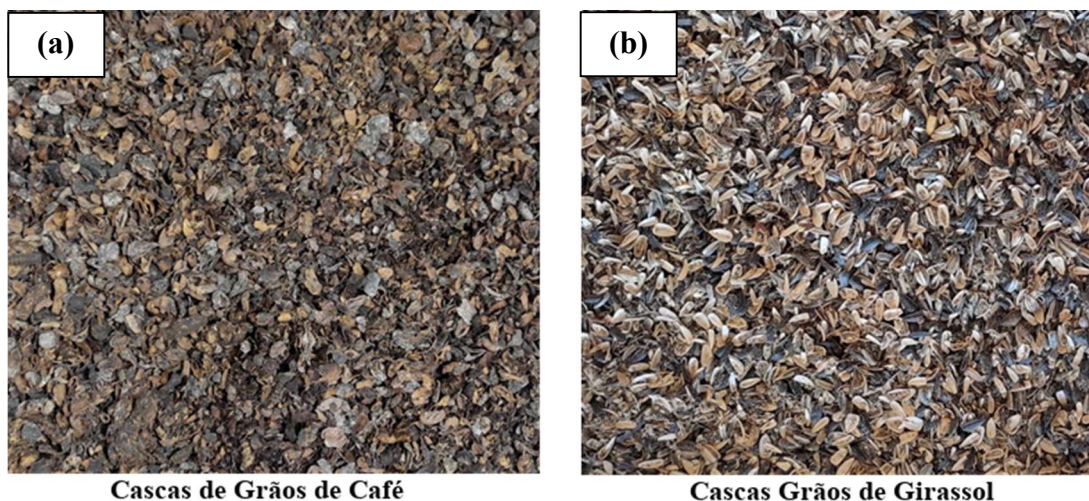
4 MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Biomassas

Baseando-se na alta produtividade agrícola do Brasil e na consequente geração de resíduos provenientes do processamento de biomassas, as cascas de grãos de café e de grãos de girassol foram selecionadas como materiais precursores para realização deste estudo. As cascas de grãos de café (Figura 14a) são um resíduo que apresenta disponibilidade no setor agrário regional e foram fornecidas pela fazenda Córrego Feio (Araxá, MG, Brasil). As cascas dos grãos de girassol (Figura 14b) são um dos rejeitos da fábrica de processamento de girassol da empresa Parecis (Campo Novo do Parecis, MT, Brasil), e foram fornecidas pela empresa com acordo realizado. As Figuras 14(a) e 14(b) ilustram os resíduos lignocelulósicos utilizados.

Figura 11. Resíduos lignocelulósicos utilizados na produção de carvão ativado.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Cascas de grãos de café; b) Cascas de grãos de girassol.

4.1.2 Demais materiais utilizados para produção dos carvões ativados

Para realização da ativação dos carvões foi empregado hidróxido de potássio (KOH) sólido como agente ativador e soluções de ácido clorídrico ($0,1 \text{ mol.L}^{-1}$) foram preparadas para o processo de lavagem e consequente purificação dos carvões ativados produzidos.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Caracterização das biomassas

As biomassas lignocelulósicas utilizadas para a produção dos carvões ativados foram caracterizadas de acordo com metodologias previamente definidas denominadas análises imediatas para determinação dos teores de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo. Além disso, a composição química estrutural dos precursores foi avaliada a partir da determinação dos teores de extrativos, lignina, holocelulose, alfacelulose e hemicelulose. Para realização dessas análises, os materiais precursores foram inicialmente peneirados utilizando um agitador de peneira elétrico e peneiras com abertura de 4, 6 e 8 mesh, ambos da marca Bertel, para remoção de impurezas como galhos e pedras. Em seguida, de acordo com a norma ASTM D 3173, as amostras foram moídas em um moinho de facas tipo Willey Star FT 50/6-l da marca Fortinox, obtendo-se um material passante na peneira de 60 mesh.

4.2.1.1 Teor de umidade

A porcentagem referente à umidade é representada pelo teor de água presente nas amostras, e para determinação desse teor foi utilizada a norma ASTM D 3173. Foram empregados cadinhos de porcelana de massa conhecida e, aproximadamente, 1 g de amostra foi transferida para cada cadinho e, em seguida, a massa do conjunto determinada. Os conjuntos, cadinhos e amostras, foram levados para a estufa sem tampa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por 3 horas. Após esse período, o conjunto foi resfriado em dessecador por 30 minutos e, então, a massa determinada. O conjunto foi levado novamente para a estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por mais 30 minutos e, passado o tempo na estufa o conjunto foi resfriado em dessecador, pesado e a massa obtida. Esse processo foi repetido até a obtenção de uma massa constante e realizado em triplicata.

Com os valores referentes à massa dos cadinhos de porcelana (MC) e do conjunto cadinho e amostra úmida (MCAU) foi possível determinar a massa de amostra úmida (MAU) por diferença. Além disso, com as massas do conjunto cadinho e amostra seca (MCAS), determinadas após a realização do procedimento, o teor de umidade das amostras foi determinado a partir da Equação 14.

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \left[\frac{(MCAU - MCAS)}{MAU} \right] \times 100 \quad (14)$$

Os valores obtidos para o teor de umidade a partir da Equação 14, são dados em base úmida. Para conversão dos dados em base seca foi utilizada a Equação 15.

$$\text{Teor de umidade (\%)}_{\text{base seca}} = \frac{(TU_w \times 100)}{(100 - TU_w)} \quad (15)$$

TU_w corresponde ao teor de umidade em porcentagem na base úmida.

4.2.1.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas das amostras representa os minerais presentes no material, esses compostos são, geralmente, provenientes de substâncias adicionadas durante o cultivo e também da própria biomassa (EMBRAPA, 2016). Para determinação do teor de cinzas dos resíduos lignocelulósicos estudados, de acordo com a norma ASTM D 3174, foram utilizados os resíduos obtidos após a determinação do teor de umidade e cadinhos de porcelana sem tampa com massa previamente conhecida. Os conjuntos cadinhos e amostras secas foram pesados e levados à mufla sem tampa a temperatura ambiente, em seguida a mufla foi aquecida até $500 \pm 10^\circ\text{C}$ por 1 hora ($8,5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$). Após atingir 500°C , as amostras foram aquecidas até $950 \pm 20^\circ\text{C}$ em 1 hora ($16^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$). Ao atingir 950°C , as amostras permaneceram na mufla a $950 \pm 20^\circ\text{C}$ por 2 horas. Em seguida, a temperatura foi programada para reduzir até 200°C em 1 hora e os conjuntos foram levados para resfriamento em dessecador por 30 minutos e, então, as massas dos conjuntos calcinados foram determinadas. Esse procedimento foi realizado em triplicata para ambas as biomassas estudadas.

A partir dos valores de massa do cadinho sem tampa (MC) e do conjunto cadinho e amostra seca (MCAS) foi determinada por diferença a massa de amostra seca (MAS). Além disso, com conhecimento da massa do conjunto cadinho e amostra calcinados (MCAC),

determinada após o procedimento, foi determinado o teor de cinzas das amostras a partir da Equação 16.

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \left[\frac{(\text{MCAC}-\text{MC})}{\text{MAS}} \right] \times 100 \quad (16)$$

Os valores obtidos a partir da Equação 16 são dados em base seca, para conversão dos valores em base úmida foi utilizada a Equação 17.

$$\text{Teor de cinzas (\%)}_{\text{base úmida}} = \frac{(\text{TC}_d \times 100)}{(100 + \text{TC}_d)} \quad (17)$$

TC_d corresponde ao teor de cinzas em porcentagem na base seca.

4.2.1.3 Teor de voláteis

O teor de voláteis das biomassas foi determinado a partir da norma ASTM D 3175. Foram pesados aproximadamente 1,0 grama das amostras com granulometria de 60 mesh em cadinhos de porcelana com massa conhecida. Os conjuntos cadinhos com tampa e amostras foram levados à mufla pré-aquecida a $950 \pm 20^\circ\text{C}$ e permaneceram no equipamento por 7 minutos. Entre 2 e 3 minutos de permanência das amostras na mufla foi verificado se os cadinhos permaneciam tampados, isso porque, a tampa minimiza a entrada de oxigênio nos sistemas. Após o período na mufla, os cadinhos foram retirados e resfriados em dessecador. O procedimento foi realizado em triplicata para ambas as biomassas.

O cálculo do teor de voláteis foi obtido a partir da diferença entre a perda de massa do procedimento e o teor de umidade base úmida em porcentagem obtido a partir da análise do teor de umidade. Considerando os valores do conjunto cadinho com tampa e amostra (MCTA) e a massa do cadinho com tampa (MCT) foi possível determinar a massa de amostra úmida utilizada (MAU). Com os valores de massa do conjunto cadinho com tampa e amostra calcinada (MCTAC) e os valores de massa dos cadinhos com tampa (MCT) a massa de amostra calcinada após os 7 minutos (MAC) foi determinada por diferença, assim, a partir da Equação 18 foi obtida a porcentagem referente a perda de massa durante o procedimento.

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left[\frac{(\text{MAU}-\text{MAC})}{\text{MAU}} \right] \times 100 \quad (18)$$

Com os valores de teor de umidade base úmida e perda de massa, ambos em porcentagem, o teor de voláteis foi determinado a partir da Equação 19.

$$\text{Teor de voláteis (\%)} = \text{TU}_w(\%) - \text{PM}(\%) \quad (19)$$

$\text{TU}_w(\%)$ é o teor de umidade em base úmida e $\text{PM}(\%)$ a porcentagem de perda de massa determinada a partir da Equação 18. Além disso, como os valores obtidos para os teores de voláteis são encontrados em base úmida, para conversão em base seca é utilizada a Equação 20.

$$\text{Teor de voláteis (\%)}_{\text{base seca}} = \frac{(\text{TV}_w \times 100)}{(100 - \text{TV}_w)} \quad (20)$$

TV_w corresponde ao teor de voláteis em porcentagem em base úmida.

4.2.1.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo indica a porcentagem de material após a retirada de umidade, cinzas e compostos voláteis da composição das biomassas. De acordo com a norma ASTM D 3172, o teor de carbono fixo dos resíduos lignocelulósicos estudados foi determinado a partir da diferença entre os teores de umidade, cinzas e voláteis, todos em base úmida. Com isso, após a determinação das porcentagens referentes a esses teores e a partir da Equação 21 foi possível calcular o teor de carbono fixo.

$$\text{Teor de carbono fixo (\%)}_{\text{base úmida}} = 100\% - \text{TU}_w(\%) - \text{TC}_w(\%) - \text{TV}_w(\%) \quad (21)$$

$\text{TU}_w(\%)$ é o teor de umidade em base úmida; $\text{TC}_w(\%)$ o teor de cinzas em base úmida e $\text{TV}_w(\%)$ o teor de voláteis em base úmida.

4.2.1.5 Teor de extrativos

Os extrativos são compostos presentes em materiais lignocelulósicos que não são componentes estruturais da parede celular das biomassas e que podem ser extraídos, tanto por solventes polares quanto por apolares (EMBRAPA, 2016). O teor de extrativos dos resíduos

lignocelulósicos estudados foi determinado a partir da norma TAPPI T 264 om-88 e de acordo com o documento 236 da Embrapa que discute os procedimentos para análise lignocelulósica. Foi utilizada uma aparelhagem para extração por Soxhlet, cartuchos de massa conhecida com aproximadamente 4,0 gramas de amostra sem umidade e diclorometano como solvente. Ao balão de vidro foram adicionados 150 mL de diclorometano e pérolas de vidro, em seguida conectado ao extrator Soxhlet e, então, o conjunto foi colocado em uma manta aquecedora e conectado a um condensador. O número de refluxos foi ajustado para que ocorressem 24 refluxos por 5 horas de extração e o fluxo de água nos condensadores foi conduzido a temperaturas abaixo de 20°C. Após o período de extração, 25 mL do solvente foram recuperados, os cartuchos foram levados à estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas e após a secagem a massa dos cartuchos foi encontrada. Durante o procedimento é necessário realizar uma análise similar em que é empregado apenas o solvente e o cartucho vazio, sem o material vegetal. Os procedimentos foram realizados em triplicata em todas as etapas.

A partir dos valores de massa dos cartuchos antes da análise (MRI) e da massa dos cartuchos após a análise e secagem na estufa (MRF) foi possível obter por diferença a massa do conjunto sem extrativos (MCSE). O mesmo foi feito para os cartuchos utilizados durante a análise sem o material vegetal, a diferença entre a massa dos cartuchos vazios antes da análise (MRVI) e a massa dos cartuchos vazios após secagem na estufa (MRVF) indicou a massa referente aos extrativos do material do cartucho (MRSE). Como a massa de amostra seca (MAS) foi determinada no momento em que os cartuchos foram preenchidos, a partir da Equação 22 foi possível obter o teor de extrativos das biomassas.

$$\text{Teor de extrativos (\%)} = \left[\frac{(\text{MCSE} - \text{MRSE})}{\text{MAS}} \right] \times 100 \quad (22)$$

Os dados obtidos a partir da Equação 22 são valores referentes à massa da amostra seca, nesse caso é necessário fazer uma correção para que os valores representem o material original. Para isso, foi realizado o cálculo matemático a partir da Equação 23.

$$\text{Teor de extrativos (\%)}_{\text{corrigido}} = \frac{\text{TE}_d(\%) \times (100 - \text{TU}_w(\%))}{100} \quad (23)$$

$\text{TE}_d(\%)$ é o teor de extrativos em base seca e $\text{TU}_w(\%)$ é o teor de umidade em base úmida.

4.2.1.6 Teor de lignina

O teor de lignina das amostras foi determinado a partir da norma TAPPI T 222 om-22 e de acordo com o documento 236 da Embrapa que discute os procedimentos para análise lignocelulósica. Foram colocados cerca de 1,0 grama da amostra residual do procedimento de teor de extrativos, uma amostra sem umidades nem extrativos, em um almofariz com capacidade de cerca de 300 mL e adicionados 17,0 mL de ácido sulfúrico 72% (m/m) previamente resfriado em geladeira de 10 a 15°C. Após 15 minutos de agitação com o pistilo, o conjunto almofariz e amostra ficou 24 horas em repouso. Após o tempo de digestão, foram adicionados ao conjunto 306 mL de água destilada para diluir o ácido sulfúrico a 4%. A solução foi homogeneizada e transferida para um balão com pérolas de vidro e capacidade de 1000 mL em várias porções, em seguida o balão foi levado para aquecimento em uma manta e um condensador conectado. O sistema foi submetido a aquecimento e refluxo por 4 horas a partir do início da fervura. Após o procedimento o conjunto foi resfriado até temperatura ambiente.

Para realização da etapa de filtração foram utilizados funis de vidro sinterizado ASTM tipo C com abertura de poro entre 10 μ e 16 μ de 50 mL com massa previamente conhecida e kitassatos com capacidade de 1000 mL. O conteúdo do balão foi transferido para o funil de vidro sinterizado com agitação constante e, na metade da operação foi recolhido o filtrado para posterior determinação da lignina solúvel. O filtrado foi transferido para frascos âmbar e armazenados na geladeira para evitar a degradação do material. Após a transferência do conteúdo do balão para o funil, o precipitado recolhido no funil foi enxaguado até que o pH se tornasse próximo ao da água destilada usada no procedimento. Os funis com o precipitado foram levados à estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por 18 horas. Após a secagem, os conjuntos funis-lignina foram resfriados em dessecador e a massa determinada. Todos os procedimentos para determinação de lignina insolúvel e lignina solúvel foram realizados em triplicata.

A partir dos valores de massa do funil (MF) e massa do conjunto funil e lignina após o procedimento (MFL) é possível determinar, por diferença, a massa de lignina (ML). Como a massa de amostra utilizada para realização da análise (MA) é conhecida, a partir da Equação 24 foi possível determinar o teor de lignina insolúvel das amostras analisadas.

$$\text{Teor de lignina (\%)}_{\text{Insolúvel}} = \left(\left(\frac{\text{ML}}{\text{MA}} \times 100 \right) - \text{TC}_d(\%) \right) \quad (24)$$

$\text{TC}_d(\%)$ é a porcentagem referente ao teor de cinzas em base seca da amostra analisada.

Como os valores obtidos a partir dessa equação são referentes à massa de amostra seca e sem extrativos, é preciso fazer uma correção do teor de lignina insolúvel a partir da Equação 25.

$$\text{Teor de lignina insolúvel (\%)}_{\text{Corrigido}} = \frac{\text{TLI\%} \times [100 - (\text{TU}_w\% + \text{TE}_w\%)]}{100} \quad (25)$$

TLI% é o teor de lignina insolúvel obtido a partir da Equação 35; $\text{TU}_w\%$ o teor de umidade da amostra analisada em base úmida e $\text{TE}_w\%$ o teor de extrativos da amostra analisada em base úmida.

Para determinação da lignina solúvel, foi empregado o método de Goldschimid (TAPPI T 264 om-88). Foram diluídos 1 mL das amostras de filtrado, retiradas durante a filtração do precipitado, com ácido sulfúrico 4% em balões de 10 mL. Em seguida, foi realizada uma varredura da absorbância das amostras de 280 nm a 215 nm. Com base nos valores de absorbância, a Equação 26 foi empregada para obtenção do valor referente a concentração de lignina solúvel.

$$\text{Concentração Lignina (\%)}_{\text{Solúvel}} = \frac{4,53 \times A_{215} - A_{280}}{300} \quad (26)$$

A_{215} representa a absorbância a 215 nm e A_{280} representa a absorbância a 280 nm.

Considerando que o volume inicial da amostra era de 323 mL, a massa de lignina solúvel (MLS) foi obtida ao multiplicar a concentração de lignina solúvel pelo volume inicial da amostra. Após obter a massa de lignina solúvel foi calculado o teor de lignina solúvel a partir da Equação 27.

$$\text{Teor de Lignina (\%)}_{\text{Solúvel}} = \left(\frac{\text{MLS}}{\text{MA}} \right) \times 100 \quad (27)$$

MA corresponde à massa de amostra utilizada durante o procedimento.

Assim como para os teores de lignina insolúvel, a correção dos teores de lignina solúvel foi realizada. A Equação 28 foi utilizada para correção dos valores obtidos.

$$\text{Teor de lignina solúvel (\%)}_{\text{Corrigido}} = \frac{\text{TLS\%} \times [100 - (\text{TU}_w\% + \text{TE}_w\%)]}{100} \quad (28)$$

TLS% é o teor de lignina solúvel obtido a partir da Equação 27; $TU_w\%$ o teor de umidade da amostra analisada em base úmida e $TE_w\%$ o teor de extrativos da amostra analisada em base úmida.

4.2.1.7 Teor de holocelulose

O teor de holocelulose diz respeito à parcela de carboidratos presentes na célula vegetal de biomassas, englobando valores de celulose e hemicelulose. A técnica comumente empregada para determinação do teor de holocelulose de materiais lignocelulósicos consiste na oxidação da lignina em um meio ácido (EMBRAPA, 2016). Para determinação dos teores de holocelulose dos resíduos lignocelulósicos estudados foi empregada a norma TAPPI T 264 om-88 e a metodologia descrita no documento 236 da Embrapa que discute os procedimentos para análise lignocelulósica. Inicialmente, em um erlenmeyer de 500 mL foram adicionados aproximadamente 3,0 gramas das amostras, sem umidade nem extrativos, 120 mL de água destilada e agitador magnético. O conjunto erlenmeyer e amostra foi levado a uma capela de exaustão em um banho de glicerina a $70 \pm 2^\circ\text{C}$ constantes, 2,5 gramas de clorito de sódio (NaClO_2) e 1 mL de ácido acético glacial foram adicionados ao sistema. O conjunto foi tampado com um erlenmeyer de 25 mL e aquecido por 1 hora sob agitação branda.

Após 1 hora 2,5 gramas de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético glacial foram adicionados ao sistema. Outra adição de 2,5 gramas de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético glacial foi feita após o fim da segunda hora de procedimento e, então, o sistema permaneceu por 3 horas em banho maria a $70 \pm 2^\circ\text{C}$ constantes e agitação branda. Ao final das três últimas horas de procedimento os sistemas foram retirados do banho de glicerina e colocados em um banho de gelo por 30 minutos na capela de exaustão.

Para realização da filtração foram utilizados funis de vidro sinterizado ASTM tipo M com abertura de poros de $40\ \mu$ a $100\ \mu$ de 150 mL com massa previamente conhecida e kitassatos de 1000 mL. O conteúdo dos erlenmeyers foi transferido para os funis de vidro sinterizado com agitação constante, o precipitado recolhido nos funis foi enxaguado até que o pH fosse ajustado para próximo da água destilada utilizada. Após o ajuste do pH, o filtrado foi lavado com 20 mL de acetona e, em seguida, foi feito um enxague com água destilada. Os funis foram levados para estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por 18 horas. Após a etapa de secagem na estufa, os funis foram resfriados em dessecador por 30 minutos e a massa do conjunto funil e holocelulose determinada. O procedimento foi realizado em triplicata para ambas as biomassas.

A partir dos valores de massa do funil antes do procedimento (MF), massa do conjunto funil-holocelulose (MFH) e de amostra utilizada no procedimento (MA), a Equação 29 foi utilizada para determinar o teor de holocelulose das biomassas.

$$\text{Teor de holocelulose (\%)} = \left[\frac{(MFH-MF)}{MA} \right] \times 100 \quad (29)$$

Os valores obtidos para o teor de holocelulose se referem à massa de amostra seca e sem extrativos, com isso foi necessário realizar uma correção para que os valores indicassem resultados a respeito do material de origem. Para isso foi utilizada a Equação 30.

$$\text{Teor de holocelulose (\%)}_{\text{Corrigido}} = \frac{TH\% \times [100 - (TU_w\% + TE_w\%)]}{100} \quad (30)$$

TH% é o teor de holocelulose obtido a partir da Equação 29; $TU_w\%$ o teor de umidade da amostra analisada em base úmida e $TE_w\%$ o teor de extrativos da amostra analisada em base úmida.

4.2.1.8 Teores de alfacelulose e hemicelulose

Para determinação dos teores de alfacelulose e hemicelulose foi utilizada a norma TAPPI T 203 cm-99 e a metodologia descrita no documento 236 da Embrapa que discute os procedimentos para análise lignocelulósica. A metodologia mais empregada consiste na determinação da parcela de holocelulose que não se dissolve em uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) a 17,5% (m/v), e que corresponde ao teor de alfacelulose (EMBRAPA, 2016). A partir disso, foi preparada uma solução de hidróxido de sódio a 17,5% (m/v) e pesados cerca de 1,0 gramas da holocelulose obtida anteriormente. A massa de holocelulose foi colocada em um almofariz com capacidade de 100 mL e, então, 15 mL da solução de hidróxido de sódio foram transferidos para o almofariz e o conjunto ficou em repouso por 2 minutos. Em seguida, com o pistilo o material foi triturado por 8 minutos. Após essa etapa 40 mL de água destilada foram transferidos para o almofariz.

A filtração foi realizada utilizando funis de vidro sinterizado ASTM tipo M com abertura de poro de 40 μ a 100 μ de 50 mL com massa previamente conhecida e kitassatos de 1000 mL. O conteúdo do almofariz foi transferido para o funil com agitação constante e o precipitado recolhido no funil foi enxaguado até o ajuste do pH para próximo da água destilada

utilizada no procedimento. Os funis foram levados para estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por 18 horas e, após a secagem, o conjunto funil-alfacelulose foi resfriado em dessecador por 30 minutos e, então, a massa foi determinada. O procedimento foi realizado em triplicata para ambos resíduos lignocelulósicos estudados.

A partir dos valores de massa do funil antes da análise (MF), massa de holocelulose usada no procedimento (MH) e da massa do conjunto funil e alfacelulose após secagem na estufa (MFA), foi determinado o teor de alfacelulose das amostras a partir da Equação 31, a seguir.

$$\text{Teor de alfacelulose (\%)} = \left[\frac{(MFA-MF)}{MH} \right] \times 100 \quad (31)$$

Foi realizado o cálculo do teor de alfacelulose corrigido com base no teor de holocelulose corrigido utilizando a Equação 32.

$$\text{Teor de alfacelulose (\%)}_{\text{Corrigido}} = \frac{TA\% \times TH_{\text{Corrigido}}\%}{100} \quad (32)$$

TA% corresponde ao valor do teor de alfacelulose calculado a partir da Equação 31 e $TH_{\text{Corrigido}}\%$ é o valor do teor de holocelulose corrigido para a amostra analisada.

Para determinar o teor de hemicelulose foi calculada a diferença entre os teores de holocelulose e alfacelulose corrigidos, conforme a Equação 33.

$$\text{Teor de hemicelulose (\%)}_{\text{Corrigido}} = TH_{\text{Corrigido}}(\%) - TA_{\text{Corrigido}}(\%) \quad (33)$$

$TH_{\text{Corrigido}}(\%)$ corresponde ao valor do teor de holocelulose corrigido e $TA_{\text{Corrigido}}(\%)$ ao valor do teor de alfacelulose corrigido.

4.2.2 Produção de carvão ativado

As etapas principais do processo de conversão dos resíduos lignocelulósicos em carvão ativado consistem nos processos de carbonização e ativação do material. Porém, existem diferentes possibilidades para condução dessas etapas. Por isso, com base em trabalhos que utilizaram resíduos lignocelulósicos semelhantes aos empregados neste estudo, foi possível

estabelecer a metodologia descrita a seguir para produção dos carvões ativados a partir das cascas de grãos de café e das cascas de grãos de girassol.

4.2.2.1 Secagem das biomassas

Visando reduzir a umidade das biomassas, as amostras foram submetidas ao processo de secagem em estufa (Marca Quimis, modelo Q317M). Baixas temperaturas são comumente utilizadas para evitar a volatilização de outros componentes da biomassa diferentes da água (JEWIARZ et al., 2020). Assim, de acordo com a metodologia adotada por Kaminska et al., 2021, após submeter os resíduos lignocelulósicos a um processo de peneiramento para remoção de impurezas como galhos de madeira e pedras, as cascas de grãos café e de grãos de girassol foram secas a 70°C por 24 horas. Após o processo de secagem, as amostras foram armazenadas.

4.2.2.2 Moagem das biomassas

Para padronização do material utilizado na produção dos carvões ativados, assim como em trabalhos prévios, foi adotada granulometria menor que 300 µm (LEE et al., 2021b; PEDICINI et al., 2020). Após o processo de secagem as biomassas estudadas passaram por um pré-tratamento físico em que foram moídas em um moinho de facas tipo Willey Star FT 50/6-1 da marca Fortniox e o material passante na peneira de 60 mesh (250 µm) (Marcar Bertel), foi utilizado para as etapas posteriores de carbonização e ativação.

4.2.2.3 Processo de carbonização

As amostras de biomassas foram submetidas a um processo de carbonização prévia devido a utilização de hidróxido de potássio (KOH), uma base forte, como agente ativador. As amostras menores que 300 µm foram adicionadas a cadinhos de porcelana e pirolisadas em forno mufla (Marca Jung, modelo LF00912) a 700°C com taxa de aquecimento de 5 °C.min⁻¹, sob atmosfera inerte de nitrogênio (N₂) (99,999%), de acordo com metodologia similar à adotada por Laverde et al., 2019. O fluxo de gás nitrogênio no interior do forno foi de 500 mL.min⁻¹, isso porque, a capacidade do forno mufla utilizado é de 9 litros sendo consideravelmente maior quando comparada com a dos equipamentos relatados na literatura. Após a carbonização das biomassas os carvões obtidos foram retirados do forno e resfriados

em dessecador. A Figura 15 ilustra o forno mufla utilizado para realização da carbonização e, posteriormente, no processo de ativação dos carvões produzidos.

Figura 12. Forno mufla utilizado.



FONTE: Do autor, 2024.

4.2.2.4 Etapa de Ativação

A ativação dos carvões obtidos foi realizada via processo de ativação química empregando hidróxido de potássio (KOH) sólido em meio seco, como agente ativador. O uso do reagente KOH baseia-se no índice de trabalhos que relatam o seu emprego na produção de carvões ativados com altos valores de área superficial e, também, devido a disponibilidade desse material para realização deste estudo. Além disso, destaca-se que a adição do ativador em meio seco é uma prática que vem sendo adotada em vários trabalhos (GÓMEZ et al., 2022; LAKSACI et al., 2017; TAYIBI et al., 2021)

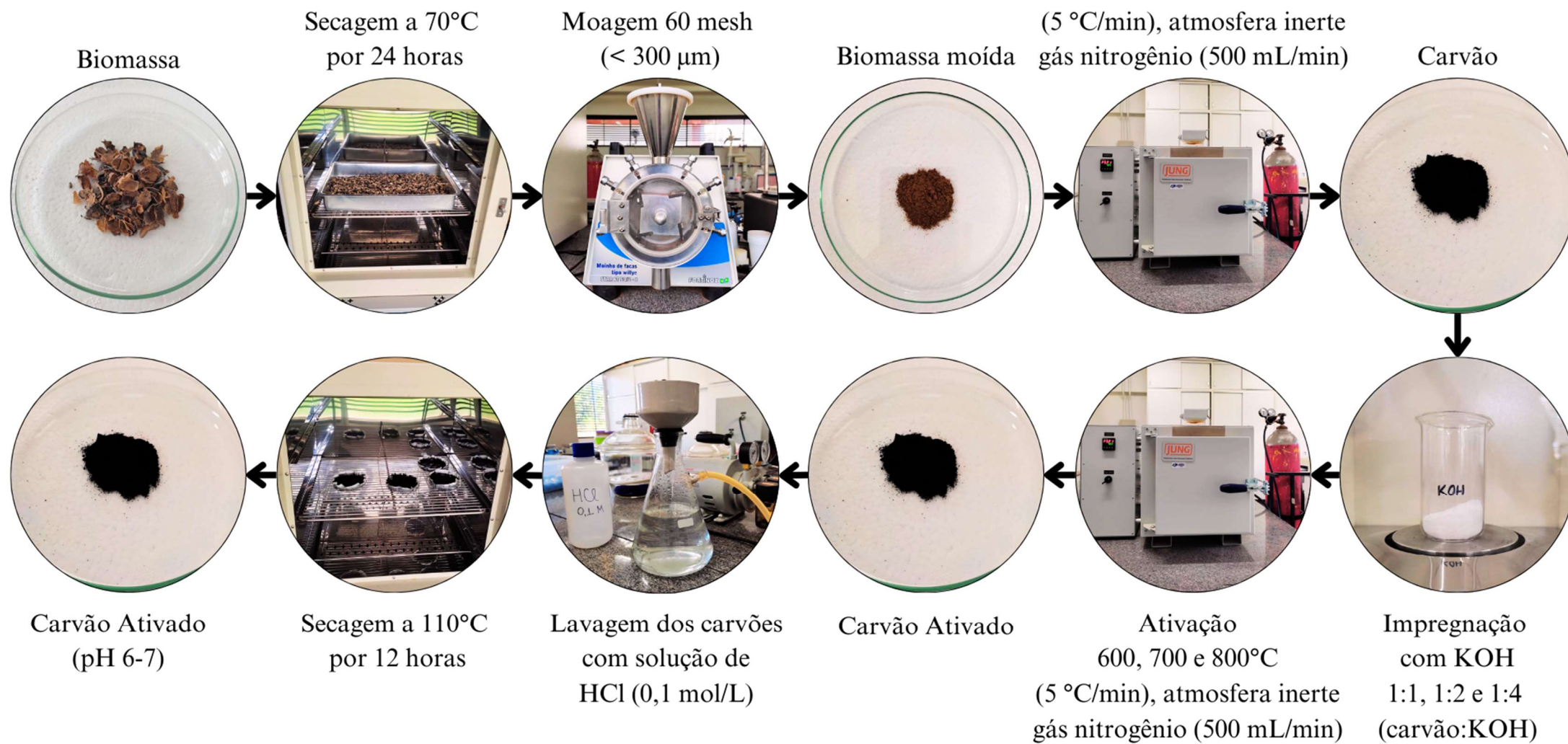
Após a carbonização, 10 gramas do carvão obtido foram adicionados de KOH sólido com diferentes razões de impregnação (massa/massa): 1:1, 1:2 e 1:4 (carvão:KOH), em béqueres e transferidos para cadinhos de porcelana. Diferentes temperaturas de ativação foram empregadas, sendo o processo realizado a 600, 700 e 800°C com taxa de aquecimento de 5 °C.min⁻¹ para todas as razões de impregnação estudadas de maneira similar ao realizada por Bag et al., 2020. Os cadinhos contendo as misturas carvão:KOH foram ao forno mufla sob atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo constante de 500 mL.min⁻¹ a partir da temperatura

ambiente até às temperaturas de ativação estudadas. Os períodos em que as amostras permaneceram no interior da mufla variaram de acordo com as temperaturas estudadas e o emprego da taxa de aquecimento de $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, sendo: 600°C (120 min); 700°C (140 min) e 800°C (160 min).

Após a realização da ativação os carvões ativados foram resfriados em dessecador e, então, para remoção do hidróxido de potássio residual, foi realizado um processo de lavagem com uma solução de ácido clorídrico $0,1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ e água deionizada para ajuste do pH entre 6 e 7, utilizando-se filtração a vácuo. Em seguida, os carvões ativados foram submetidos a um processo de secagem em estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 12 h e armazenados em dessecador de acordo com o trabalho realizado por Farma e Apriyani, 2023.

A Figura 16 representa o processo de produção dos carvões ativados neste trabalho.

Figura 13. Esquema representativo do processo de produção dos carvões ativados.



FONTE: Do autor, 2024.

4.2.3 Caracterização do carvão ativado

Após a produção dos carvões ativados, os materiais obtidos foram submetidos a diferentes processos de caracterização que são fundamentais para se conhecer as propriedades dos adsorventes e estimar a eficiência dos mesmos nos processos de adsorção. Para o presente estudo, os adsorventes preparados foram caracterizados empregando-se análises similares às realizadas em trabalhos prévios (MARIAH et al., 2023; NABIH et al., 2023; SOLMAZ et al., 2023; YERDAULETOV et al., 2023).

4.2.3.1 Determinação do rendimento mássico percentual

O rendimento das amostras de carvão preparadas após a carbonização prévia das biomassas foi calculado de acordo com a Equação 34, que relaciona a massa de carvão obtido (M_{CP}) e a massa da amostra de biomassa submetida à carbonização prévia (M_{AM}).

$$\text{Rendimento Carvão (\%)} = \left(\frac{M_{CP}}{M_{AM}} \right) \times 100 \quad (34)$$

Os rendimentos dos carvões ativados produzidos foram calculados a partir da relação entre a massa de carvão produzido (M_C) e da massa de carvão ativado após ajuste do pH e secagem em estufa a 110°C por 12 horas (M_{CA}). A Equação 35 foi utilizada para determinação dos valores percentuais de rendimento.

$$\text{Rendimento Carvão Ativado (\%)} = \left(\frac{M_{CA}}{M_C} \right) \times 100 \quad (35)$$

4.2.3.2 Propriedades texturais

Análises de área superficial total, volume de poros e distribuição de poros são de fundamental importância para a caracterização de materiais como o carvão ativado (THERANI et al., 2015). As propriedades de textura dos adsorventes foram determinadas mediante utilização do equipamento *Micromeritics ASAP 2020 Surface Area & Porosity Analyzer*, em parceria com o Instituto de Ciências Exatas e Naturais do Pontal da Universidade Federal de Uberlândia. As amostras foram desgaseificadas, utilizando vácuo a 120°C durante 24 h, antes das análises de textura. A partir das isotermas BET de adsorção e dessorção de gás nitrogênio

(N₂) a 77 K, foram obtidos resultados de área superficial interna, volume de microporos, área superficial externa e volume total de poros.

4.2.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia e a estrutura porosa dos carvões ativados preparados foram avaliadas a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura, a partir de um equipamento da marca Tescan, modelo VEJA 3 LMU, acoplado a um sistema para realização da microanálise química das amostras com o emprego da técnica de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS). Para realização das análises foi necessário realizar o recobrimento das amostras com uma camada de ouro com espessura de 10 nm, para fazer com que a superfície da amostra se tornasse condutora. A caracterização foi realizada em parceria com a Universidade Federal de Uberlândia, no Laboratório de Caracterização de Materiais.

4.2.3.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)

Os grupos funcionais orgânicos presentes em cada amostra de carvão ativado foram identificados utilizando-se espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier, FT-IR (do inglês: *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), a partir do equipamento *Bruker Vertex 70 FT-IR*. Para realização das análises não foi necessária a realização de tratamentos prévios ou utilização de demais materiais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS

5.1.1 Análises Imediatas e Composição Química Estrutural

A partir das análises imediatas as características das biomassas utilizadas foram avaliadas. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Análise imediata dos resíduos lignocelulósicos estudados (valores médios e desvio padrão).

Biomassas	Análises Imediatas (%) [*]			
	Umidade	Cinzas	Voláteis	Carbono Fixo
Cascas de Grãos de Café	4,89	7,85	73,71	17,79
	(± 0,13)	(± 0,16)	(± 0,56)	(± 0,39)
Cascas de Grãos de Girassol	5,73	4,54	71,52	22,59
	(± 0,31)	(± 0,30)	(± 0,40)	(± 0,08)

^{*}Dados em base seca.

FONTE: Do autor, 2024.

As cascas de grãos de café apresentaram teor de umidade próximo ao encontrado por Kiggundu et al., 2019, de 5,20%, e menor do que o resultado obtido por Chen et al., 2017, de 6,98%. Já para as cascas de grãos de girassol o teor de umidade encontrado foi um valor menor que o encontrado por Matin et al., 2019, de 7,94%. Segundo Mironov et al., 2023, o teor de umidade influencia no processo de adsorção em que os adsorventes serão submetidos, isso porque, o teor de umidade é um indicativo da presença de grupos hidrofílicos superficiais contendo oxigênio que durante a adsorção promovem a formação de ligações de hidrogênio. Porém, altos teores de umidade em biomassas lignocelulósicas afetam a durabilidade dos carvões produzidos, sendo indicado que o teor de umidade seja de até 10% (SILVA et al., 2023).

O teor de cinzas para as cascas de grãos de café foi semelhante ao encontrado por Zaichenko et al., 2020, de 7,74%. Para as cascas de grãos de girassol o teor de cinzas foi um valor próximo ao obtido por Alhwayzee et al., 2020, de 3,18%. As cinzas provenientes de biomassas podem ser compreendidas como uma mistura complexa de minerais resultante da

combustão de componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos e, por isso, para compreender o comportamento da biomassa durante a combustão o conhecimento do teor de cinzas é necessário (FARIAS, 2020). Altos teores de cinzas não são favoráveis para a produção de carvões ativados devido ao fato de influenciarem nas interações entre o adsorvente e o adsorvato no processo de adsorção. Além disso, devido ao fato de as cinzas apresentarem características alcalinas, altos teores percentuais podem provocar a diminuição da vida útil dos equipamentos utilizados durante o processo de conversão termoquímica e, por isso, o conhecimento desse percentual permite que a metodologia seja realizada de forma a evitar possíveis danos (BRITO, 2020).

O percentual referente ao teor de voláteis diz respeito à parcela de substâncias que são desprendidas da biomassa durante o aumento da temperatura (POYILIL et al., 2022). Os valores obtidos vão de acordo com resultados apresentados em outros trabalhos, nos quais para as cascas de grãos de café foram obtidos teores de materiais voláteis de 72,94% (ZINLA et al., 2021) e 76,60% (EZEALIGO et al., 2023) e para as cascas de grãos de girassol de 77,5% (ISLAMOVA et al., 2021) e 83,69% (ALHWAYZEE et al., 2020). Dentre as análises realizadas, percebe-se que o maior percentual em massa dos precursores consiste de materiais voláteis, ou seja, substâncias que são desprendidas e volatilizadas com o aumento da temperatura. Em relação aos valores dos teores de voláteis, quanto maior forem os percentuais mais facilidade de ignição e queima do material será observada, sendo comumente relatados teores na faixa de 70 a 80% da matéria seca durante a carbonização (MELO, 2020).

O teor de carbono fixo é referente à fração de carbono que permanece na amostra após os processos de conversão termoquímica (BRITO, 2020). Na literatura são relatados teores de carbono fixo para cascas de grãos de café de 19,36% (SETTER et al., 2020) e para as cascas de grãos de girassol de 19,17% (MARTIN et al., 2019), valores próximos aos que foram obtidos experimentalmente neste trabalho. Além disso, os percentuais de carbono fixo apresentam uma relação inversamente proporcional aos materiais voláteis das biomassas (FARIAS, 2020), relação que foi observada ao avaliar os resultados obtidos para as cascas de grãos de café e de grãos de girassol estudadas.

As análises de composição química estrutural que avaliam os teores de extrativos, lignina, holocelulose, alfacelulose e hemicelulose permitem a compreensão da influência dos componentes estruturais das biomassas durante o processo de conversão térmica dos precursores a carvão. Para as biomassas estudadas, os valores obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Análise da composição química estrutural dos resíduos lignocelulósicos estudados (valores médios e desvio padrão).

Biomassas	Composição Química Estrutural (%) [*]				
	TE	TL _t ^{**}	TH	TA	TH _m
Cascas de Grãos de Café	3,22 (± 0,31)	30,33 (± 0,09)	40,67 (± 0,08)	21,11 (± 0,04)	19,56 (± 0,04)
Cascas de Grãos de Girassol	24,34 (± 0,73)	13,69 (± 0,08)	38,07 (± 0,04)	26,43 (± 0,09)	11,64 (± 0,09)

^{*}Dados em base seca.

^{**}Valores referentes à soma dos teores de lignina solúvel e insolúvel.

TE = Teor de Extrativos; TL_t = Teor de Lignina Total; TH = Teor de Holocelulose; TA = Teor de Alfacelulose; TH_m = Teor de Hemicelulose.

FONTE: Do autor, 2024.

O teor de extrativos é referente aos compostos orgânicos presentes no interior das células das plantas e exercem a funcionalidade de intermediários no metabolismo, reserva de energias e defesa contra ataques de micróbios e insetos (BARBOSA, 2021). Na parcela referente aos extrativos estão presentes compostos como óleos essenciais, gorduras, proteínas, resinas, amidos, ceras e outros resíduos que são extraídos com o uso de solventes polares ou apolares (CARVALHO et al., 2021).

As cascas de grãos de café estudadas apresentaram baixo teor de extrativos quando comparado ao encontrado por Zeleke et al., 2022 de 9,4%, e maior em relação ao obtido por Akcay et al., 2023, de 1,69%. As cascas de grãos de girassol apresentaram um teor de extrativos mais expressivo em comparação com as cascas de grãos de café, o que se deve ao fato de estes serem materiais oleaginosos que, portanto, apresentam maiores teores de óleos em sua composição química.

No processo de pirólise das biomassas os componentes químicos estruturais como lignina, celulose e hemicelulose sofrem degradação em diferentes estágios de temperatura que ocorrem até que uma massa de material sólido é obtida como resultado. Devido ao fato de a lignina ser o componente que apresenta maior estabilidade térmica, precursores lignocelulósicos que apresentem maiores teores de lignina em sua composição resultam em rendimentos maiores de carvão e promovem a formação de carvões ativados com maior dureza e durabilidade (DUTRA, 2021). Os carvões produzidos a partir de cascas de grãos de café

apresentaram rendimento de 31,82%, enquanto os carvões preparados a partir de cascas de grãos de girassol apresentaram rendimento de 23,24%. Quando comparados os rendimentos obtidos e os percentuais de lignina encontrados para as biomassas estudadas, as cascas de grãos de girassol apresentaram teor de lignina menor em sua composição e, conseqüentemente, menor rendimento de carvão foi observado.

O teor de lignina encontrado para as cascas de grãos de café foi próximo ao encontrado por Veiga et al., 2017, de 29,55%, e o mesmo pôde ser observado para as cascas de grãos de girassol quando comparado com o resultado obtido no trabalho de Shaukat et al., 2021, em que o teor de lignina foi de 17,0%. Para a produção de carvões ativados, o percentual de lignina dos precursores é considerado importante por indicar a presença de porcentagens consideráveis de carbono sendo, assim, preferíveis precursores que apresentem maiores teores de lignina em sua composição (SILVA, 2020).

Os teores de holocelulose, alfa-celulose e hemicelulose são parâmetros que estão diretamente relacionados entre si, uma vez que, o teor de holocelulose corresponde à soma dos teores de alfa-celulose e hemicelulose. Durante o processo de pirólise de biomassas, esses componentes estruturais sofrem degradação e promovem a liberação de compostos voláteis, com isso, altos teores de holocelulose (alfa-celulose e hemicelulose) contribuem para o aumento do teor de voláteis dos materiais lignocelulósicos e, conseqüentemente, para o desenvolvimento da área superficial dos carvões produzidos. Além disso, esses componentes estão relacionados com a facilidade de ignição dos materiais precursores por apresentam menor estabilidade térmica quando comparados com a lignina. Grandes teores de hemicelulose em precursores lignocelulósicos não influenciam de forma significativa na produção de carvões ativados, porém, altos percentuais de alfa-celulose tendem a gerar carvões com grande área superficial (DUTRA, 2021).

Ao comparar os precursores estudados neste trabalho com outros resíduos lignocelulósicos previamente avaliados, é possível observar que os materiais apresentam composição percentual intermediária. As diferenças observadas estão relacionadas principalmente às características de processos de cultivo e região que influenciam no desenvolvimento das biomassas e, conseqüentemente, nos resultados de composição percentual que são observados quando comparados com outras biomassas.

A Tabela 9 reúne e compara informações a respeito das características físico-químicas de outras biomassas avaliadas para a produção de carvões ativados.

Tabela 9. Análises imediatas e composição química estrutural de biomassas lignocelulósicas provenientes do cultivo de café e girassol empregadas para a produção de carvão ativado.

Biomassa	Análise Imediata (%) – Base Seca				Composição Química (%) – Base Seca			Referência
	TU	TC	TV	TCF	TL _t	TA	TH _m	
Cascas de grãos de Café	04,89 ± 0,13	07,85 ± 0,16	73,71 ± 0,56	17,79 ± 0,39	30,33 ± 0,09	21,11 ± 0,04	19,56 ± 0,04	(Este trabalho)
Cascas de grãos de Girassol	05,73 ± 0,31	04,54 ± 0,30	71,52 ± 0,40	22,59 ± 0,08	13,69 ± 0,08	26,43 ± 0,09	11,64 ± 0,09	(Este trabalho)
Grãos de Café Torrados	04,38	01,21	80,96	17,83	-	-	-	(Sermyagina et al., 2021)
Grãos de Café	03,25	01,19	83,65	15,16	-	-	-	(Sermyagina et al., 2021)
Grãos de Café	04,40	06,80	54,40	34,70	-	-	-	(Maree et al., 2020)
Cascas de grãos de Café	09,06	03,55	77,09	19,36	27,14	20,53	47,29	(Setter et al., 2020)
Cascas de grãos de Café	09,28	03,45	75,31	21,23	32,25	12,40	50,10	(Martinez et al., 2019)
Pergaminho grãos de Café	11,09	05,84	74,07	20,09	26,59	55,75	08,97	(Martinez et al., 2019)
Cascas de grãos de Girassol	07,52	02,88	76,93	12,67	-	-	-	(Ferreira et al., 2020)
Talos de Girassol	11,13	02,48	-	-	21,75	34,19	09,78	(Brazil et al., 2019)

TU = Teor de Umidade; TC = Teor de Cinzas; TV = Teor de Voláteis; TCF = Teor de Carbono Fixo; TL_t = Teor de Lignina Total; TA = Teor de Alfa-celulose; TH_m = Teor de Hemicelulose.

FONTE: Do autor, 2024.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ADSORVENTES PRODUZIDOS

Para se referir aos carvões ativados preparados neste trabalho foram adotadas nomenclaturas considerando o material precursor, a temperatura de ativação e a razão de impregnação como, por exemplo: o carvão ativado (CA) produzido a partir de cascas de grãos de café (Ca) na temperatura de ativação de 600°C e com razão de impregnação de 1:1 (carvão:KOH) foi denominado de CACa 600°C – 1:1; já o carvão ativado (CA) produzido a partir de cascas de grãos de girassol (Gi) na temperatura de ativação de 600°C e com razão de impregnação de 1:1 (carvão:KOH) foi denominado de CAGi 600°C – 1:1.

5.2.1 Rendimento dos adsorventes produzidos

O rendimento dos carvões ativados é influenciado pelos parâmetros adotados durante a produção dos adsorventes como: a razão de impregnação do material precursor carbonizado, a temperatura e o tempo de carbonização e ativação. Além desses fatores, os materiais precursores também exercem influências no rendimento mássico observado. Os rendimentos mássicos percentuais calculados para cada carvão ativado produzido a partir do carvão proveniente das cascas de grãos de café são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Rendimento mássico percentual dos adsorventes produzidos a partir das cascas de grãos de café.

Carvões Ativados	Rendimento Mássico (%)
CACa 600°C – 1:1	91,18
CACa 600°C – 1:2	81,90
CACa 600°C – 1:4	76,87
CACa 700°C – 1:1	61,30
CACa 700°C – 1:2	60,58
CACa 700°C – 1:4	50,45
CACa 800°C – 1:1	55,05
CACa 800°C – 1:2	52,01
CACa 800°C – 1:4	43,69

FONTE: Do autor, 2024.

A partir dos resultados obtidos é possível compreender que com o aumento da temperatura durante o processo de ativação, o rendimento dos carvões ativados diminui. Ao avaliar os resultados, os rendimentos obtidos para carvões preparados na faixa de 800°C são menores do que os obtidos quando a etapa de ativação foi conduzida a 700 e 600°C, isso ocorre devido ao fato de que o aumento da temperatura resulta na eliminação da umidade e desprendimento de compostos voláteis presentes na composição do material promovendo, assim, o aumento da taxa de decomposição térmica dos materiais e consequentemente uma diminuição da massa dos carvões produzidos.

No trabalho desenvolvido por Mukherjee et al., 2022, os autores estudaram a produção de carvões ativados a partir de resíduos provenientes do beneficiamento de café e observaram que o rendimento diminuiu com o aumento de temperatura, quando a ativação foi realizada a 600°C o rendimento observado foi de 64,80% e a 800°C o rendimento diminuiu para 55,30%. Ngueabou et al., 2022, avaliaram as influências no rendimento de carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café e ativação com soluções de KOH, com temperaturas de ativação de 300, 450 e 600°C. Os resultados também indicaram que o rendimento dos adsorventes produzidos diminuiu de acordo com o aumento da temperatura, sendo 59,05%, 43,09% e 39,02%, respectivamente. Morali et al., 2018, ao avaliar a produção de carvão ativado a partir de sementes de girassol também observou que o aumento da temperatura de ativação de 400°C para 600°C afetou os rendimentos dos carvões, diminuindo de 27,6% para 9,1%.

Além da influência da temperatura de ativação é observado que, numa mesma faixa de temperatura, os rendimentos mássicos diminuem conforme o aumento da razão de impregnação entre o material precursor carbonizado e o agente ativador. Segundo Thithai et al., 2021, bases fortes como o hidróxido de potássio (KOH), são agentes ativadores que promovem uma maior desidratação e despolimerização da matriz carbonácea do material precursor o que, também, resulta em uma diminuição dos percentuais de rendimento. Porém, os resultados indicam que apesar de a razão de impregnação contribuir para a diminuição do rendimento dos carvões ativados, a temperatura de ativação apresenta maior influência. Os carvões preparados a 800°C com razão de impregnação 1:1 apresentaram rendimento de 55,05%, enquanto os preparados a 600°C, com mesma razão de impregnação, apresentaram rendimento de 91,18%. Já os preparados a 800°C com razão de impregnação 1:2 tiveram rendimento de 52,01%, enquanto aqueles produzidos a 600°C apresentaram rendimento de 81,90%, valores próximos aos carvões preparados nas mesmas faixas de temperatura com menor razão de impregnação.

Os resultados obtidos para as cascas de grãos de girassol foram semelhantes aos que foram encontrados para os carvões produzidos a partir das cascas de grãos de café. Carvões

ativados preparados em temperaturas mais altas e com maiores razões de impregnação apresentaram uma diminuição no rendimento mássico. A Tabela 11 reúne os rendimentos mássicos calculados para os carvões preparados a partir das cascas de grãos de girassol.

Tabela 11. Rendimento mássico percentual dos adsorventes produzidos a partir das cascas de grãos de girassol.

Carvões Ativados	Rendimento Mássico (%)
CAGi 600°C – 1:1	84,55
CAGi 600°C – 1:2	77,49
CAGi 600°C – 1:4	74,42
CAGi 700°C – 1:1	69,65
CAGi 700°C – 1:2	58,75
CAGi 700°C – 1:4	54,66
CAGi 800°C – 1:1	56,69
CAGi 800°C – 1:2	49,85
CAGi 800°C – 1:4	48,18

FONTE: Do autor, 2024.

A composição química dos materiais precursores também exerce influência nos rendimentos dos carvões ativados produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos. Quando observados maiores teores de lignina, componente estrutural que apresenta maior estabilidade térmica, serão obtidos carvões ativados com maiores rendimentos. Ao comparar os resultados obtidos para as duas biomassas estudadas, os carvões produzidos a partir das cascas de grãos de café apresentaram, de forma geral, maiores rendimentos devido o material precursor apresentar maior teor de lignina em sua composição.

5.2.2 Propriedades texturais

A avaliação das propriedades texturais é fundamental para caracterização dos carvões ativados, isso porque, fornece informações a respeito de parâmetros que influenciam a capacidade adsorviva dos adsorventes como área superficial interna e externa, volume de poros e diâmetro médio dos poros. As informações sobre as propriedades texturais dos adsorventes foram avaliadas a partir das isotermas BET de adsorção e dessorção de gás nitrogênio (N₂) a 77K.

5.2.2.1 Propriedades texturais dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café

Na Tabela 12 são apresentados os resultados parciais referentes à área superficial aparente (BET), área superficial externa, volume de microporos, volume total de poros e diâmetro médio de poro para as amostras de carvão ativado produzidas a partir das cascas de grãos de café.

Tabela 12. Área superficial aparente (BET), área superficial externa, volume de microporos, volume total de poros e diâmetro médio de poro para os carvões ativados de cascas de grãos de café.

Amostras	S_{BET}^a ($m^2 \cdot g^{-1}$)	S_{EXT}^b ($m^2 \cdot g^{-1}$)	$V_{p(mic)}^c$ ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	$V_{p(total)}^d$ ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	d_p^e (nm)
CGCa*	0,8517	1,1078	0,0063	0,0057	26,96
CCGCa**	1,6154	0,5486	0,0006	0,0236	58,36
CACa 600°C – 1:1	456,52	71,56	0,2131	0,2811	2,46
CACa 600°C – 1:2	761,16	138,46	0,3435	0,4484	2,36
CACa 600°C – 1:4	453,63	103,56	0,1933	0,3005	2,65
CACa 700°C – 1:1	975,47	154,16	0,4504	0,6047	2,48
CACa 700°C – 1:2	1054,08	138,86	0,4910	0,6319	2,40
CACa 700°C – 1:4	1306,97	294,15	0,5689	0,7875	2,41
CACa 800°C – 1:1	664,40	125,62	0,3004	0,4199	2,53
CACa 800°C – 1:2	1203,05	240,75	0,5484	0,7159	2,38
CACa 800°C – 1:4	1054,59	264,14	0,4465	0,6401	2,43

^aÁrea superficial aparente (BET); ^bÁrea superficial externa; ^cVolume de microporos; ^dVolume total de poros; ^eDiâmetro de poro.

*Cascas de Grãos de Café (60 mesh)

**Carvão Cascas de Grãos de Café

FONTE: Do autor, 2024.

Os resultados obtidos para as amostras de carvão ativado preparadas a partir de cascas de grãos de café indicaram que com o aumento da temperatura de ativação, ocorre um aumento dos valores de área superficial aparente dos materiais. Esse comportamento é observado devido ao fato de que o aumento da temperatura de ativação, até uma determinada faixa de temperatura,

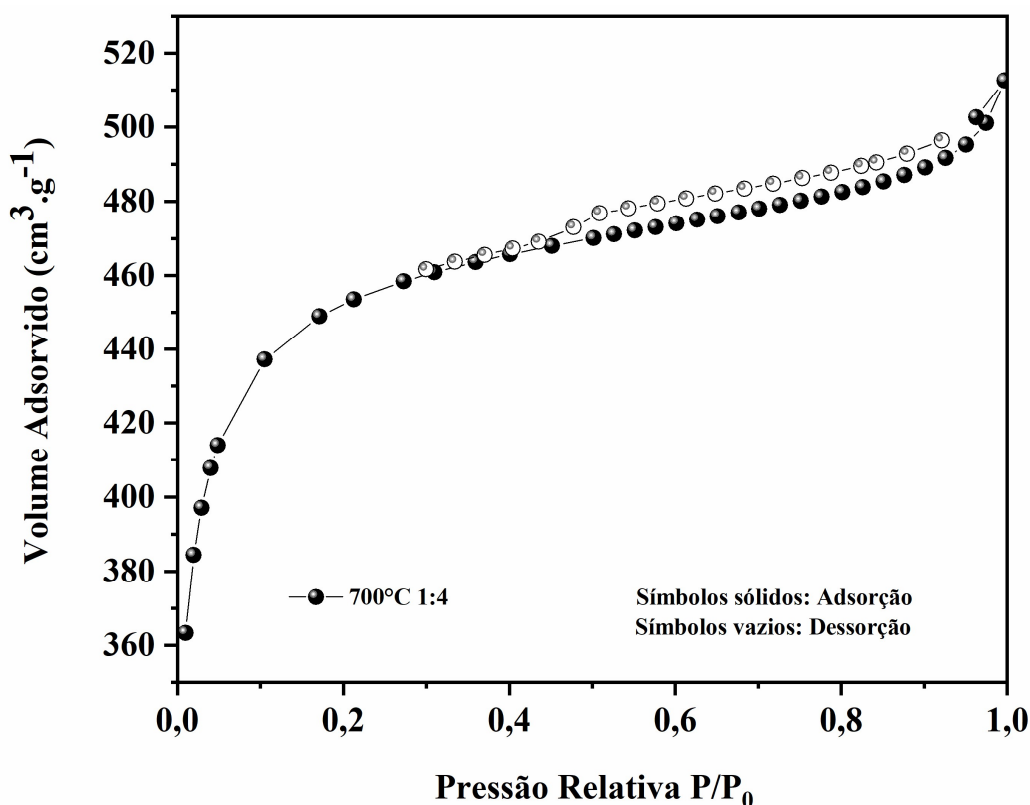
promove o desenvolvimento da estrutura porosa dos materiais o que proporciona um aumento no volume de microporos e, conseqüentemente, o aumento da área superficial dos materiais. Além disso, também foram identificadas variações nos resultados obtidos quando avaliada a influência da razão de impregnação durante a produção dos adsorventes. Ao serem empregadas razões de impregnação diferentes em uma mesma temperatura de ativação, os valores de área superficial apresentaram tendência em aumentar com o aumento da razão de impregnação, porém, essa tendência deixa de ser observada quando empregada a razão de impregnação de 1:4 (carvão:KOH) para todas as temperaturas de ativação estudadas. A amostra que apresentou os melhores resultados foi a CACa 700°C – 1:4, com valor de área superficial aparente igual a 1306,97 m².g⁻¹.

A variação observada nos resultados obtidos para as amostras de carvão ativado produzidas neste trabalho ocorre porque o emprego de menores temperaturas de ativação e razão de impregnação promovem a formação de uma estrutura porosa inicial que, com o aumento concomitante desses parâmetros, é desenvolvida levando a formação de mesoporos e microporos até que em elevadas condições a parede dos poros desenvolvidos colapsa e, com isso, ocorre a formação de poros com diâmetros maiores sendo, então, obtidos menores valores de área superficial.

As reações entre o hidróxido de potássio e o material precursor também influenciam o desenvolvimento da estrutura porosa pois, durante o processo de ativação levam à formação de novos poros na estrutura do carvão, porém, segundo Li et al., 2022, quando empregadas razões de impregnação maiores observa-se uma tendência da diminuição da área superficial aparente, que ocorre porque o excesso de agente ativador reage com os átomos de carbono envolvidos previamente na formação da estrutura porosa resultando no aumento do diâmetro dos poros e, conseqüentemente, na redução da área superficial aparente dos carvões ativados que é uma medida relacionada diretamente com a estrutura porosa dos materiais.

Em relação a área superficial externa, os resultados indicam um aumento gradual com a mudança dos parâmetros utilizados, mas menor do que os observados para os valores de área superficial aparente, o que é desejado em um bom adsorvente (ANDRADE, 2014). A Figura 14 apresenta a isoterma de adsorção-dessorção de gás nitrogênio obtida para a amostra de carvão ativado CACa 700°C – 1:4, que apresentou os melhores resultados. As isotermas BET de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para as demais amostras analisadas de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café são apresentadas no Apêndice A.

Figura 14. Isoterma de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 700°C – 1:4.



FONTE: Do autor, 2024.

Ao avaliar as isotermas de BET obtidas para cada amostra foi possível compreender que as curvas referentes aos carvões ativados com diferentes razões de impregnação apresentam um comportamento semelhante, isso é um indicativo de que as características texturais dos adsorventes é semelhante (GUO et al., 2024). Além disso, a amostra referente ao carvão ativado produzido a 700°C com razão de impregnação 1:4 apresentou maior relação entre o volume de gás adsorvido e toda a faixa de pressão relativa analisada, enquanto os carvões produzidos a 600°C com razões de 1:1 e 1:4 e a 800°C com razão de 1:1 foram as amostras que apresentaram menor relação de volume de gás adsorvido. Ao comparar as isotermas de todas as amostras de carvão ativado avaliadas e o material precursor *in natura* com granulometria de 60 mesh, a adsorção de gás nitrogênio aumenta de forma expressiva, isso indica o desenvolvimento da estrutura porosa do material após o processo de carbonização e ativação.

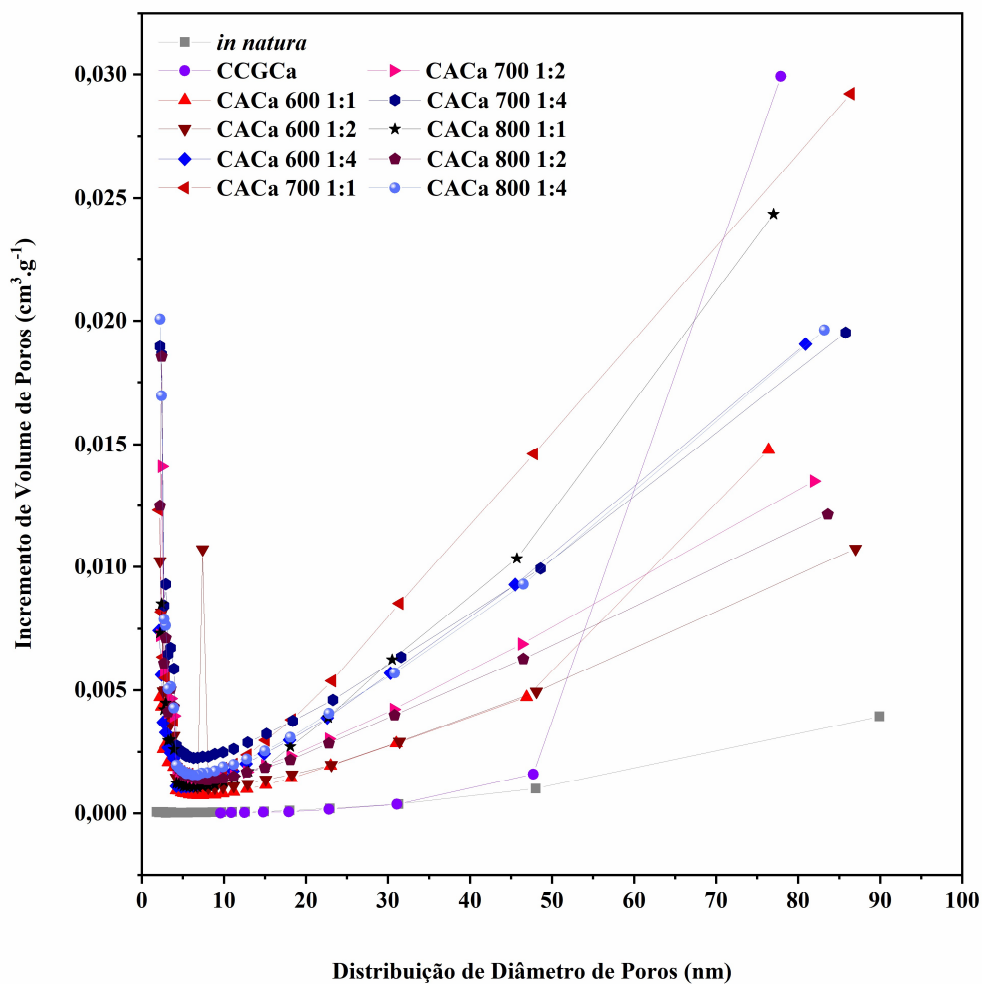
A forma das isotermas, quando comparadas com a classificação IUPAC (Figura 10), é semelhante a curva isoterma tipo II para um sistema de adsorção gás-sólido. As isotermas que apresentam comportamento similar ao tipo II indicam a formação de monocamadas a pressões baixas e multicamadas quando próximo do ponto de saturação dos adsorventes. Outra

característica dos sistemas gás-sólido pertencentes a essa classificação é que descrevem processos reversíveis e indicam que a adsorção ocorre predominantemente em mesoporos.

As curvas obtidas para avaliação da distribuição de diâmetro dos poros são apresentadas na Figura 15. A partir do gráfico e dos dados organizados na Tabela 12, é possível identificar um aumento do volume total de poros de acordo com o aumento da temperatura de ativação empregada e o desenvolvimento de um menor volume de microporos, quando comparado com o volume total, mas que apresenta uma tendência de aumento quando são empregadas maiores temperaturas de ativação e razões de impregnação. Isso indica que o processo de ativação empregado promoveu o desenvolvimento da estrutura porosa dos carvões, sendo a amostra de carvão CACa 700°C – 1:4 a que apresentou maior volume total de poros ($0,7875 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), volume de microporos ($0,5689 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) e diâmetro médio de poro igual a 2,41 nm.

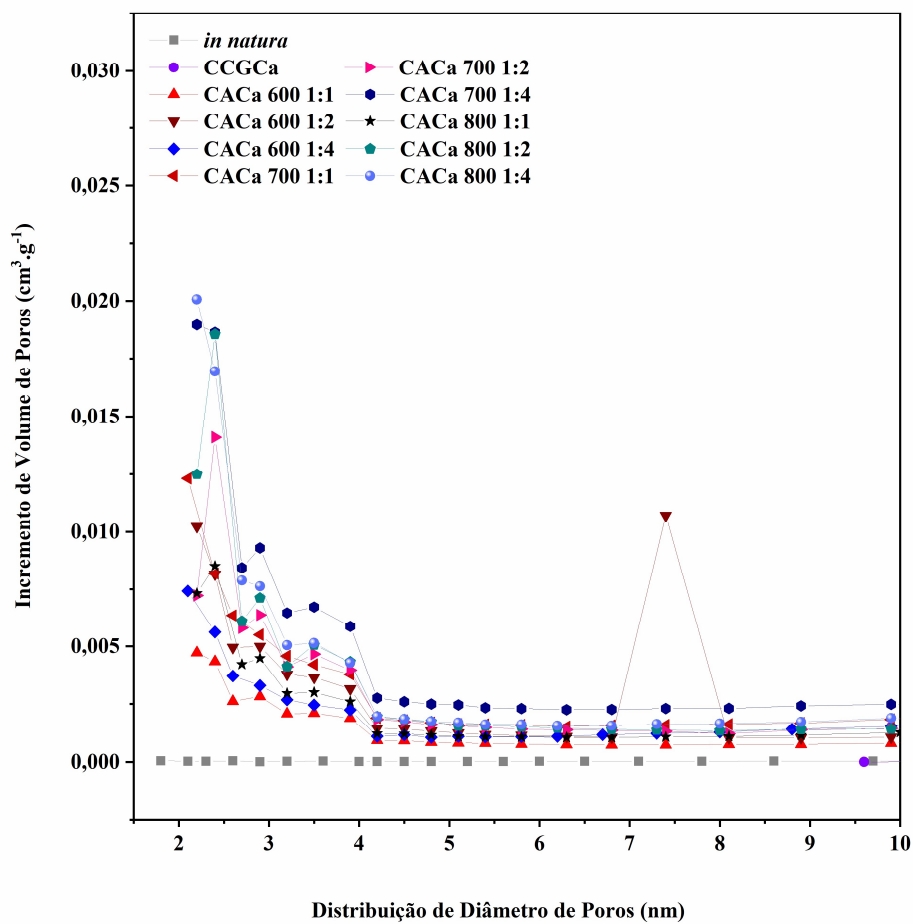
O perfil predominante de distribuição de poros pôde ser identificado entre os diâmetros de 2 e 3 nm. Esse dado é uma informação extraída dos resultados provenientes do ASAP que leva em consideração o diâmetro médio dos poros presentes na superfície dos materiais adsorventes analisados, de acordo com a Equação 11. O perfil de distribuição de poros observado no gráfico apresentado na Figura 15 indica que há uma concentração de macroporos e mesoporos na superfície dos carvões ativados e, ao ampliar a região do gráfico entre 1 e 10 nm, como apresentado na Figura 16, é possível identificar que há a presença significativa de microporos na superfície dos materiais. Ao considerar a presença de diferentes poros na estrutura porosa dos carvões, quando calculado o diâmetro médio de poro, o resultado indica que o diâmetro médio de poros é entre 2 e 3 nm para todas as amostras avaliadas. A partir disso, e de acordo com a classificação da IUPAC (Tabela 3), é possível classificar que os materiais apresentam uma estrutura porosa mesoporosa ($\geq 2 \leq 50 \text{ nm}$). Ao comparar as amostras de carvão ativado com o material precursor, é perceptível o desenvolvimento da estrutura porosa e a diminuição do diâmetro dos poros presentes na estrutura dos adsorventes.

Figura 15. Distribuição e diâmetro de poros dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café.



FONTE: Do autor, 2024.

Figura 16. Perfil predominante de diâmetro de mesoporos (ampliação da Figura 15 para a região entre 1 e 10 nm) dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café.



FONTE: Do autor, 2024.

5.2.2.2 Propriedades texturais dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol

Na Tabela 13 são apresentados os resultados parciais referentes à área superficial aparente (BET), área superficial externa, volume de microporos, volume total de poros e diâmetro médio de poro para as amostras de carvão ativado produzidas a partir das cascas de grãos de girassol.

Tabela 13. Área superficial aparente (BET), área superficial externa, volume de microporos, volume total de poros e diâmetro médio de poro para os carvões ativados de cascas de grãos de girassol.

Amostras	S_{BET}^a ($m^2 \cdot g^{-1}$)	S_{EXT}^b ($m^2 \cdot g^{-1}$)	$V_{p(mic)}^c$ ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	$V_{p(total)}^d$ ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	d_p^e (nm)
CGGi*	0,4818	0,7871	-	0,0031	26,15
CCGGi**	0,3602	-	0,0008	0,0089	99,24
CAGi 600°C – 1:1	305,93	48,92	0,1414	0,1904	2,49
CAGi 600°C – 1:2	649,41	99,23	0,3022	0,3807	2,34
CAGi 600°C – 1:4	391,78	80,21	0,1721	0,2620	2,64
CAGi 700°C – 1:1	409,18	67,99	0,1879	0,2611	2,55
CAGi 700°C – 1:2	790,40	116,64	0,3765	0,4768	2,41
CAGi 700°C – 1:4	1326,54	407,76	0,5324	0,7947	2,34
CAGi 800°C – 1:1	622,13	129,96	0,2759	0,4145	2,65
CAGi 800°C – 1:2	1030,00	172,41	0,4832	0,6327	2,46
CAGi 800°C – 1:4	962,52	234,19	0,4181	0,5818	2,42

^aÁrea superficial aparente (BET); ^bÁrea superficial externa; ^cVolume de microporos; ^dVolume total de poros; ^eDiâmetro de poro.

*Cascas de Grãos de Girassol (60 mesh)

**Carvão Cascas de Grãos de Girassol

FONTE: Do autor, 2024.

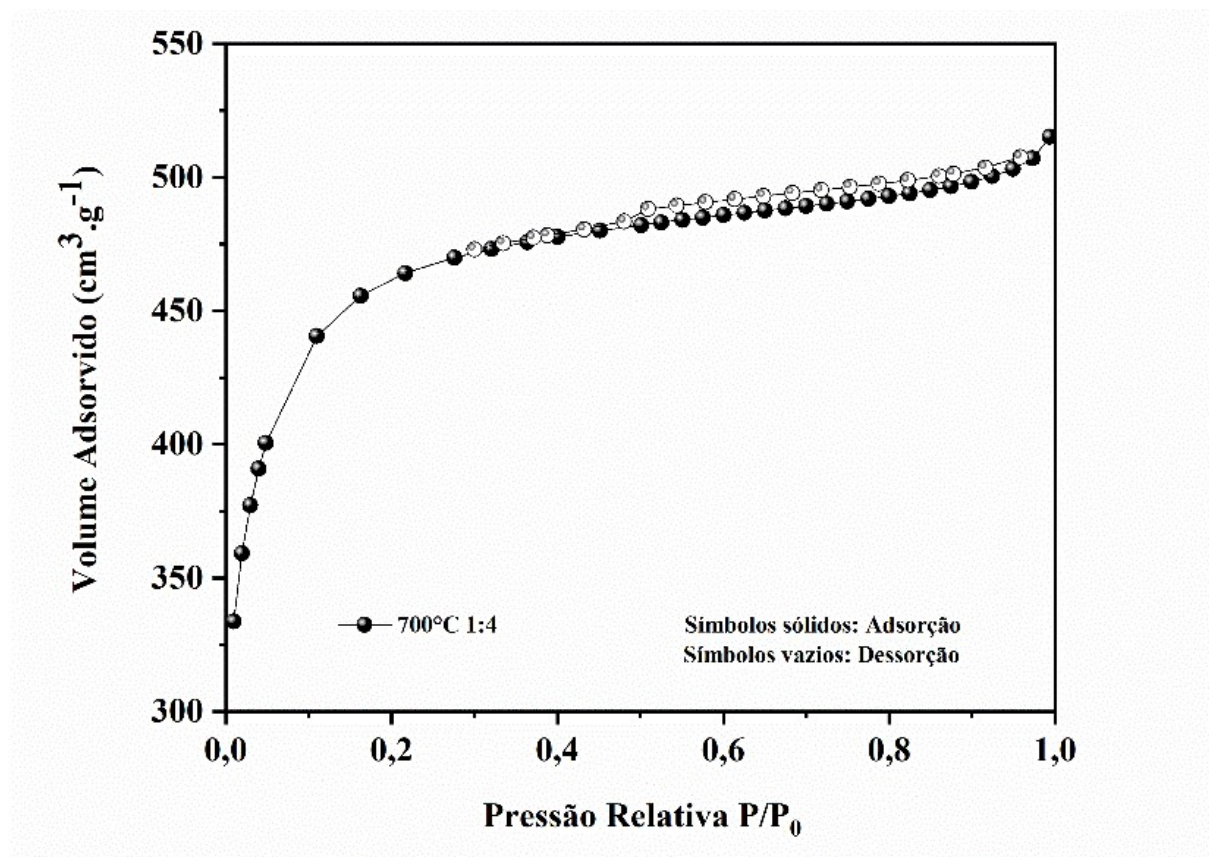
Ao avaliar os resultados referentes às amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol, assim como para as produzidas a partir de cascas de grãos de café, é possível observar que com o aumento da temperatura ocorre um aumento da área superficial aparente dos materiais. Isso ocorre devido ao fato de que o aumento da temperatura de ativação,

até uma determinada faixa de temperatura, promove o desenvolvimento da estrutura porosa dos materiais. Os carvões ativados à 800°C apresentam maiores valores de área superficial quando comparados com os produzidos à 600 e 700°C, exceto para a amostra CAGi 700°C – 1:4 que apresentou o maior valor de área superficial aparente de 1326,54 m².g⁻¹. Além disso, também foram identificadas variações nos resultados de área superficial aparente quando a razão de impregnação é alterada em uma mesma temperatura de ativação.

Ao comparar o melhor resultado de área superficial aparente para a amostra de carvão ativado produzida a partir de cascas de grãos de café e a produzida a partir de cascas de grãos de girassol, a amostra CAGi 700°C – 1:4 apresentou resultados superiores quando comparada com a amostra CACa 700°C – 1:4, sendo 1326,54 m².g⁻¹ e 1306,97 m².g⁻¹, respectivamente. As características químicas estruturais das biomassas residuais utilizadas para a produção das amostras de carvão ativado elucidam os resultados observados. As cascas de grãos de girassol apresentaram maior teor de alfa-celulose em sua composição, característica que influencia o material adsorvente produzido, uma vez que altos teores de alfa-celulose tendem a gerar carvões com grande área superficial devido ao processo de decomposição térmica desses componentes estruturais.

A Figura 17 apresenta a isoterma de adsorção-dessorção de gás nitrogênio obtida para a amostra de carvão ativado CAGi 700°C – 1:4, que apresentou os melhores resultados. As isotermas BET de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para as demais amostras de carvão ativado analisadas são apresentadas no Apêndice A. A partir da isoterma de adsorção-dessorção de BET da amostra CAGi 700°C – 1:4, quando comparada com a classificação proposta pela IUPAC (Figura 10), foi possível concluir que a curva obtida experimentalmente é similar à curva isoterma tipo II para um sistema de adsorção gás-sólido. Os sistemas gás-sólido avaliados pertencentes a essa classificação podem ser descritos como processos reversíveis e indicam que a adsorção ocorre predominantemente em mesoporos.

Figura 17. Isoterma de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 700°C – 1:4.



FONTE: Do autor, 2024.

As curvas obtidas para avaliação da distribuição de diâmetro dos poros são apresentadas na Figura 18. A partir do gráfico e dos dados organizados na Tabela 11, assim como para as amostras produzidas a partir de cascas de grãos de café, é possível identificar um aumento do volume total de poros de acordo com o aumento da temperatura de ativação empregada e o desenvolvimento de um menor volume de microporos, quando comparado com o volume total, mas que apresenta uma tendência de aumento quando são empregadas maiores temperaturas de ativação e razões de impregnação. Isso indica que o processo de ativação empregado promoveu o desenvolvimento da estrutura porosa dos carvões, sendo a amostra de carvão CAGi 700°C – 1:4 a que apresentou maior volume total de poros ($0,7947 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$), volume de microporos ($0,5324 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$) e diâmetro de poro igual a 2,34 nm.

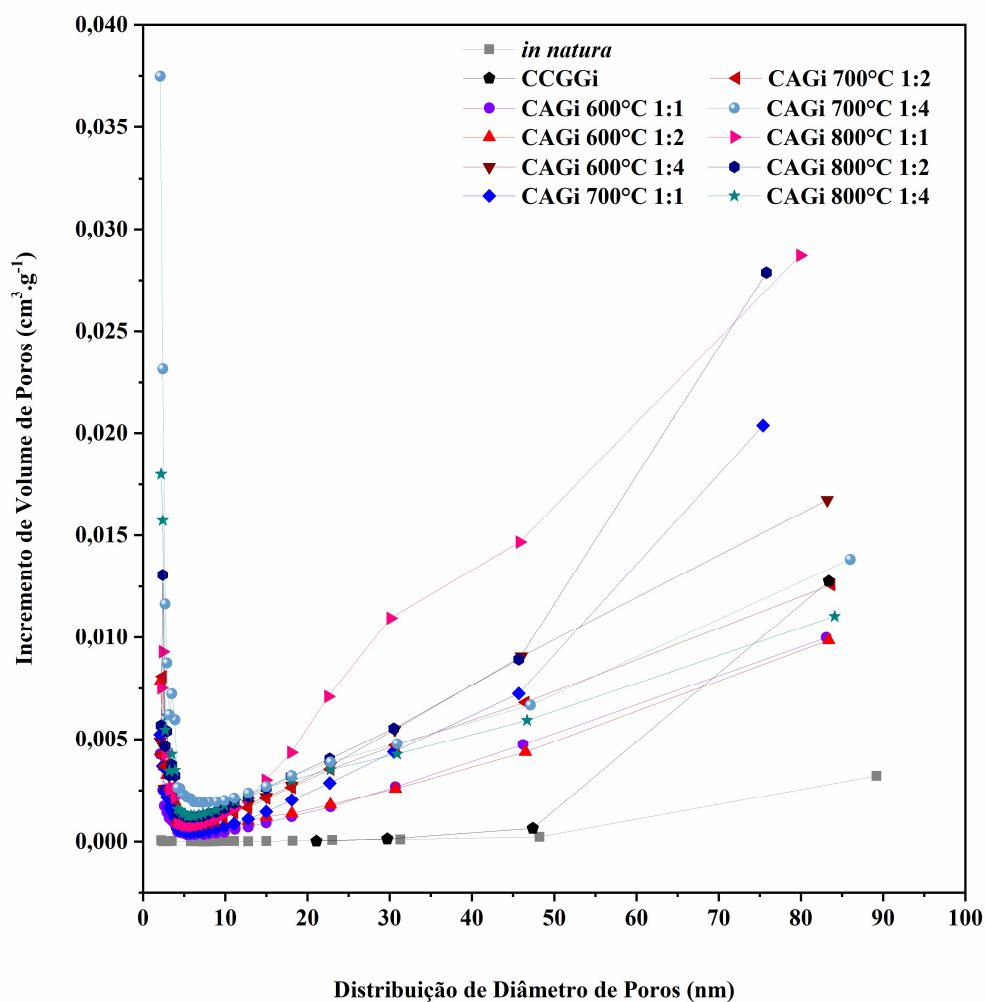
Ao comparar as duas amostras de carvão ativado que apresentaram os melhores resultados, a amostra CAGi 700°C – 1:4 apresentou maior volume total de poros e menor volume de microporos quando comparada com a amostra CACa 700°C – 1:4. As propriedades das biomassas residuais influenciam o desenvolvimento das características dos adsorventes produzidos, e o teor de voláteis está relacionado com o desenvolvimento da estrutura porosa

dos carvões ativados. O processo de volatilização de componentes da estrutura química dos materiais precursores promove a formação de diferentes poros na superfície do material, assim como o processo de tratamento termoquímico durante a produção do carvão ativado.

Dentre as biomassas estudadas, as cascas de grãos de café apresentaram maior teor de voláteis em sua composição o que, conseqüentemente, incrementa o desenvolvimento de poros na superfície dos materiais. Além disso, os valores referentes ao volume total de poros são referentes ao conjunto de macroporos, mesoporos e microporos presentes na estrutura porosa dos materiais. Com isso, uma estrutura porosa pode apresentar menor volume de microporos, mas apresentar um maior volume total de poros e, também, maior valor de área superficial que além do volume de microporos presentes na estrutura e, de acordo com a Equação 10, é uma medida que também leva em consideração a capacidade teórica de saturação da primeira camada de adsorvato formada na superfície do material adsorvente que está relacionada com os sítios ativos presentes na superfície dos adsorventes.

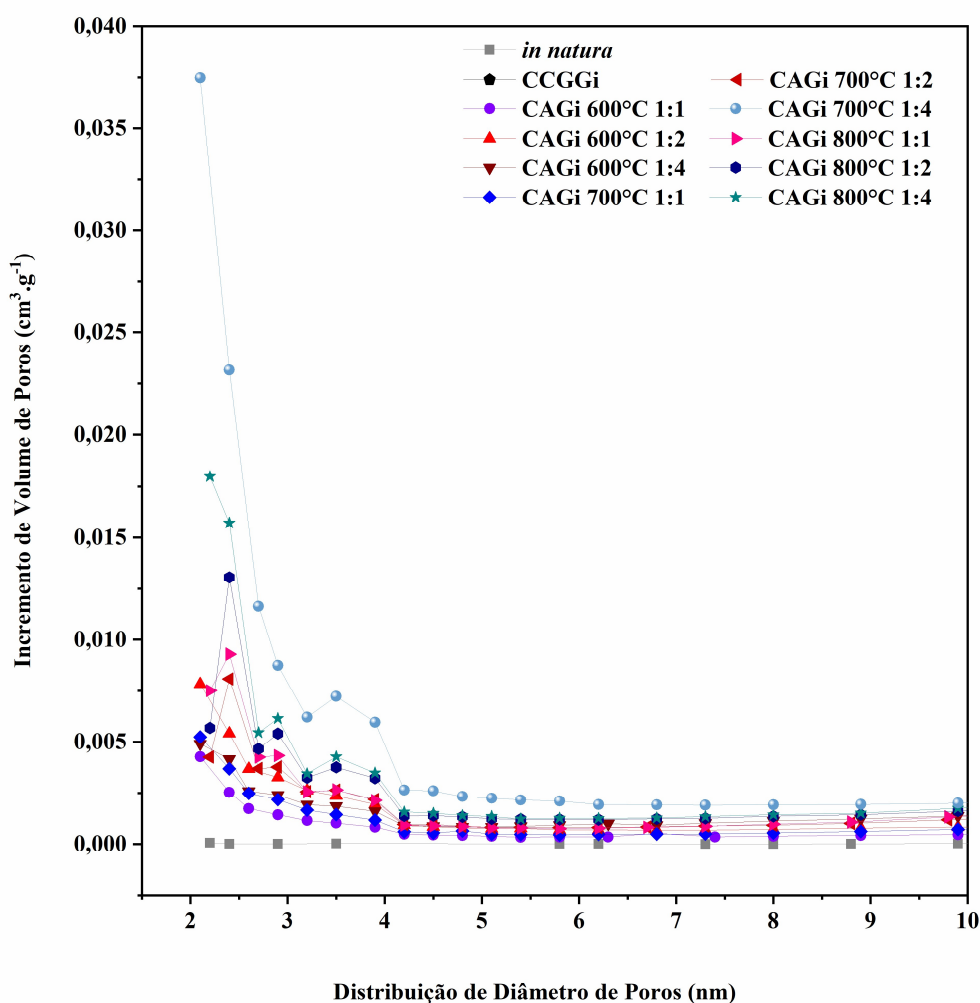
O perfil predominante de distribuição de poros também pôde ser identificado entre os diâmetros de 2 e 3 nm. Esse dado é uma informação extraída dos resultados provenientes do ASAP que leva em consideração o diâmetro médio dos poros presentes na superfície dos materiais adsorventes analisados, de acordo com a Equação 11. O perfil de distribuição de poros observado no gráfico apresentado na Figura 18 indica a presença de macroporos e mesoporos na superfície dos carvões ativados e, ao ampliar a região do gráfico entre 1 e 10 nm, como apresentado na Figura 19, é possível identificar a presença significativa de microporos na superfície dos materiais. Assim como avaliado para os carvões ativados preparados a partir de cascas de grãos de café, o resultado indica que o diâmetro médio de poros é entre 2 e 3 nm para todas as amostras avaliadas. A partir disso, e de acordo com a classificação da IUPAC (Tabela 3), é possível classificar que os materiais apresentam uma estrutura porosa mesoporosa ($\geq 2 \leq 50$ nm). Ao comparar as amostras de carvão ativado com o material precursor, é perceptível o desenvolvimento da estrutura porosa e a diminuição do diâmetro dos poros presentes na estrutura dos adsorventes.

Figura 18. Distribuição e diâmetro de poros dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol.



FONTE: Do autor, 2024.

Figura 19. Perfil predominante de diâmetro de mesoporos (ampliação da Figura 18 para a região entre 1 e 10 nm) dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol.



Fonte: Do autor, 2024.

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com outros trabalhos presentes na literatura, foi possível identificar que os carvões ativados preparados apresentaram características texturais intermediárias com altos valores de área superficial e volume total de poros. Isso indica que as biomassas avaliadas e o processo de produção de carvão ativado adotado possibilitou a obtenção de materiais adsorventes com boas características e propriedades de superfície e estrutura porosa. A Tabela 14 reúne e compara resultados obtidos em trabalhos que discutem a produção de carvão ativado a partir de biomassas residuais provenientes do cultivo de grãos de café e de grãos de girassol.

Tabela 14. Comparação entre os resultados obtidos para as análises texturais dos carvões preparados a partir de cascas de grãos de girassol e trabalhos presentes na literatura.

Biomassas	Agente Ativador	S_{BET} ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$V_{\text{p}(\text{total})}$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	Referências
Cascas Grãos de Café	KOH	1306,97	0,7875	(Este trabalho)
Cascas Grãos de Girassol	KOH	1326,54	0,7947	(Este trabalho)
Cascas Grãos de Café	KOH	1865	0,960	(Laksaci, et al., 2017)
Cascas Grãos de Café	KOH	743,8	0,448	(Tran et al., 2021)
Cascas Grãos de Café	H_3PO_4	1030	0,547	(Naganathan et al., 2021)
Cascas Grãos de Café	H_3PO_4	547,35	0,390	(Sarkar et al., 2019)
Cascas Grãos de Café	KOH	2275	0,890	(Ramirez et al., 2020)
Cascas Grãos de Girassol	KOH	477,79	0,3346	(Islam et al., 2023)
Grãos de Girassol	H_3PO_4	893,70	0,612	(Lima et al., 2022)
Sementes de Girassol	H_3PO_4	1402,00	1,71	(Daza et al., 2021)
Cascas Grãos de Girassol	KOH	2139,00	0,96	(Bahiraei e Behin, 2021)
Cascas Grãos de Girassol	KOH	1366,00	0,694	(Kaminska et al., 2021)

FONTE: Do autor, 2024.

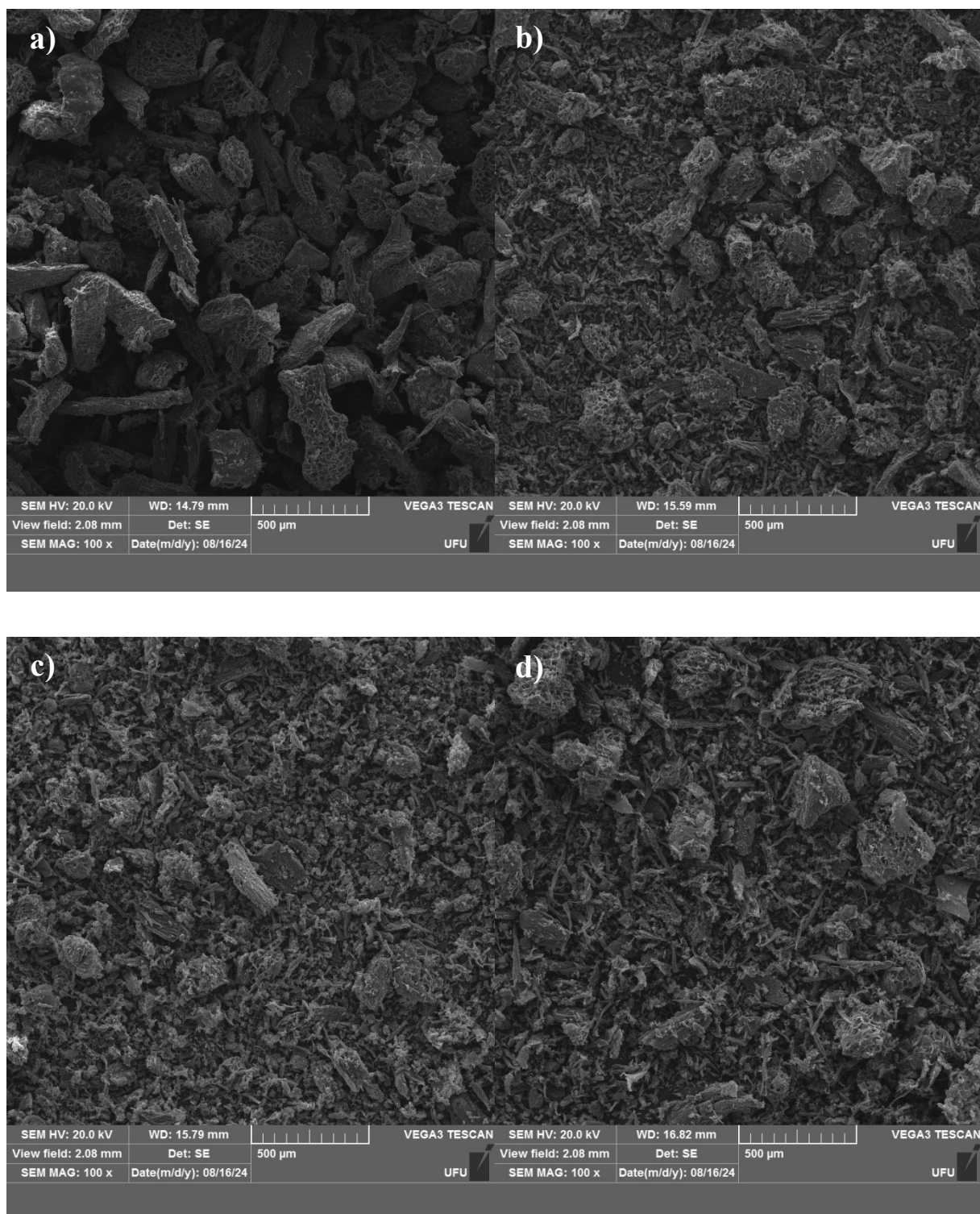
5.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras de carvão preparadas a partir das biomassas lignocelulósicas estudadas neste trabalho, e as amostras de carvão ativado que apresentaram o maior valor de área superficial em cada faixa de temperatura (600°C, 700°C e 800°C) para as duas biomassas estudadas, foram avaliadas a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura em um equipamento acoplado a um sistema que permite a realização da microanálise química dos materiais por espectroscopia por energia dispersiva de raios X. As micrografias das demais amostras analisadas são apresentadas no Apêndice B.

5.2.5.1 Micrografias dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café

As micrografias apresentadas na Figura 20, são referentes às amostras CCGCa, CACa 600°C – 1:2, CACa 700°C – 1:4 e CACa 800°C – 1:2 com magnitude de 100 x e ampliação de 500 µm. As micrografias obtidas nesta ampliação não apresentaram diferenças morfológicas significativas, porém, foi possível observar que as partículas das amostras de carvão ativado são menores do que as referentes à amostra CCGCa. Essa característica se deve ao fato de os carvões previamente preparados serem submetidos ao processo de ativação, que promove o desenvolvimento da estrutura porosa e a volatilização de possíveis compostos ainda presentes na estrutura do material. Com isso, as partículas dos adsorventes produzidos apresentam menor tamanho quando comparadas com o carvão de origem.

Figura 20. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café com magnitude de 100 e ampliação de 500 μm .



Fonte: Do autor, 2024.

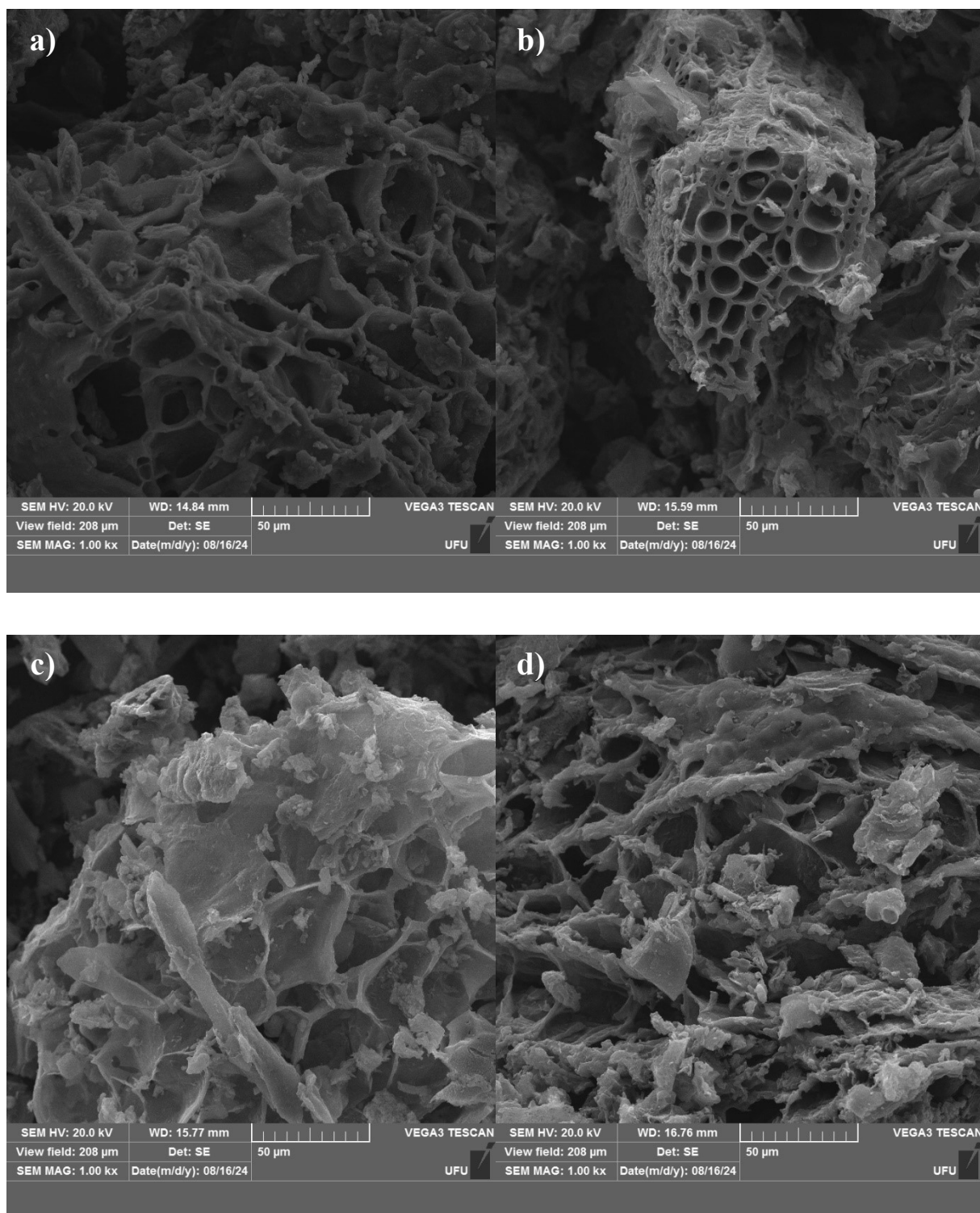
Nota: a) CCGCa; b) CACa 600°C – 1:2; c) CACa 700°C – 1:4; d) CACa 800°C – 1:2.

As Figuras 21, 22 e 23, referentes às micrografias das amostras CCGCa, CACa 600°C – 1:12, CACa 700°C – 1:4 e CACa 800°C – 1:2, apresentam os resultados quando empregadas magnitude de 1000 x e ampliação de 50 μm , magnitude de 10000 x e ampliação de 5 μm e magnitude de 20000 x e ampliação de 2 μm , respectivamente. Ao avaliar a morfologia dos materiais adsorventes produzidos, após a ativação do material precursor, foi possível identificar que as amostras ativadas apresentaram poros na superfície.

A amostra de carvão sem ativação, CCGCa, apresentou uma superfície composta por regiões recobertas por micro cristais (Figuras 22(a) e 23(a)), característica comum dos materiais lignocelulósicos devido a presença de substâncias inorgânicas provenientes do material precursor (SANTOS, 2022). As amostras de carvão ativado apresentaram morfologia com a presença de uma estrutura conhecida como favo de mel (BRAZIL, 2022), porém, a amostra CACa 600°C – 1:2, (Figura 21(b)), possui uma estrutura com a presença de poros mais definidos e paredes com maior espessura que as demais amostras e, além disso, a superfície observada indicou a presença de poros com diâmetros maiores (Figura 22(b)).

A amostra CACa 700°C – 1:4, quando comparada com as demais amostras, apresentou em sua superfície a presença predominante de microporos e mesoporos (Figuras 22(c) e 23(c)), sendo possível observar que a superfície do material apresentou maior homogeneidade entre os poros presentes que as demais amostras quando avaliadas as ampliações de 5 μm (Figura 22) e 2 μm (Figura 23). A amostra CACa 800°C – 1:2, apresentou uma estrutura porosa pouco ordenada (Figura 21(d)), e quando comparada com a amostra CACa 700°C – 1:4, é possível observar a presença de poros com diâmetro maior na superfície da amostra CACa 800°C – 1:2 (Figura 23(d)), com o aumento da temperatura a parede dos poros previamente desenvolvidos colapsa dando origem a poros com diâmetros maiores e, conseqüentemente, influenciando os resultados de área superficial conforme observado na análise textural.

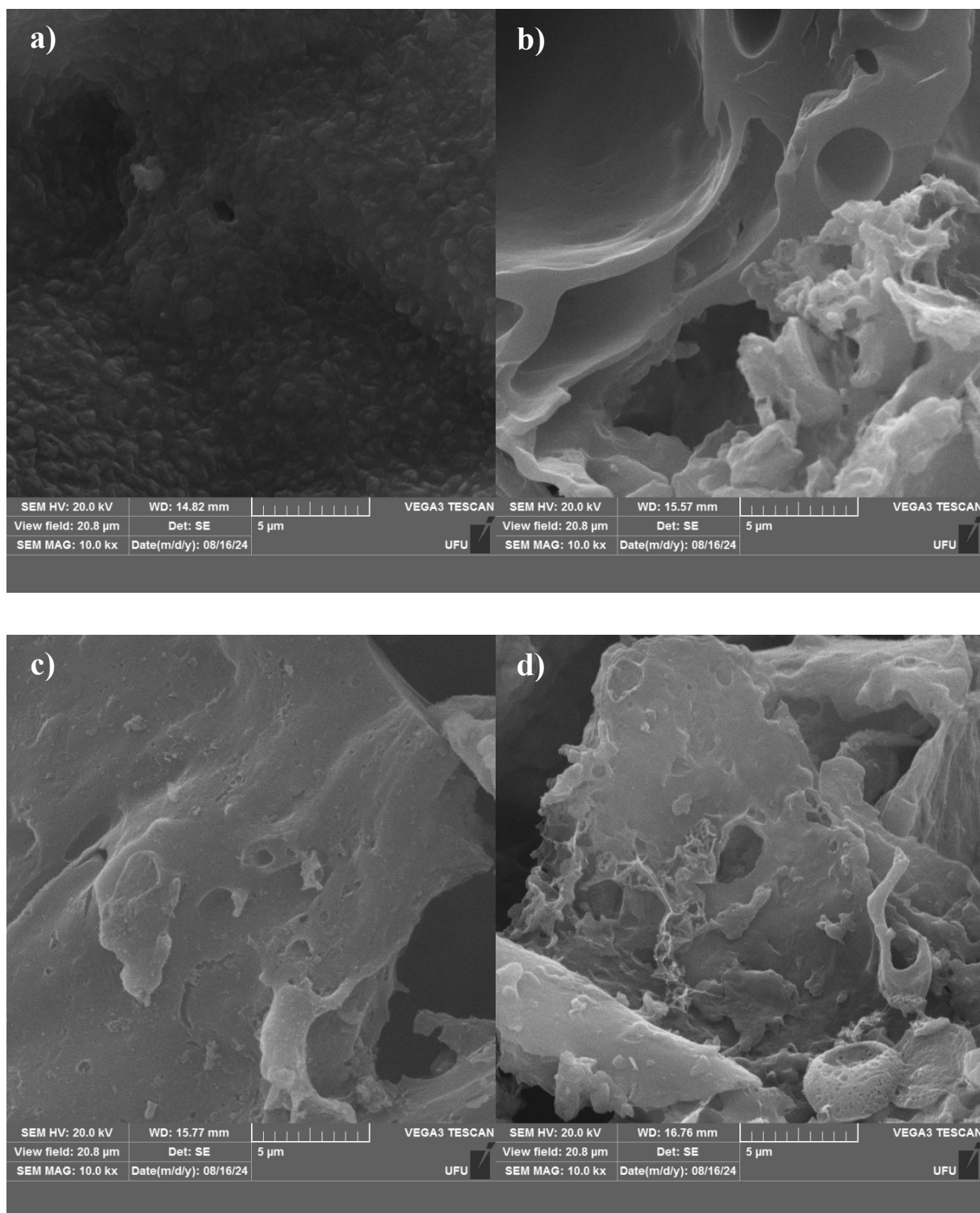
Figura 21. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café com magnitude de 1000 x e ampliação de 50 μm .



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) CCGCa; b) CACa 600°C – 1:2; c) CACa 700°C – 1:4; d) CACa 800°C – 1:2.

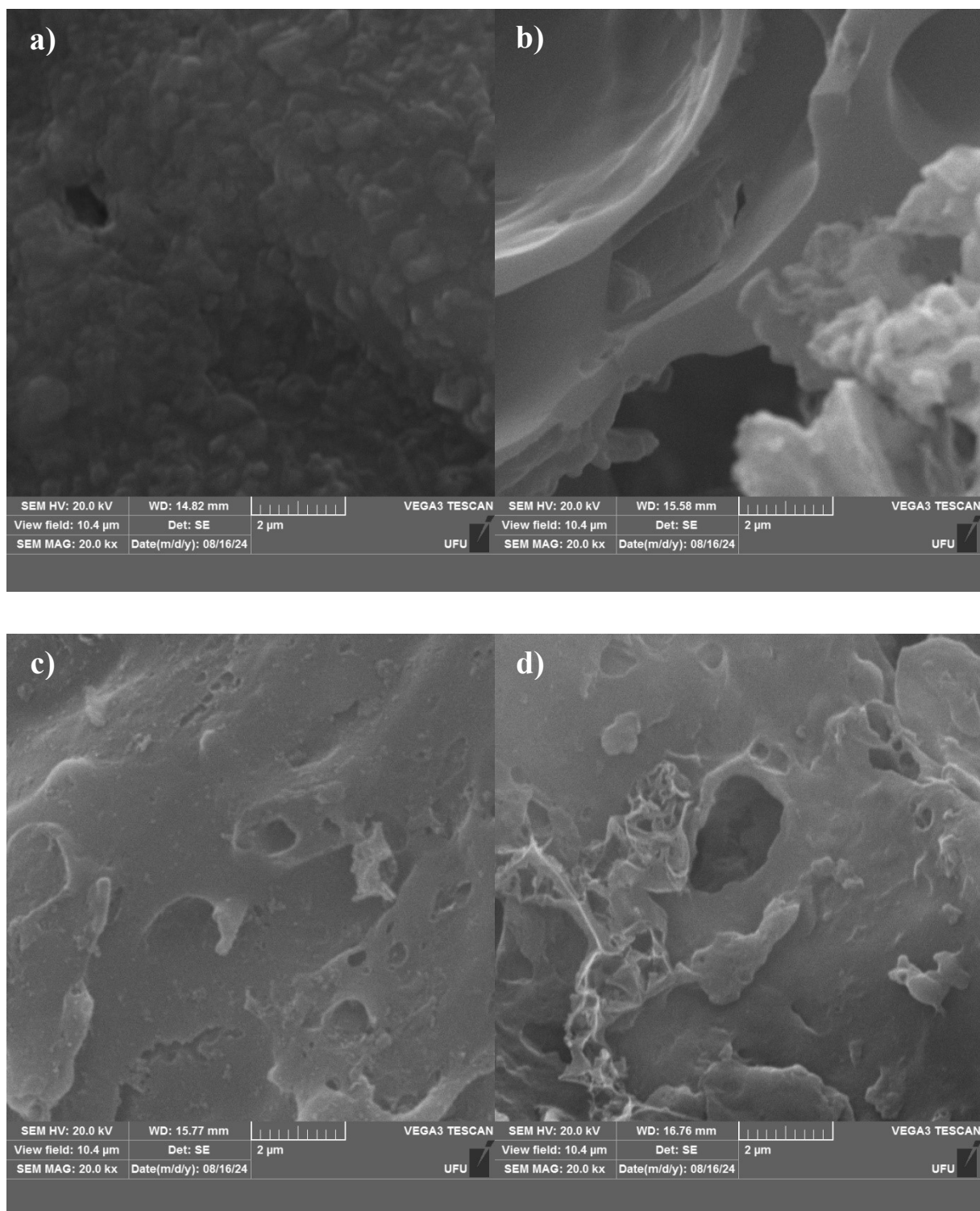
Figura 22. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café com magnitude de 10000 x e ampliação de 5 μm .



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) CCGCa; b) CACa 600°C – 1:2; c) CACa 700°C – 1:4; d) CACa 800°C – 1:2.

Figura 23. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de café com magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm .



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) CCGCa; b) CACa 600°C – 1:2; c) CACa 700°C – 1:4; d) CACa 800°C – 1:2.

A análise de EDS, realizada em equipamento acoplado ao microscópio eletrônico de varredura, permitiu a identificação dos possíveis elementos químicos presentes nas amostras estudadas. Devido ao princípio da técnica alguns elementos, como hidrogênio (H) e hélio (He), por exemplo, não são possíveis de serem quantificados a partir da análise de EDS, porém, os resultados obtidos a respeito de outros elementos fornecem informações importantes para a caracterização dos materiais produzidos (SOUSA, 2019). Na Tabela 15 foram organizados os dados de composição química das amostras de carvão preparado e dos adsorventes produzidos que apresentaram maior valor de área superficial em cada faixa de temperatura. A composição química em porcentagem mássica das demais amostras avaliadas são apresentadas no Apêndice C.

Tabela 15. Elementos químicos presentes nas amostras de carvão proveniente de cascas de grãos de café e nas amostras CACa 600°C – 1:2, CACa 700°C – 1:4 e CACa 800°C – 1:2.

Amostras	Composição Química (% em massa)								
	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
CCGCa*	57,64 (±0,18)	24,98 (±0,18)	0,37 (±0,01)	0,18 (±0,01)	0,10 (±0,01)	0,24 (±0,01)	14,43 (±0,06)	1,23 (±0,02)	0,14 (±0,02)
CACa 600°C – 1:2	76,37 (±0,18)	21,85 (±0,18)	0,21 (±0,01)	0,11 (±0,01)	0,06 (±0,01)	-	0,07 (±0,01)	0,95 (±0,01)	0,22 (±0,02)
CACa 700°C – 1:4	73,61 (±0,13)	21,73 (±0,13)	0,13 (±0,01)	1,16 (±0,01)	2,05 (±0,01)	-	0,76 (±0,01)	0,29 (±0,01)	0,14 (±0,01)
CACa 800°C – 1:2	88,92 (±0,11)	14,47 (±0,11)	0,06 (±0,01)	0,06 (±0,01)	0,05 (±0,01)	0,11 (±0,01)	0,10 (±0,01)	0,06 (±0,01)	0,08 (±0,01)

*CCGCa = Carvão Cascas Grãos de Café

Fonte: Do autor, 2024.

Ao avaliar os resultados obtidos destaca-se a presença majoritária de carbono e oxigênio na composição química de todos os materiais, sendo ainda observado que após a ativação do carvão produzido previamente, a porcentagem em massa de carbono aumenta enquanto a porcentagem de Cálcio (Ca), Potássio (K) e Magnésio (Mg), por exemplo, tendem a diminuir

com o processo de tratamento termoquímico para produção dos adsorventes. Esses elementos constituem uma parcela referente ao teor de cinzas dos materiais precursores que são formados durante o processo de carbonização e ativação.

A partir da composição química obtida na análise de EDS, é possível obter informações acerca da razão O/C_{org} dos carvões ativados preparados e avaliar a estabilidade dos adsorventes produzidos (LENG et al., 2019). A amostra de carvão ativado CACa 600°C – 1:2 apresentou razão O/C_{org} aproximadamente igual a 0,38; a amostra CACa 700°C – 1:4 de aproximadamente 0,39 e a amostra CACa 800°C – 1:2 de aproximadamente 0,22. Os valores obtidos para as razões molares de O/C_{org} para todas as amostras foram menores que 0,4 indicando, conforme a norma EBC, que os adsorventes produzidos apresentam alta estabilidade e baixos níveis de oxidação.

As Figuras 24, 25, 26 e 27 apresentam o gráfico *Sum Spectrum*, que reúne a visualização geral das imagens e fornece informações a respeito da composição química, das amostras CCGCa, CACa 600°C – 1:2, CACa 700°C – 1:4 e CACa 800°C – 1:2, respectivamente. Os gráficos *Sum Spectrum* para as demais amostras são apresentados no Apêndice C.

Figura 24. Gráfico EDS para a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh (CCGCa).

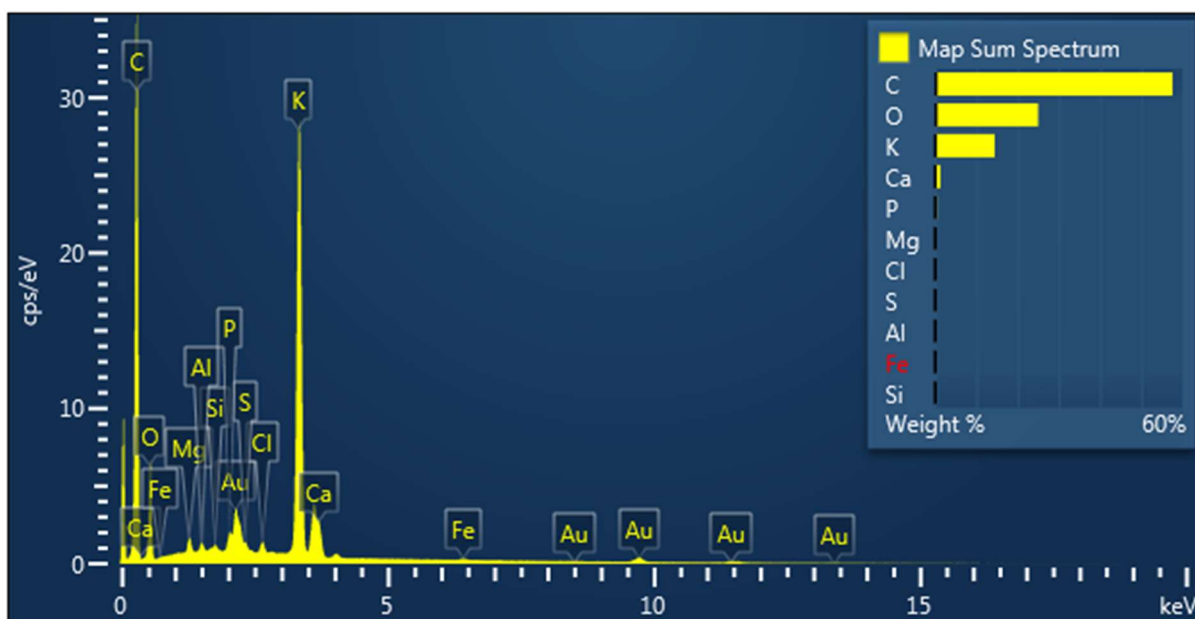
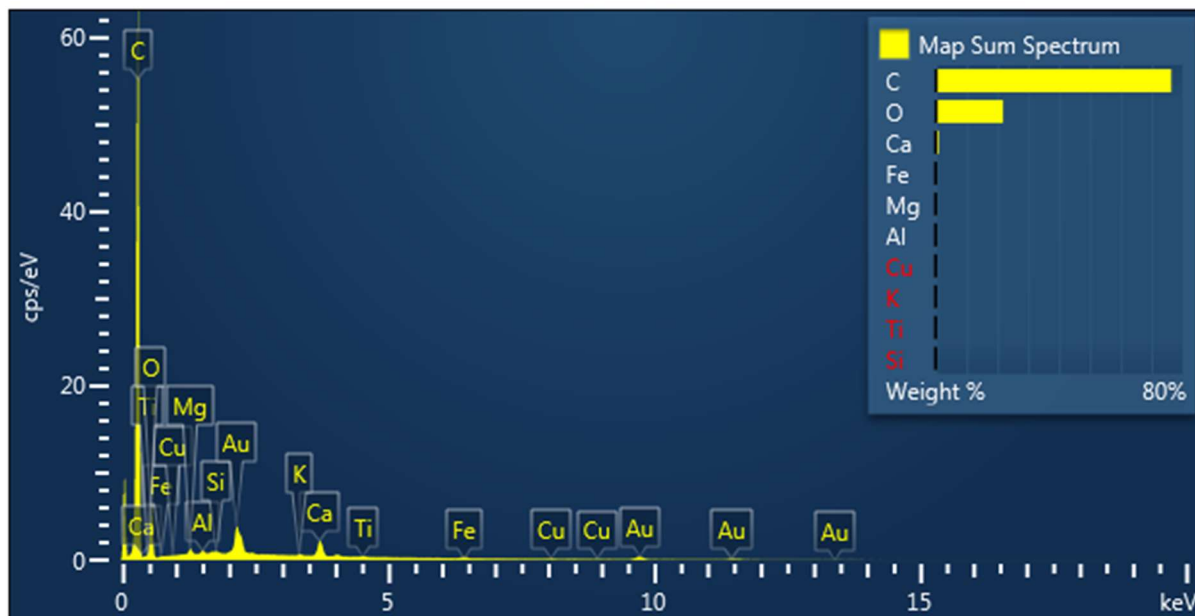
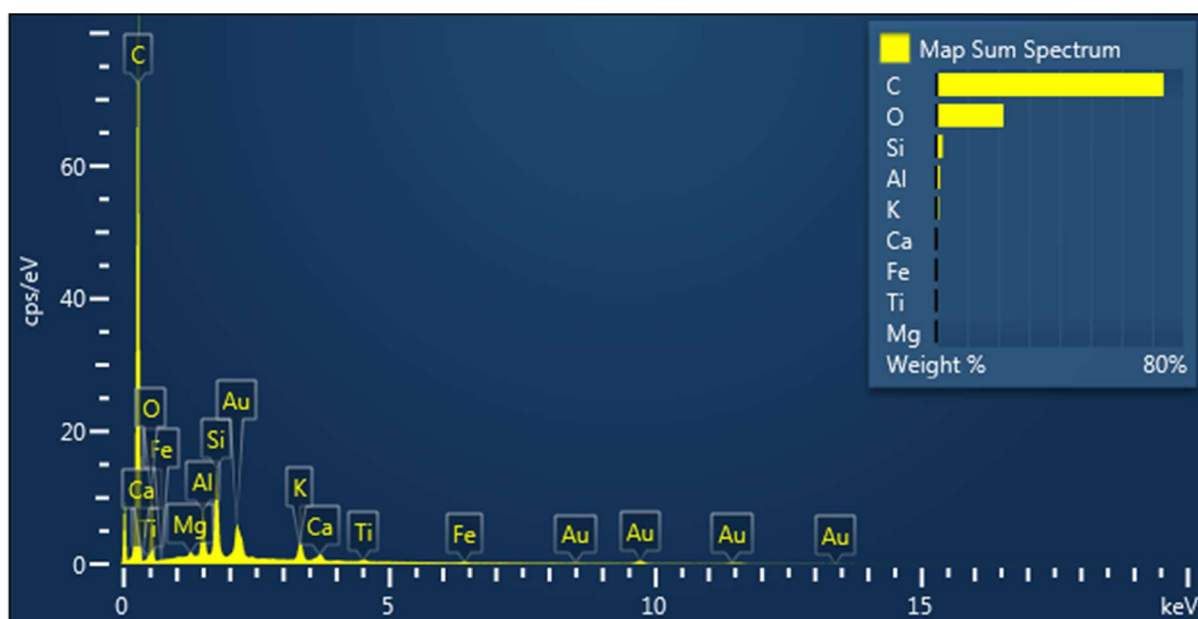


Figura 25. Gráfico EDS para a amostra CACa 600°C – 1:2.



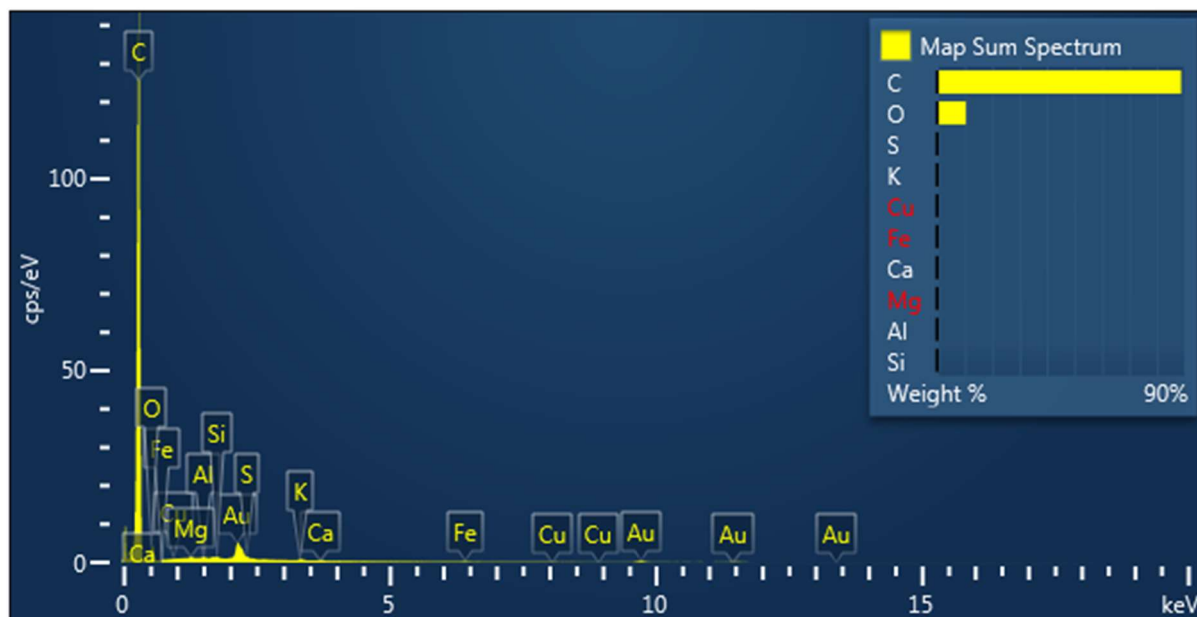
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 26. Gráfico EDS para a amostra CACa 700°C – 1:4.



Fonte: Do autor, 2024.

Figura 27. Gráfico EDS para a amostra CACa 800°C – 1:2.



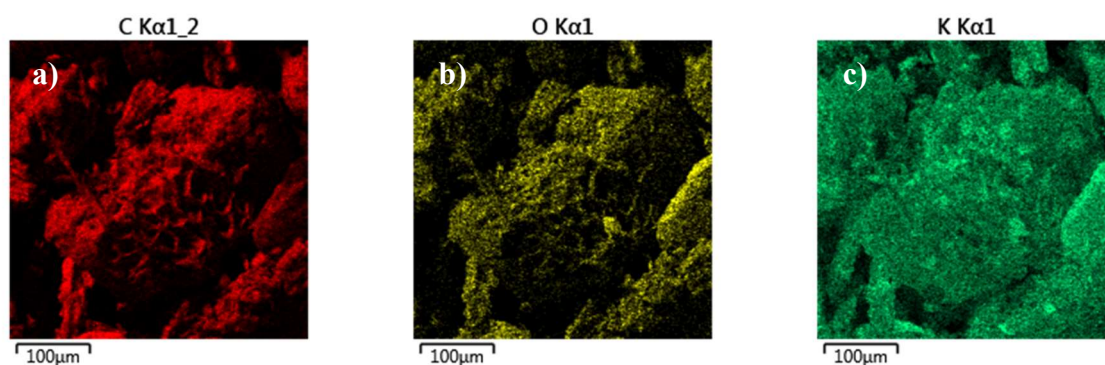
Fonte: Do autor, 2024.

Ao interpretar os gráficos de EDS obtidos para as amostras, é possível observar que a amostra de carvão sem ativação já apresenta em sua composição uma porcentagem alta de potássio (K). O potássio na forma de hidróxido foi empregado como agente ativador e após o processo de ativação, as amostras de carvão ativado foram submetidas a um processo de lavagem com ácido clorídrico ($\text{HCl} = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$), para remoção do excesso de agente ativador presente na superfície do material. A partir da análise de EDS é possível observar que a presença de potássio na composição química dos carvões ativados preparados é pequena ($< 1\%$), esse resultado é um indicativo de que o processo de lavagem dos carvões ativados foi eficaz.

O mapeamento por EDS das amostras também é um indicativo da presença dos elementos químicos presentes na composição das amostras avaliadas. Assim como os resultados organizados na Tabela 15, no mapeamento é possível observar a presença majoritária de carbono e oxigênio nas amostras e a tendência de aumento da presença desses elementos na composição das amostras de acordo com a realização dos processos de ativação dos materiais, bem como, da diminuição da presença de potássio na composição química dos materiais devido à realização da etapa de lavagem dos carvões ativados. Os mapeamentos por EDS das amostras CCGCa, CACa 600°C – 1:2, CACa 700°C – 1:4 e CACa 800°C – 1:2 são apresentados nas

Figuras 28, 29, 30 e 31, respectivamente, e ilustram a variação da presença de carbono, oxigênio e potássio. O mapeamento por EDS completo das amostras é apresentado no Apêndice C.

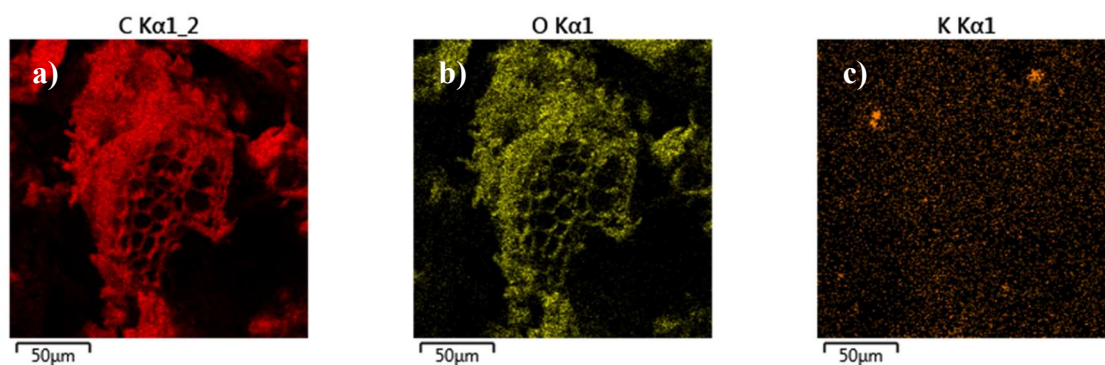
Figura 28. Mapeamento por EDS da amostra CCGCa.



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) Carbono; b) Oxigênio e c) Potássio.

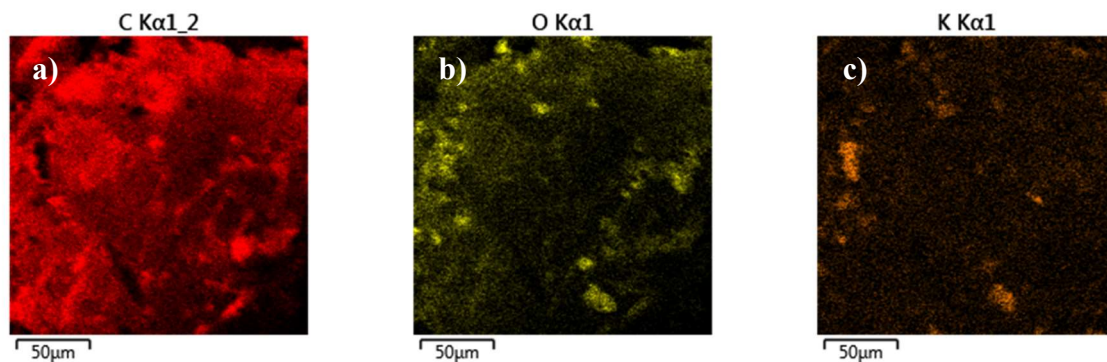
Figura 29. Mapeamento por EDS da amostra CACa 600°C – 1:2.



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) Carbono; b) Oxigênio e c) Potássio.

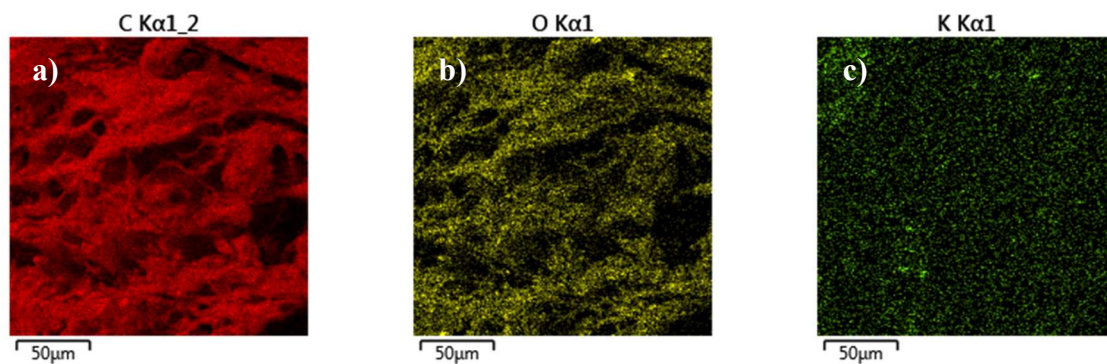
Figura 30. Mapeamento por EDS da amostra CACa 700°C – 1:4.



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) Carbono; b) Oxigênio e c) Potássio.

Figura 31. Mapeamento por EDS da amostra CACa 800°C – 1:2.



Fonte: Do autor, 2024.

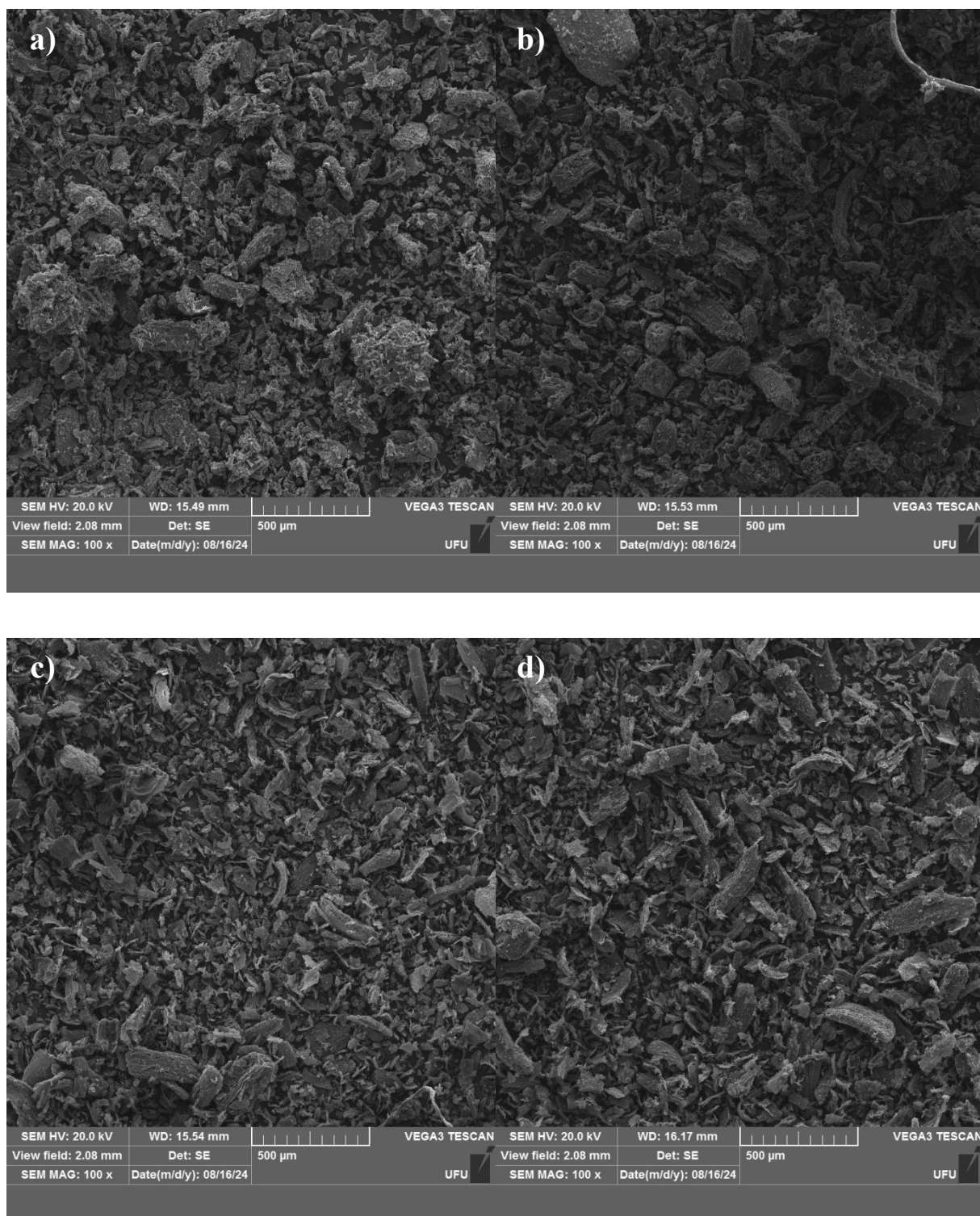
Nota: a) Carbono; b) Oxigênio e c) Potássio.

5.2.5.2 Micrografias dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol

De forma semelhante ao que foi realizado para as análises das amostras de carvões produzidos a partir de cascas de grãos de café, as amostras de carvão produzido a partir das cascas de grãos de girassol (CCGGi), e as amostras de carvão ativado que apresentaram o maior valor de área superficial em cada faixa de temperatura de ativação estudada (CAGi 600°C – 1:2; CAGi 700°C – 1:4 e CAGi 800°C – 1:2), foram caracterizadas morfológicamente a partir da análise de microscopia eletrônica de varredura com equipamento acoplado para obtenção das informações sobre a composição química percentual de cada amostra.

A Figura 32 apresenta as micrografias obtidas para as amostras CCGGi, CAGi 600°C – 1:2, CAGi 700°C – 1:4 e CAGi 800°C – 1:2 com magnitude de 100 e ampliação de 500 μm . Ao analisar os resultados obtidos, as amostras não apresentaram diferenças morfológicas e estruturais significativas, o que indica que o processo de carbonização prévia da biomassa foi efetivo para o estabelecimento de uma estrutura porosa inicial que, com a realização do processo de ativação, foi desenvolvida sem alteração significativa das partículas e que pode ser elucidada a partir das demais micrografias.

Figura 32. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol com magnitude de 100 e ampliação de 500 μm .



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) CCGGi; b) CAGi 600°C – 1:2; c) CAGi 700°C – 1:4; d) CAGi 800°C – 1:2.

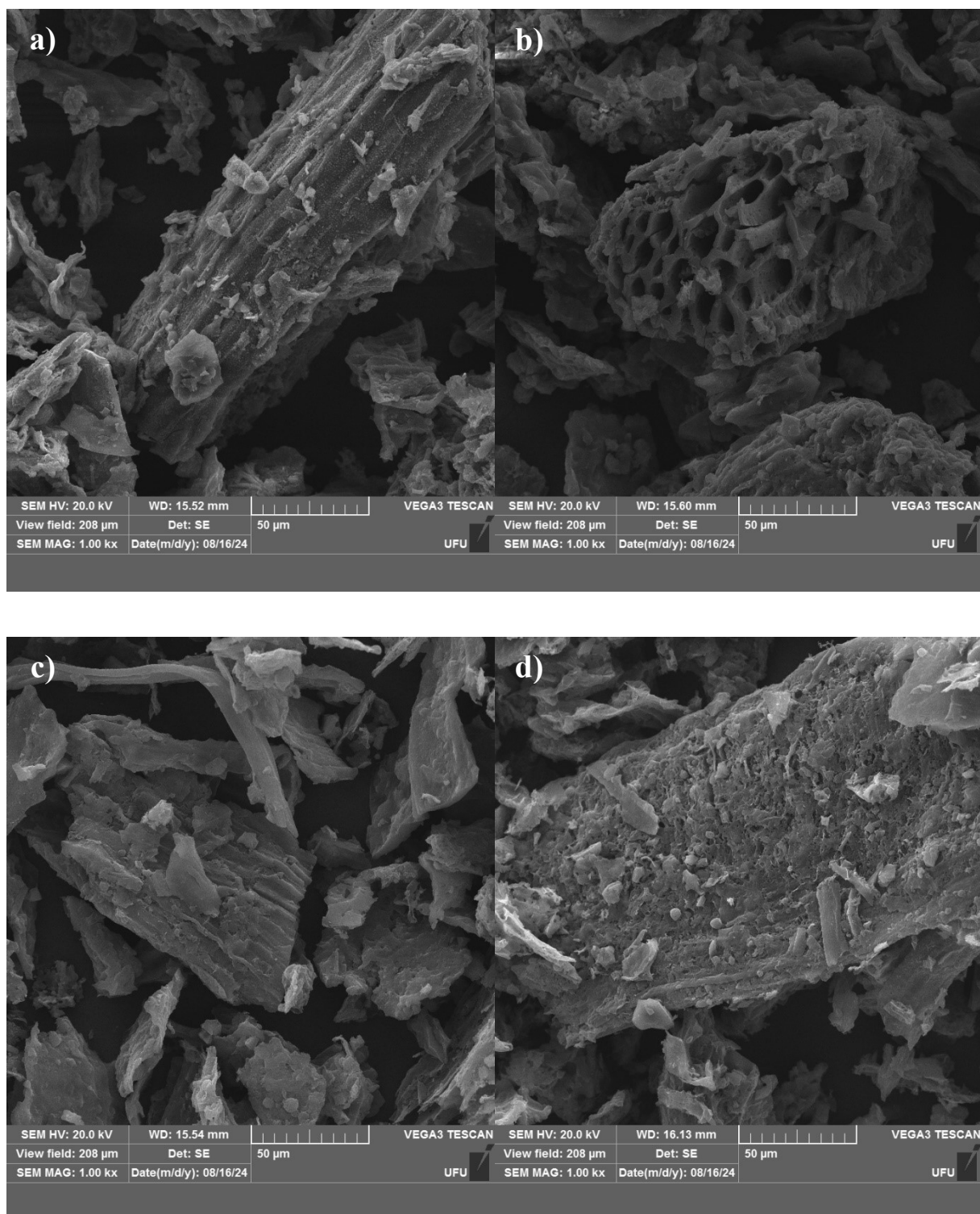
As Figuras 33, 34 e 35 apresentam as micrografias obtidas para as amostras CCGGi, CAGi 600°C – 1:2, CAGi 700°C – 1:4 e CAGi 800°C – 1:2 quando magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm , magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm , respectivamente. Ao analisar os resultados obtidos, as amostras não apresentaram diferenças morfológicas e estruturais significativas, o que indica que o processo de carbonização prévia da biomassa foi efetivo para o estabelecimento de uma estrutura porosa inicial que, com a realização do processo de ativação, foi desenvolvida sem alteração significativa das partículas.

A amostra CCGGi também apresentou uma superfície composta por regiões recobertas por micro cristais (Figuras 34(a) e 35(a)), característica comum proveniente da composição de materiais lignocelulósicos. Ao avaliar as micrografias referentes à amostra CAGi 600°C – 1:2 foi possível identificar a presença da estrutura favo de mel (Figura 33(b)), como para as amostras provenientes de cascas de grãos de café, e a presença de macroporos (Figuras 34(b) e 35(b)).

Para a amostra CAGi 700°C – 1:4, que apresentou o maior valor de área superficial dentre todas as preparadas neste trabalho, foi observada uma superfície menos irregular quando comparada com as demais amostras e predominantemente formada por mesoporos e microporos (Figura 34(c)). Além disso, a superfície da amostra apresentou alta rugosidade o que indica a presença de poros com diâmetros menores que não foram possíveis de serem observados durante a análise de microscopia eletrônica de varredura (Figura 35(c)) (SANTOS, 2022).

A amostra CAGi 800°C – 1:2 não apresentou rugosidade similar à observada para a amostra CAGi 700°C – 1:4. Destaca-se que para essa amostra, a superfície porosa é mais irregular sendo formada por cavidades que indicam o colapso das paredes dos poros previamente formados.

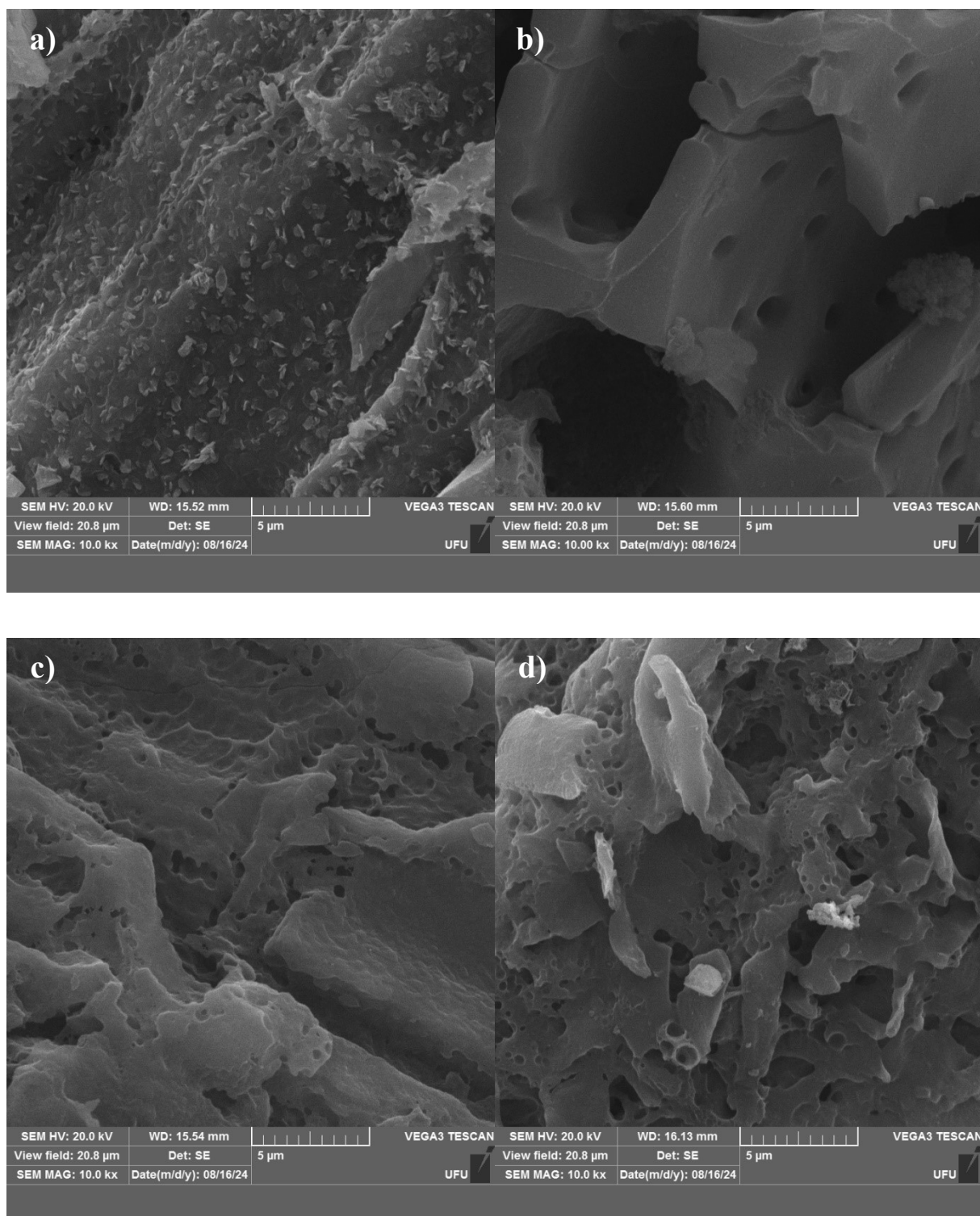
Figura 33. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol com magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm .



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) CCGGi; b) CAGi 600°C – 1:2; c) CAGi 700°C – 1:4; d) CAGi 800°C – 1:2.

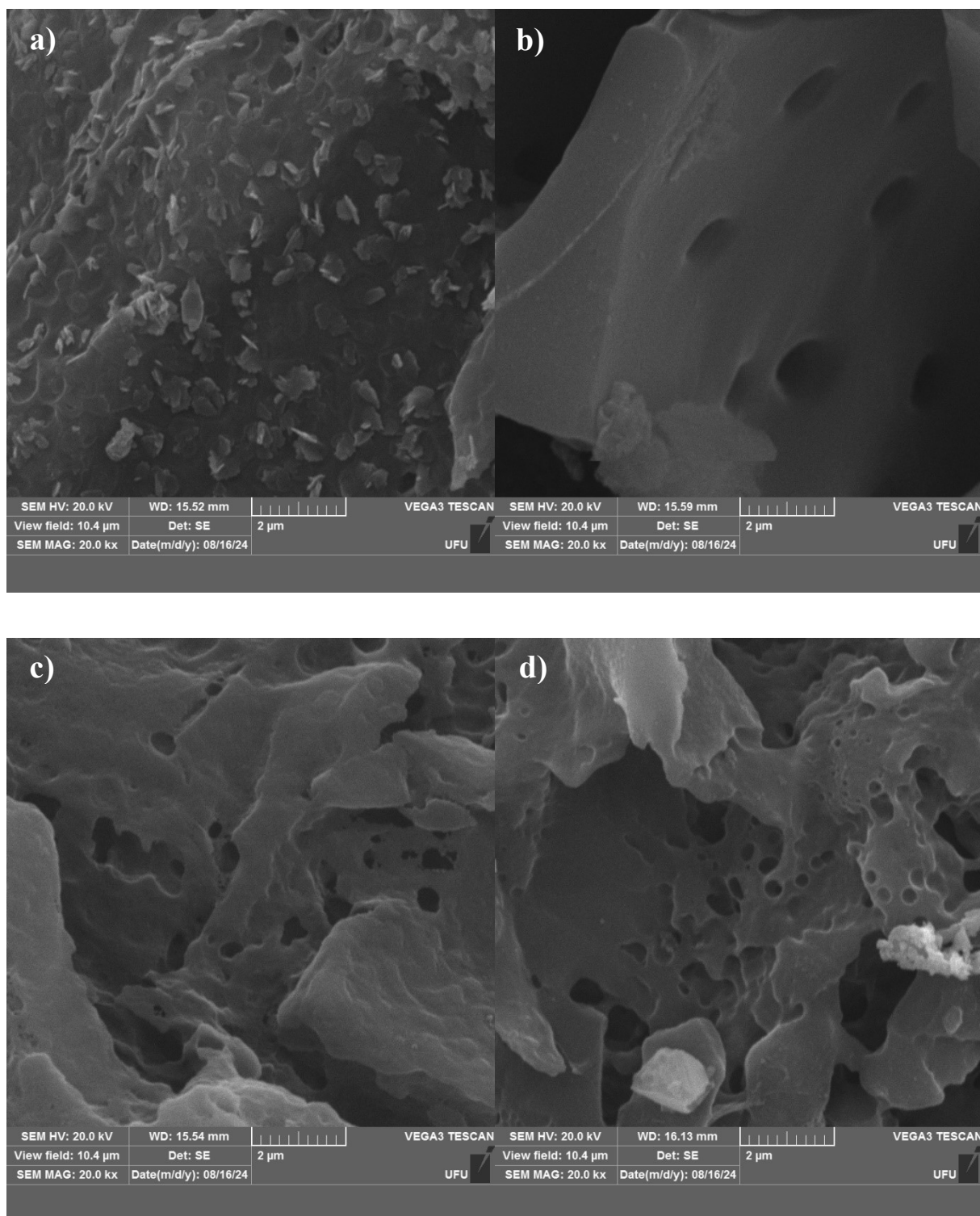
Figura 34. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol com magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm .



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) CCGGi; b) CAGi 600°C – 1:2; c) CAGi 700°C – 1:4; d) CAGi 800°C – 1:2.

Figura 35. Micrografias obtidas para as amostras de carvão ativado produzidas a partir de cascas de grãos de girassol com magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm .



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) CCGGi; b) CAGi 600°C – 1:2; c) CAGi 700°C – 1:4; d) CAGi 800°C – 1:2.

Na Tabela 16 foram organizados os dados de composição química das amostras do carvão previamente preparado e dos adsorventes produzidos que apresentaram maior valor de área superficial em cada faixa de temperatura. A composição química em porcentagem mássica das demais amostras avaliadas são apresentadas no Apêndice C.

Tabela 16. Elementos químicos presentes nas amostras de carvão proveniente de cascas de grãos de girassol e nas amostras CAGi 600°C – 1:2, CAGi 700°C – 1:4 e CAGi 800°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)									
Amostras	C	O	Mg	Al	K	Ca	Fe	Cu	Si
CCGGi*	72,33	20,81	0,66	0,05	4,29	0,73	0,07	0,09	-
	(±0,16)	(±0,15)	(±0,01)	(±0,01)	(±0,02)	(±0,01)	(±0,01)	(±0,02)	-
CAGi 600°C – 1:2	67,20	26,60	0,88	0,75	1,19	0,26	0,18	-	2,59
	(±0,19)	(±0,18)	(±0,01)	(±0,01)	(±0,01)	(±0,01)	(±0,02)	-	(±0,02)
CAGi 700°C – 1:4	86,49	12,89	0,25	0,05	-	-	0,04	0,11	0,09
	(±0,13)	(±0,13)	(±0,01)	(±0,01)	-	-	(±0,01)	(±0,02)	(±0,01)
CAGi 800°C – 1:2	85,32	13,45	0,47	-	0,33	0,06	0,08	0,11	-
	(±0,10)	(±0,10)	(±0,01)	-	(±0,01)	(±0,01)	(±0,01)	(±0,01)	-

*CCGGi = Carvão Cascas Grãos de Girassol

Fonte: Do autor, 2024.

Os dados observados indicam que as amostras avaliadas apresentam uma composição majoritariamente formada por carbono e oxigênio, apresentando tendência similar à observada para as amostras provenientes de cascas de grãos de café em que é observado um aumento da porcentagem em massa de carbono e oxigênio com o processo de ativação dos materiais, exceto para a amostra CAGi 600°C – 1:2. Essa tendência é observada devido ao processo de tratamento termoquímico promover a volatilização de compostos presentes na composição do material precursor, colaborando para a formação de uma massa de carbono fixo. As porcentagens de carbono presentes nas amostras de carvão ativado preparadas a partir de cascas de grãos de girassol são maiores do que as observadas para as amostras obtidas a partir de cascas de grãos

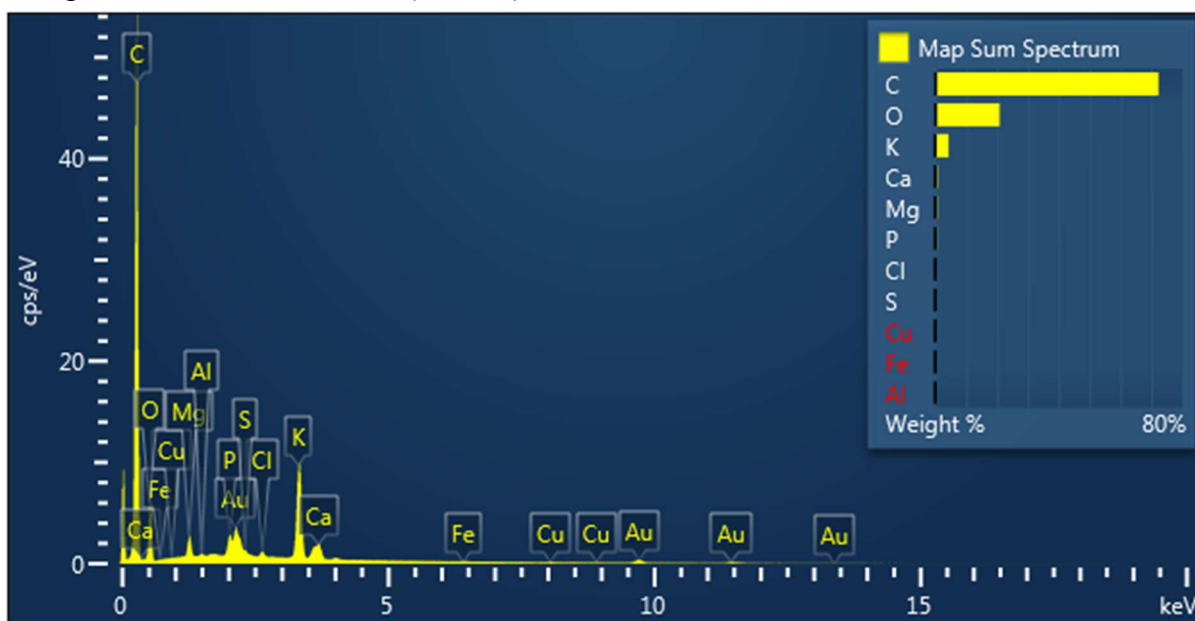
de café, isso é observado devido ao fato de que as cascas de grãos de girassol apresentam maior teor de carbono fixo, conforme Tabela 7.

A razão O/C_{org} dos carvões preparados também foi calculada afim de obter informações acerca da estabilidade dos adsorventes produzidos. A amostra CAGi 600°C – 1:2 apresentou razão O/C_{org} de aproximadamente 0,53; a amostra CAGi 700°C – 1:4 de aproximadamente 0,20 e a amostra CAGi 800°C – 1:2 de aproximadamente 0,21. Os valores obtidos para as razões molares de O/C_{org} para as amostras CAGi 700°C – 1:4 e CAGi 800°C – 1:2 foram menores que 0,4 indicando que os adsorventes produzidos nessas condições apresentam alta estabilidade e baixos níveis de oxidação. A amostra CAGi 600°C – 1:2 apresentou O/C_{org} acima de 0,4 e, de acordo com a norma EBC, esse resultado indica que o processo de produção do carvão ativado apresentou níveis de oxidação maiores, influenciando na estabilidade do material.

Após a ativação do carvão produzido previamente, a porcentagem de Cálcio (Ca), Potássio (K) e Magnésio (Mg) variaram. A amostra CCGGi apresentou baixa porcentagem de potássio em sua composição prévia a ativação nos pontos em que foi realizada a análise de EDS, e a amostra CAGi 700°C – 1:4 não apresentou a presença de potássio em sua composição enquanto as demais amostras apresentaram uma diminuição da presença de potássio. Isso indica que o processo de lavagem dos carvões ativados provenientes de cascas de grãos de girassol, após a etapa de ativação, também foi um processo efetivo.

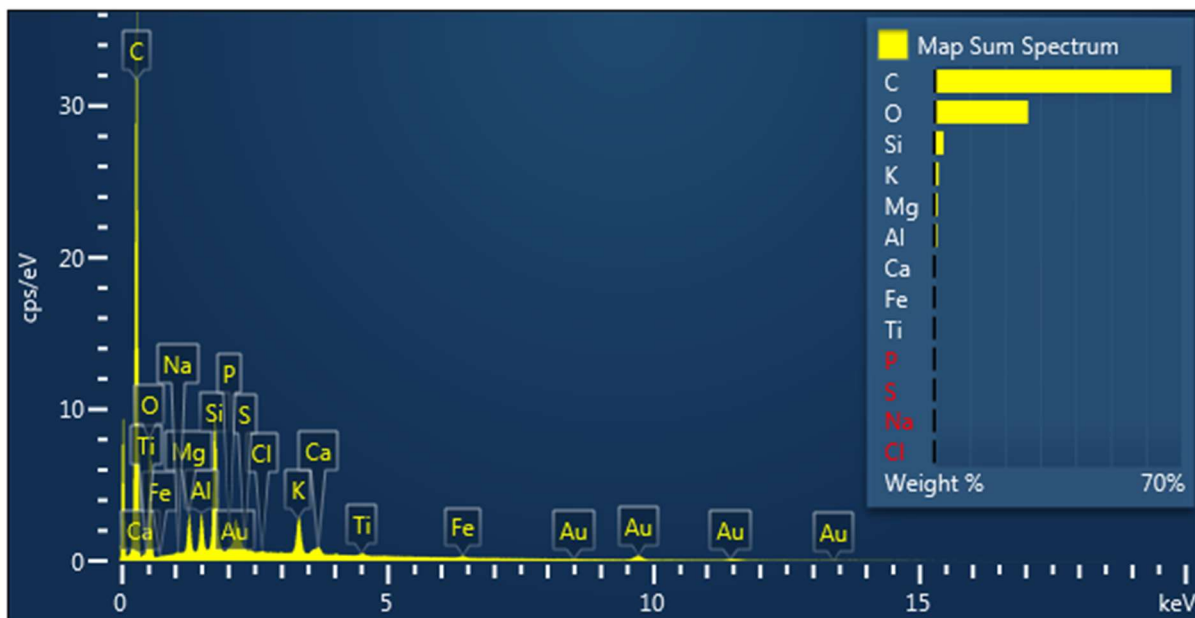
As Figuras 36, 37, 38 e 39 apresentam o gráfico *Sum Spectrum*, que reúne a visualização geral das imagens e fornece informações a respeito da composição química, das amostras CCGGi, CAGi 600°C – 1:2, CAGi 700°C – 1:4 e CAGi 800°C – 1:2, respectivamente. Os gráficos *Sum Spectrum* para as demais amostras são apresentados no Apêndice C.

Figura 36. Gráfico EDS para a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh (CCGGi).



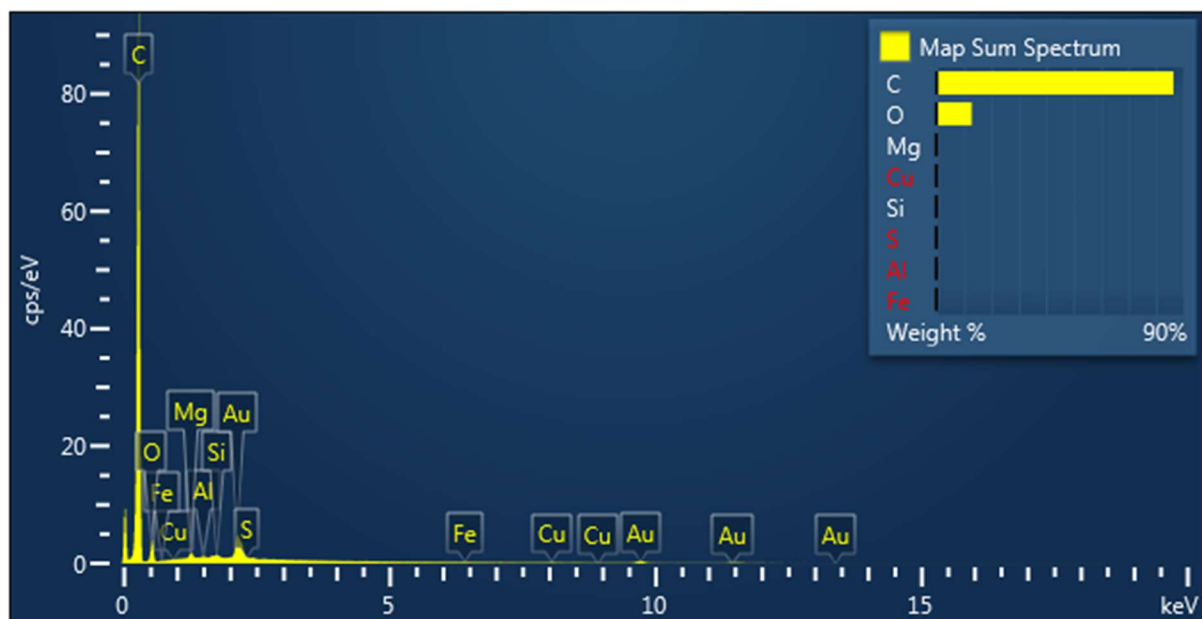
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 37. Gráfico EDS para a amostra CAGi 600°C – 1:2.



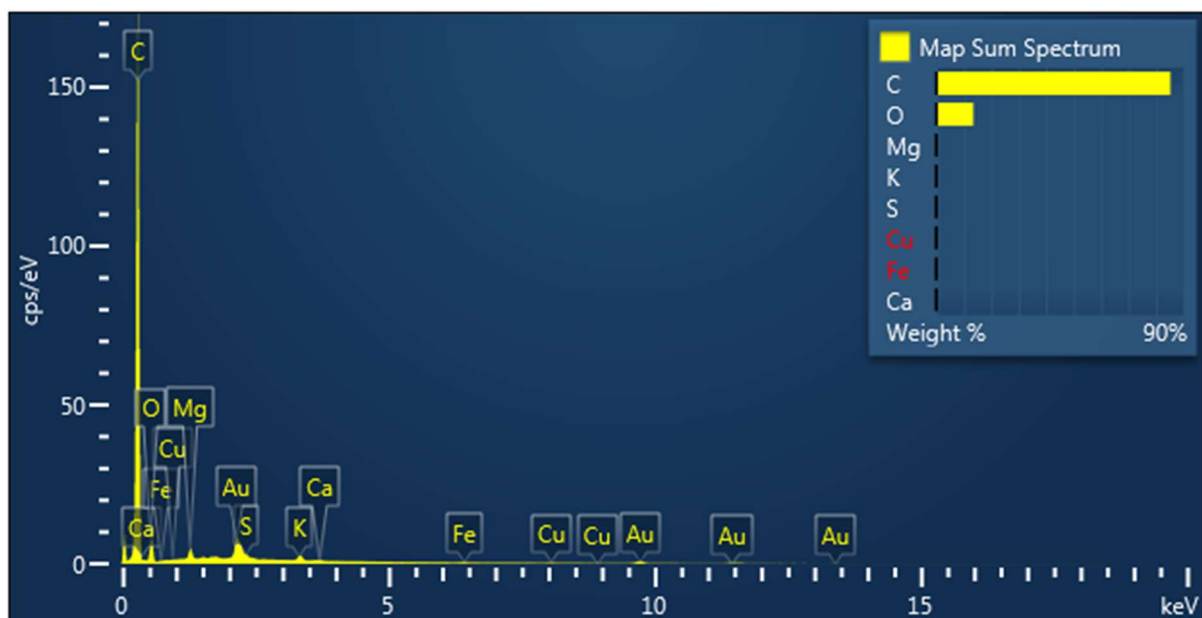
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 38. Gráfico EDS para a amostra CAGi 700°C – 1:4.



Fonte: Do autor, 2024.

Figura 39. Gráfico EDS para a amostra CAGi 800°C – 1:2.

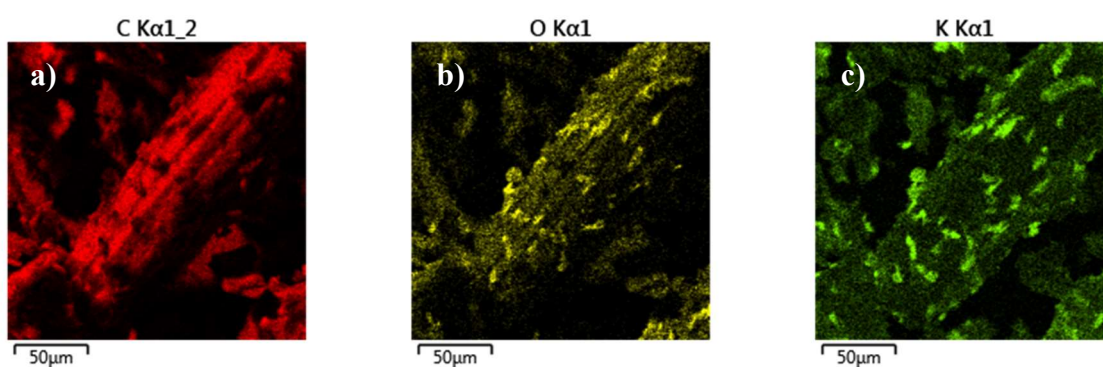


Fonte: Do autor, 2024.

Ao interpretar os gráficos de EDS obtidos para as amostras, é possível observar que a amostra de carvão sem ativação apresenta em sua composição uma porcentagem alta de carbono (C) e porcentagens inferiores de outros elementos. Diferentemente da amostra de carvão preparado a partir de cascas de grãos de café, é possível observar a partir do gráfico apresentado na Figura 42 que a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de girassol apresenta baixo teor de potássio em sua composição química. Esses componentes químicos detectados durante a análise são provenientes do material precursor, sendo referentes à parcela de cinzas que são encontradas na superfície dos carvões ativados produzidos após o processo de carbonização prévia dos materiais.

A partir do mapeamento por EDS das amostras, assim como dos resultados organizados na Tabela 16, é possível observar a presença majoritária de carbono e oxigênio e, também, a diminuição ou ausência de potássio na composição das amostras de acordo com as influências dos parâmetros e metodologia de ativação adotada para produção dos materiais adsorventes. Os mapeamentos por EDS das amostras CCGGi, CAGi 600°C – 1:2, CAGi 700°C – 1:4 e CAGi 800°C – 1:2 são apresentados nas Figuras 40, 41, 42 e 43, respectivamente, e ilustram a variação da presença de carbono, oxigênio e potássio. O mapeamento por EDS completo das amostras é apresentado no Apêndice C.

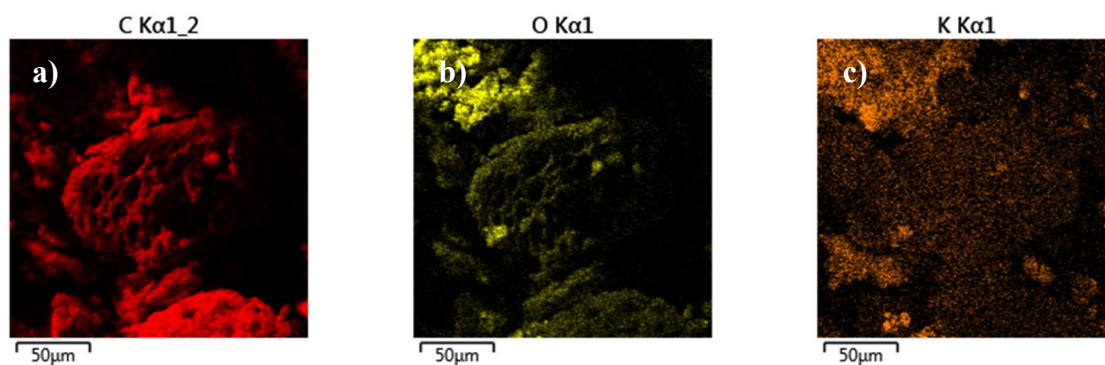
Figura 40. Mapeamento por EDS da amostra CCGGi.



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) Carbono; b) Oxigênio e c) Potássio.

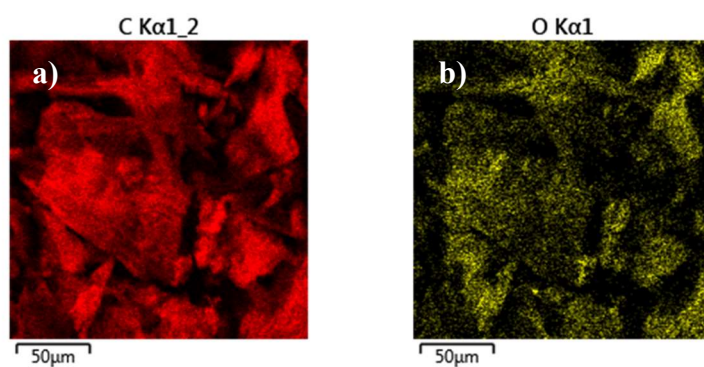
Figura 41. Mapeamento por EDS da amostra CAGi 600°C – 1:2.



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) Carbono; b) Oxigênio e c) Potássio.

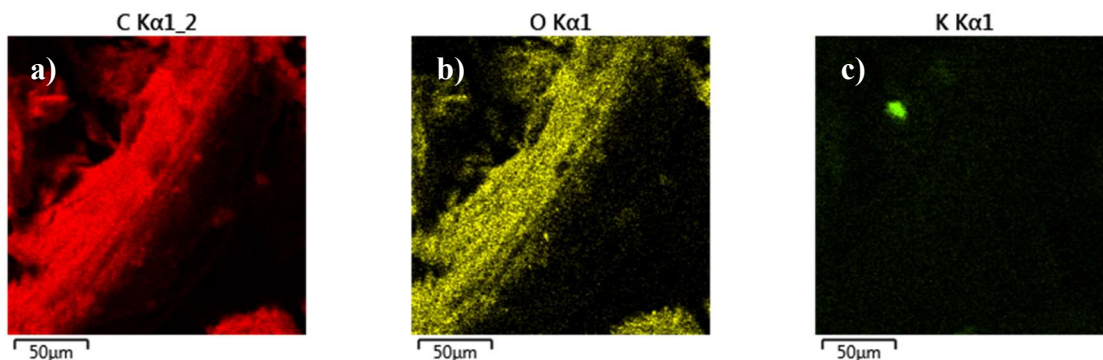
Figura 42. Mapeamento por EDS da amostra CAGi 700°C – 1:4, que apresentou ausência de potássio em sua composição química.



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) Carbono e b) Oxigênio.

Figura 43. Mapeamento por EDS da amostra CAGi 800°C – 1:2.



Fonte: Do autor, 2024.

Nota: a) Carbono; b) Oxigênio e c) Potássio.

5.2.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)

Para avaliação dos possíveis grupos funcionais presentes na composição das biomassas lignocelulósicas estudadas, dos carvões preparados e dos carvões ativados, foi realizada a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier na faixa de $4400 - 400 \text{ cm}^{-1}$, os espectros obtidos são apresentados no Apêndice D.

5.2.5.1 FT-IR dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café

Os espectros de FT-IR dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de café foram interpretados de acordo com trabalhos prévios presentes na literatura (ZHAO et al., 2020; LIU et al., 2020; GAO et al., 2020; SAMPAIO, 2023). Ao avaliar os espectros foi possível identificar a presença de alguns grupos funcionais presentes na superfície dos adsorventes. A Tabela 17 reúne as informações obtidas após a interpretação dos espectros de infravermelho.

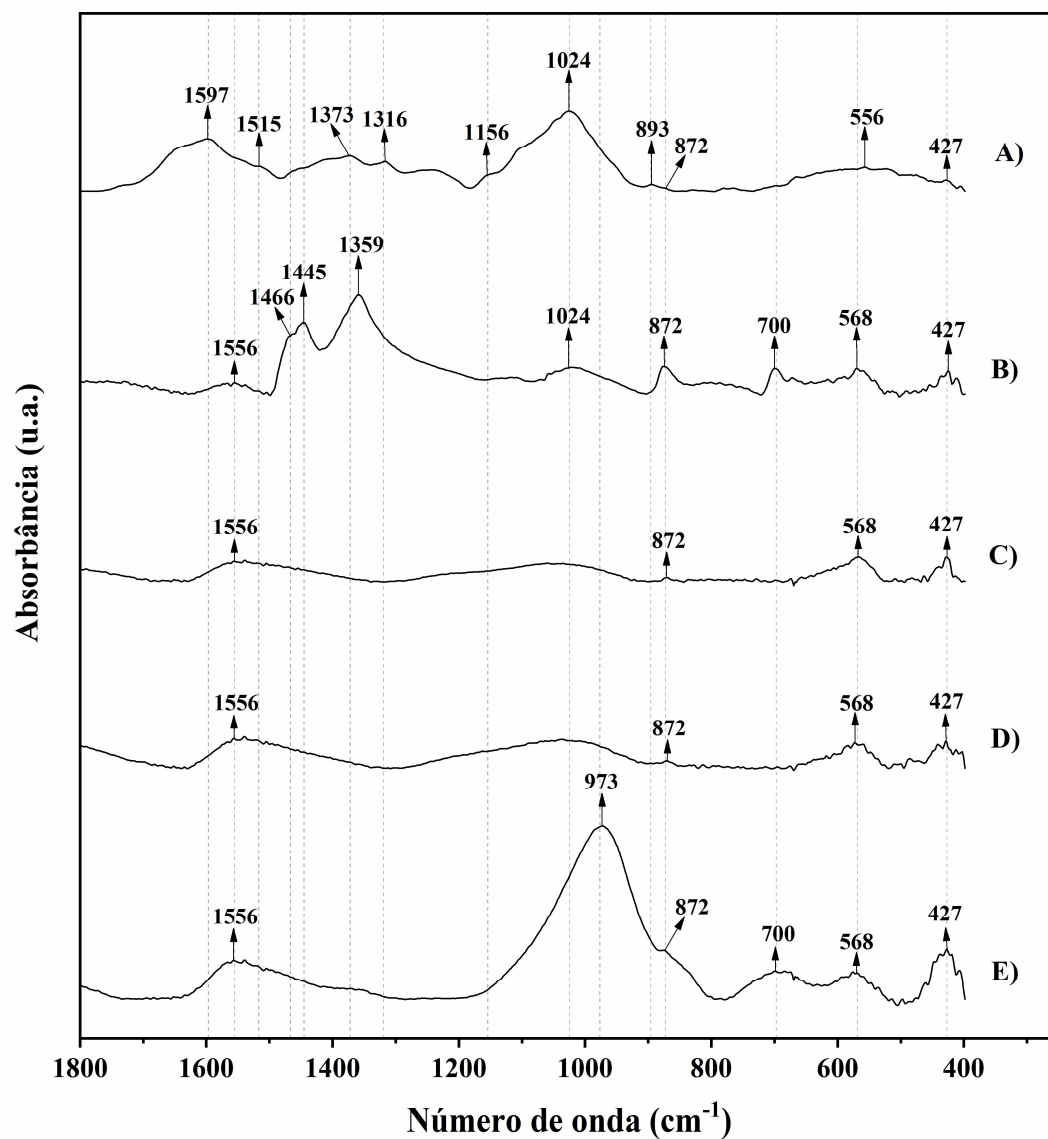
Tabela 17. Resultados obtidos a partir da análise dos espectros de FT-IR das amostras preparadas a partir de cascas de grãos de café.

Carvões Ativados Cascas de Grãos de Café		
Número de Onda (cm^{-1})	Grupo Funcional	Amostra(s)
3275	–OH estiramento	CGCa
2924; 2846	C–H estiramento	CGCa
1559; 1556	C=C (aromático)	CGCa; CCGCa; amostras preparadas a 600°C
1466	C–H (estiramento)	CCGCa
1359	C–O (carboxila)	CCGCa
1024; 1002	C–O (éter)	CGCa; CCGCa; CACa 800 – 1:1
973; 700	=CH (aromático)	Todas as amostras, exceto CACa 800 – 1:2
568;427	Deformação angular hidrocarbonetos	Todas as amostras
<i>CGCa = Cascas Grãos de Café</i>		
<i>CCGCa = Carvão Cascas Grãos de Café</i>		
<i>CACa = Carvão Ativado Cascas Grãos de Café</i>		

FONTE: Do autor, 2024.

As Figuras 44, 45 e 46 apresentam os espectros de FT-IR na faixa de $1800 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (região de identidade), referentes às amostras de carvão ativado preparadas a 600°C, 700°C e 800°C, respectivamente.

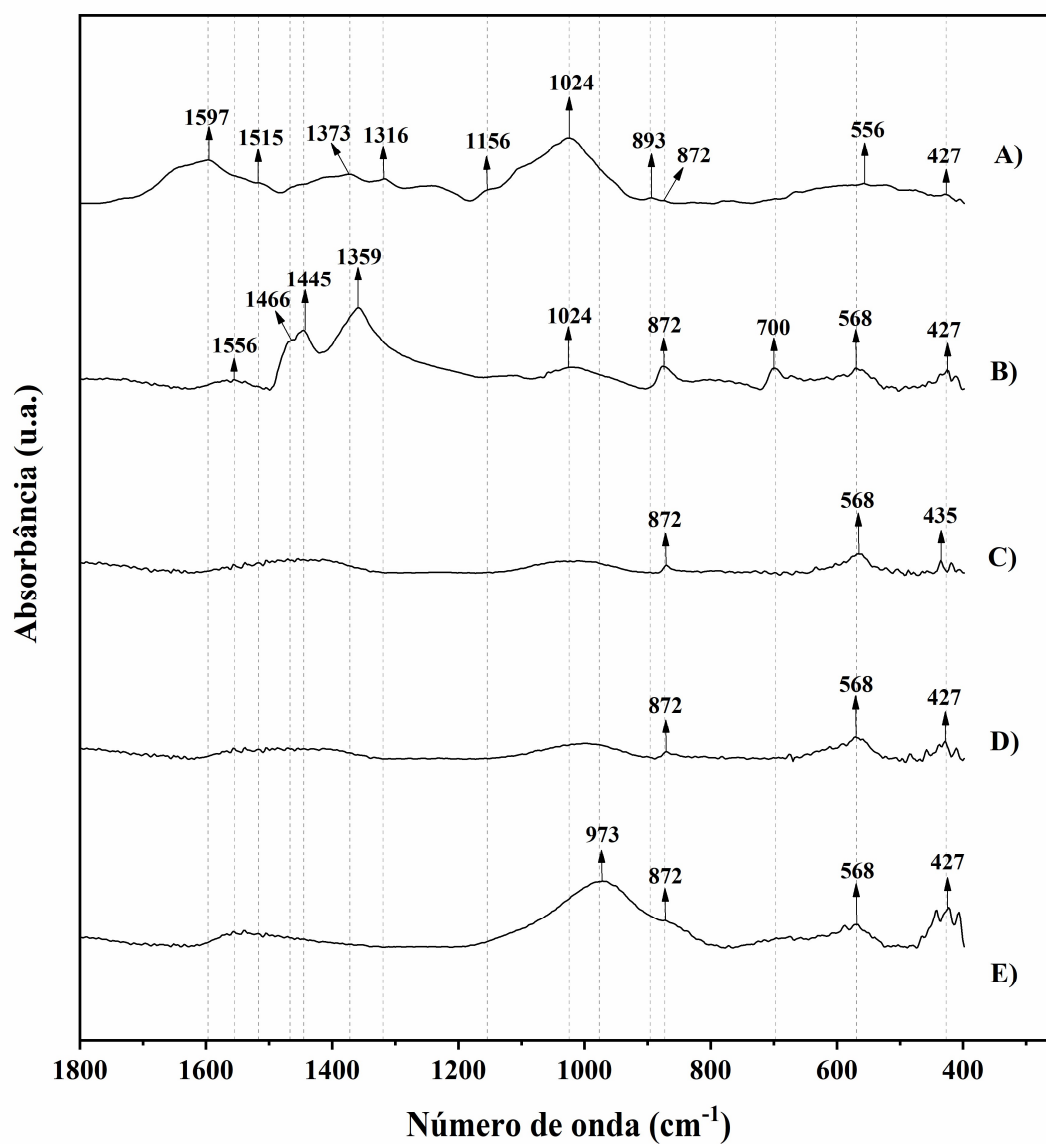
Figura 44. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 600°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de café moídas; B) Carvão cascas de grãos de café; C) CACa 600 – 1:1; D) CACa 600 – 1:2 e E) CACa 600 – 1:4.

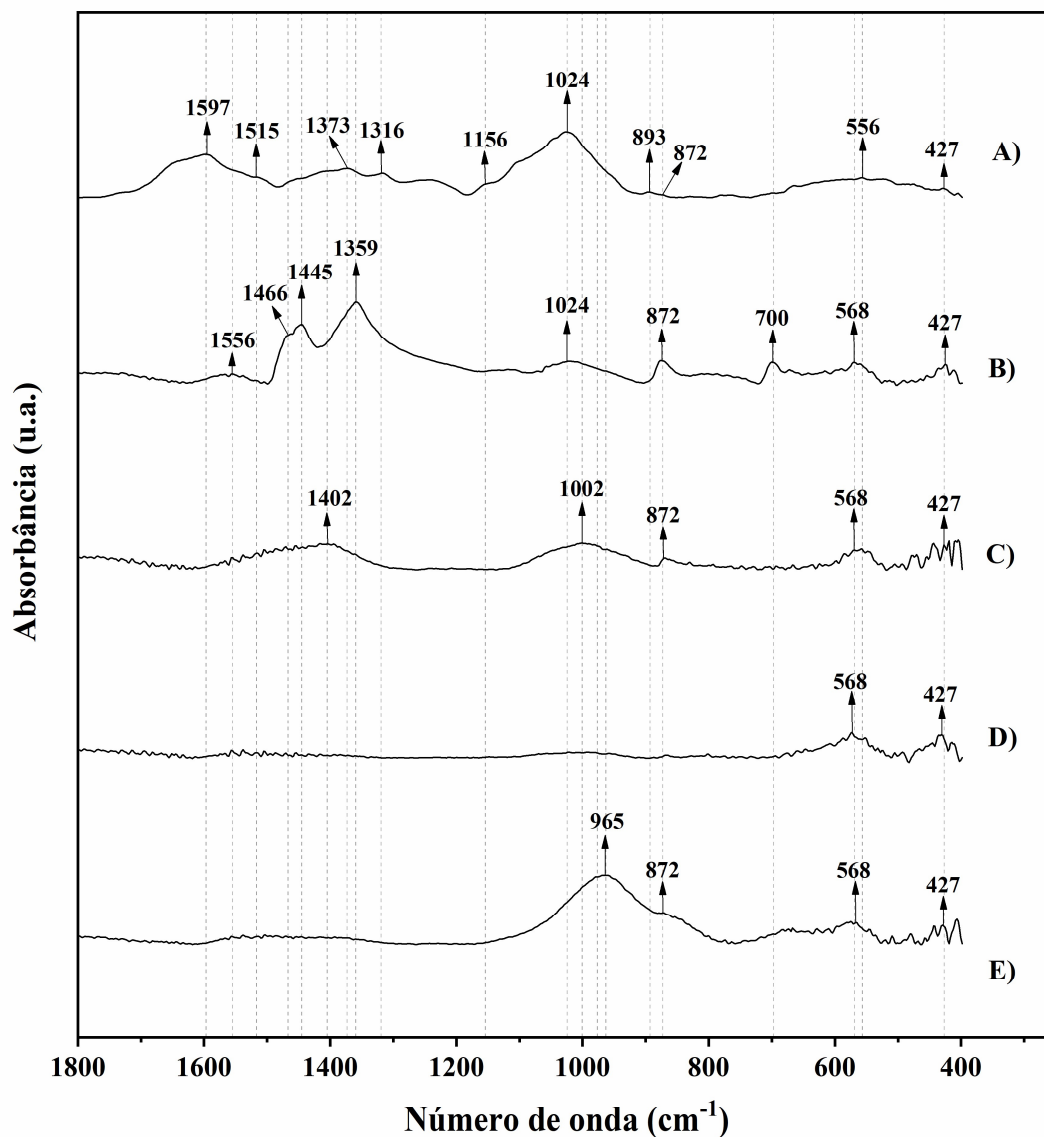
Figura 45. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 700°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de café moidas; B) Carvão cascas de grãos de café; C) CACa 700 – 1:1; D) CACa 700 – 1:2 e E) CACa 700 – 1:4.

Figura 46. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 800°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de café moídas; B) Carvão cascas de grãos de café; C) CACa 800 – 1:1; D) CACa 800 – 1:2 e E) CACa 800 – 1:4.

Analisando os espectros obtidos na faixa de $4400 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Apêndice D), para a amostra de cascas de grãos de café percebe-se a presença de picos na região de 2846 cm^{-1} e 2924 cm^{-1} , que podem ser atribuídos ao estiramento de ligações C–H e uma banda na região de $\sim 3275 \text{ cm}^{-1}$ que é atribuída a presença de grupos OH de carboidratos. Essas bandas não são observadas para as amostras de carvão e carvões ativados, o que indica que durante o processo de carbonização prévia dos materiais ocorreu a degradação térmica do material. Nesse caso, refere-se à degradação da celulose e hemicelulose que são desidratadas e perdem grande parte das funções –OH. De acordo com Zhao et al., 2020, a redução dos picos na região de 2846 cm^{-1} e 2924 cm^{-1} ocorre devido ao processo de aromatização da estrutura, no qual as ligações C–H alifáticas são rompidas.

Picos na região de 1556 cm^{-1} e 1559 cm^{-1} são referentes a ligações C=C de aromáticos e são observados para a amostra de biomassa moída, para o carvão preparado e, também, para os carvões ativados a 600°C . Esse comportamento é observado de forma semelhante na região de 1359 cm^{-1} e 1466 cm^{-1} que são atribuídas à deformação axial de C–H e estiramento de C–O em compostos carboxílicos, respectivamente, e são observadas para a amostra de carvão, mas não estão presentes nos espectros referentes às amostras de carvão ativado. Esses picos não são observados quando as amostras são comparadas pois, segundo Liu et al., 2020, isso ocorre devido ao fato de que esse grupo funcional sofre degradação térmica em temperaturas mais altas liberando líquido e gases durante o tratamento termoquímico.

Nos espectros referentes às amostras de biomassa moída, para o carvão produzido e para a amostra de carvão ativado CACa 800 – 1:1, são observados picos em 1002 cm^{-1} e 1024 cm^{-1} que indicam a presença de ligações axiais C–O de grupos éteres. De acordo com Gao et al., 2020, esse comportamento se deve pela influência do agente ativador (KOH) que promove durante o processo de ativação a decomposição desses grupos funcionais em CO_2 . Os carvões ativados preparados, em todas as temperaturas de ativação estudadas, apresentam picos na região entre 700 cm^{-1} e 973 cm^{-1} que estão relacionados com ligações angulares =CH de aromáticos, o que evidencia o desenvolvimento da estrutura aromática característica desses materiais. Segundo Fu et al., 2023, picos nessa região são provenientes da estrutura típica das macromoléculas de lignina, celulose e hemicelulose presentes na composição dos materiais precursores. Na região entre 427 cm^{-1} e 568 cm^{-1} os picos observados são atribuídos à deformação angular da cadeia de hidrocarbonetos.

5.2.5.2 FT-IR dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol

Os espectros de FT-IR dos carvões ativados produzidos a partir de cascas de grãos de girassol foram interpretados de acordo com trabalhos prévios presentes na literatura (ZHAO et al., 2020; LIU et al., 2020; GAO et al., 2020; SAMPAIO, 2023). Ao avaliar os espectros foi possível identificar a presença de alguns grupos funcionais presentes na superfície dos adsorventes. A Tabela 18 reúne as informações obtidas após a interpretação dos espectros de infravermelho.

Tabela 18. Resultados obtidos a partir da análise dos espectros de FT-IR das amostras preparadas a partir de cascas de grãos de girassol.

Carvões Ativados Cascas de Grãos de Girassol		
Número de Onda (cm ⁻¹)	Grupo Funcional	Amostra(s)
3325	–OH estiramento	CGGi
2922; 2854	C–H estiramento	CGGi
1741; 1708	C=O (carbonila)	CGGi
1390	–OH deformação	CCGGi
1250	C–O e C–C alongamento (aromáticos)	CCGGi;
1236	C–N estiramento (aminas)	CGGi
1113; 1096	C–C–C alongamento (cetonas)	CGGi; CCGGi
1028; 1006	C–O (éter)	Todas as amostras
973; 969	=CH angular (aromático)	Todas as temperaturas quando razão de 1:4
891; 690	=CH angular (aromático)	Todas as amostras
573; 404	Deformação angular hidrocarbonetos	Todas as amostras

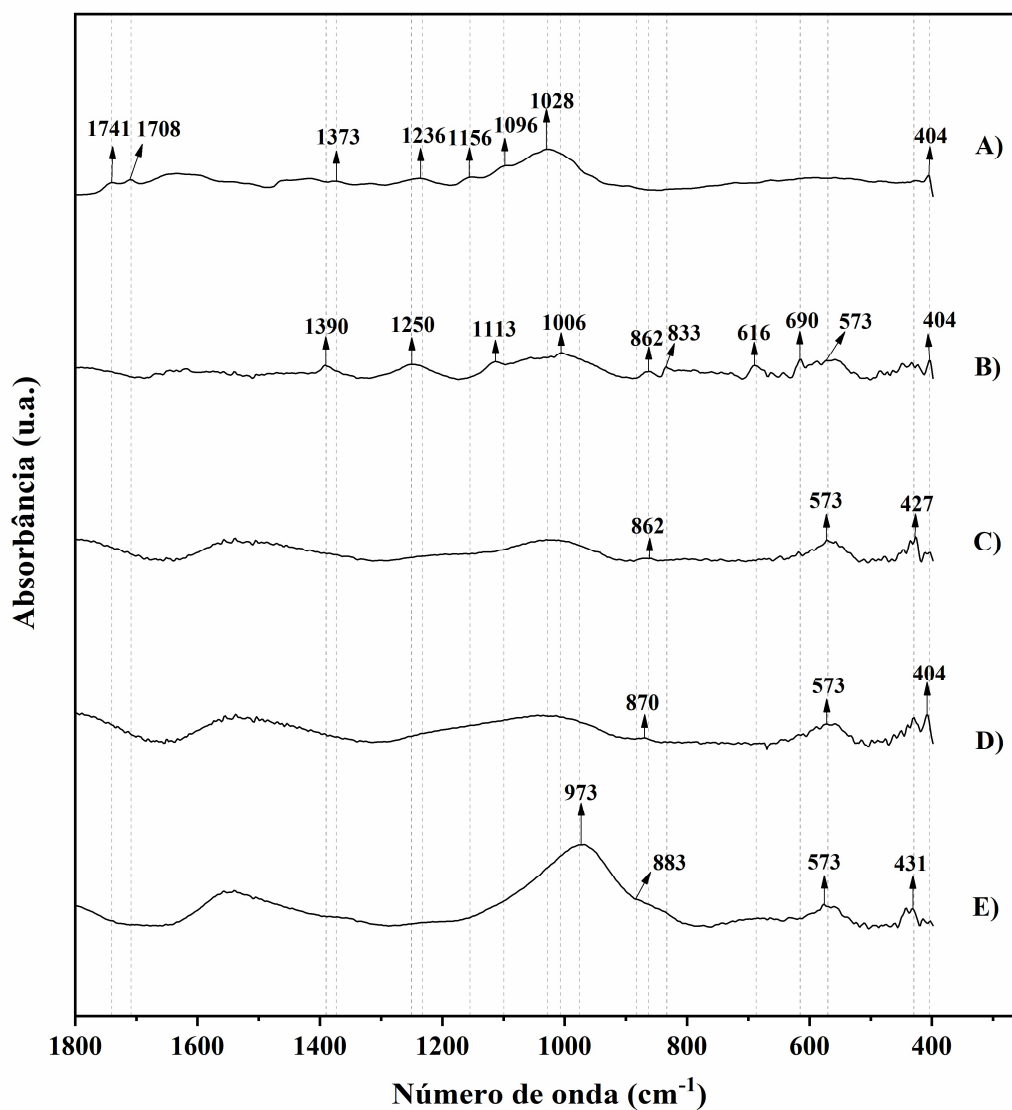
CGGi = Cascas Grãos de Girassol

CCGGi = Carvão Cascas Grãos de Girassol

FONTE: Do autor, 2024.

As Figuras 47, 48 e 49 apresentam os espectros de FT-IR na faixa de $1800 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (região de identidade), referentes às amostras de carvão ativado preparadas a 600°C , 700°C e 800°C , respectivamente.

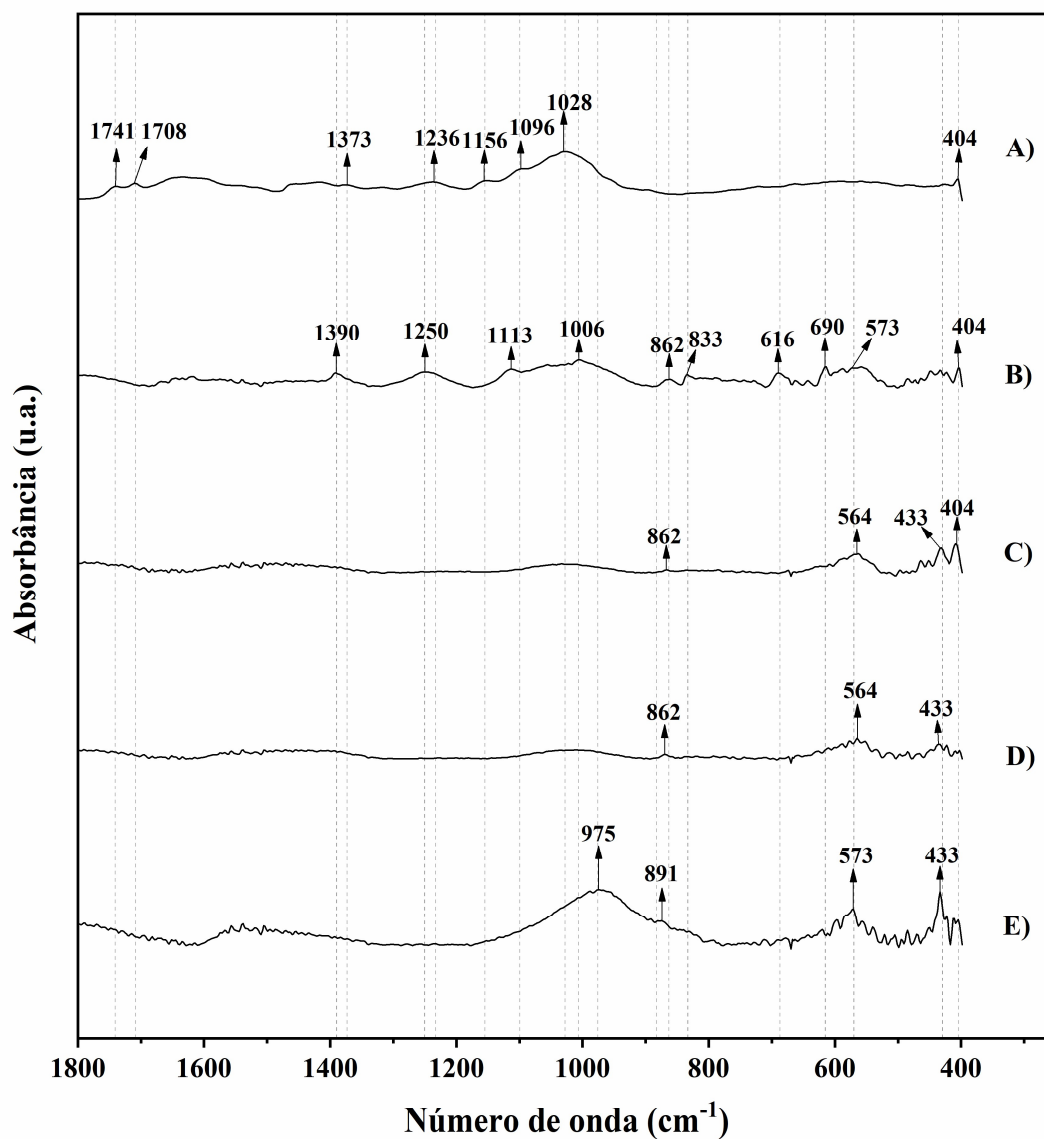
Figura 47. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 600°C .



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de girassol moídas; B) Carvão cascas de grãos de girassol; C) CAGi 600 – 1:1; D) CAGi 600 – 1:2 e E) CAGi 600 – 1:4.

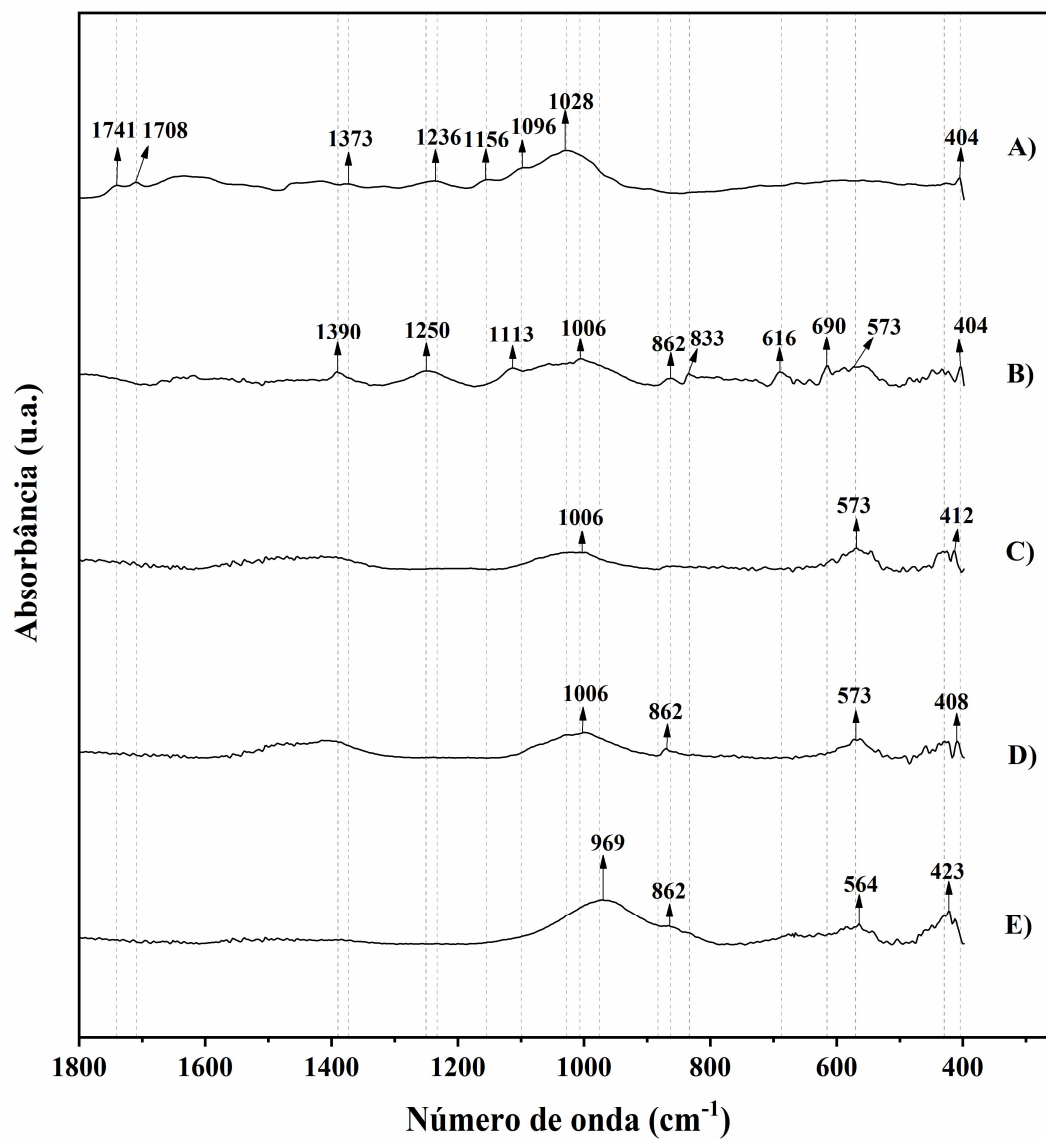
Figura 48. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 700°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de girassol moídas; B) Carvão cascas de grãos de girassol; C) CAGi 700 – 1:1; D) CAGi 700 – 1:2 e E) CAGi 700 – 1:4.

Figura 49. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 800°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de girassol moídas; B) Carvão cascas de grãos de girassol; C) CAGi 800 – 1:1; D) CAGi 800 – 1:2 e E) CAGi 800 – 1:4.

Os espectros obtidos na faixa de $4400 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Apêndice D), para as amostras referentes às cascas de grãos de girassol o carvão produzido e os carvões ativados provenientes deste resíduo, apresentaram picos em regiões semelhantes aos obtidos para as cascas de grãos de café, isso porque os resíduos lignocelulósicos estudados apresentam características físicas, químicas e estruturais similares. São observados para a amostra de cascas de grãos de girassol picos na região de 2854 cm^{-1} e 2922 cm^{-1} , que estão relacionados ao estiramento de ligações C–H e uma banda na região de $\sim 3325 \text{ cm}^{-1}$ que também é atribuída ao estiramento vibracional do grupo –OH de carboidratos. Essa banda não é observada nos espectros das amostras de carvão e carvões ativados, o que indica que durante o processo de carbonização prévia dos materiais ocorreu a degradação térmica de componentes estruturais, como celulose e hemicelulose, que durante a degradação são desidratados e perdem grande parte das funções –OH.

Os picos na região entre 1708 cm^{-1} e 1741 cm^{-1} no espectro das cascas de grãos de girassol são atribuídos à ligação C=O da carbonila. Para as demais amostras, em todas as temperaturas de ativação estudadas, não são observados picos nessa mesma região porque, assim como para o conjunto de amostras provenientes das cascas de grãos de café, com o aumento da temperatura durante o processo de tratamento termoquímico esses grupos funcionais sofrem degradação térmica e/ou se reorganizam.

Apenas para a amostra de carvão é observado um pico na região de 1390 cm^{-1} que é atribuído à deformação da ligação –OH. Nesse caso, como trata-se da amostra carbonizada compreende-se que essa ligação –OH está relacionada com as funções provenientes da composição estrutural do material precursor. Um pico na região de 1236 cm^{-1} referente ao alongamento de ligações C–O e C–C em anéis aromáticos é observado no espectro referente ao material precursor e um pico na região de 1250 cm^{-1} referente ao estiramento de ligações C–N de aminas é observado apenas no espectro referente ao carvão preparado. Os picos observados na região entre 1096 cm^{-1} e 1113 cm^{-1} são referentes ao alongamento da ligação C–C–C de cetonas e estão presentes nos espectros obtidos para as amostras de cascas de grãos de girassol e do carvão sem ativação.

Na região entre 1006 cm^{-1} e 1028 cm^{-1} , são observados picos e deslocamentos referentes à ligação C–O do grupo funcional éter. Picos na região entre 969 cm^{-1} e 973 cm^{-1} são atribuídos às ligações angulares =CH de aromáticos. Além disso, todas as amostras analisadas apresentam picos na região entre 690 cm^{-1} e 891 cm^{-1} que também estão relacionados a ligações angulares =CH de aromáticos, o que indica que os componentes estruturais provenientes do material precursor colaboraram para o desenvolvimento da estrutura aromática característica dos

materiais produzidos. Na região entre 404 cm^{-1} e 573 cm^{-1} os picos observados são atribuídos à deformação angular da cadeia de hidrocarbonetos.

6 CONCLUSÕES

A partir das análises de caracterização das biomassas estudadas foi possível avaliar e traçar comparativos acerca do emprego de cascas de grãos de café e de grãos de girassol na produção de carvão ativado. Os materiais apresentaram características desejadas para esta finalidade como baixo teor de umidade, alto teor de lignina em sua composição e baixo teor de cinzas. Ao comparar os resíduos lignocelulósicos, percebe-se que as cascas de grãos de café empregadas neste trabalho apresentaram maior teor de lignina, porém, as cascas de grãos de girassol apresentaram maior teor de carbono fixo, menor teor de cinzas e menor teor de umidade. Essas propriedades químicas e estruturais dos materiais precursores são parâmetros fundamentais pois, influenciam diretamente as características dos carvões ativados que são produzidos. Apesar das diferenças observadas, quando comparadas as características dos adsorventes produzidos com outros materiais provenientes de precursores lignocelulósicos, ambas as biomassas estudadas possuem potencial para serem utilizadas como materiais precursores no processo de conversão termoquímica dos resíduos em carvão.

Após a realização dos experimentos de ativação dos carvões utilizando hidróxido de potássio como agente ativador em meio seco nas razões de impregnação 1:1, 1:2 e 1:4 (carvão:KOH) e diferentes temperaturas de ativação (600, 700 e 800°C), verificou-se que dentre todas as amostras preparadas o carvão ativado preparado a partir de cascas de grãos de girassol a 700°C com razão de impregnação de 1:4 apresentou os melhores resultados em termos de análise textural. A amostra CAGi 700°C – 1:4 apresentou área superficial aparente (BET) igual a 1326,54 m².g⁻¹, volume total de poros de 0,7947 cm³.g⁻¹, volume de microporos 0,5324 cm³.g⁻¹ e diâmetro médio de poro de 2,34 nm.

É necessário destacar que a amostra de carvão ativado preparada a partir de cascas de grãos de café que apresentou os melhores resultados, dentre seu conjunto de amostras, também foi obtida quando empregada temperatura de ativação igual a 700°C com razão de impregnação 1:4. A amostra CACa 700°C – 1:4 apresentou valor de área superficial aparente (BET) de 1306,97 m².g⁻¹, volume total de poros de 0,7875 cm³.g⁻¹, volume de microporos 0,5689 cm³.g⁻¹ e diâmetro médio de poro de 2,41 nm. Os resultados indicam que apesar da biomassa empregada, quando empregada a temperatura de ativação de 700°C e razão de impregnação de 1:4 durante a produção dos adsorventes ocorreu o desenvolvimento da estrutura porosa sendo obtidos adsorventes predominantemente mesoporosos e microporos.

É possível, portanto, afirmar que a melhor condição para preparo de carvões ativados considerando a metodologia adotada neste trabalho consiste no emprego da temperatura de

ativação igual a 700°C e a razão de impregnação massa/massa em meio seco de 1:4 (carvão:KOH).

O estudo da morfologia das amostras indicou que os carvões ativados preparados são formados por partículas com superfície porosa irregular com formação de cavidades, devido à volatilização de compostos presentes na estrutura dos materiais precursores. Também foi possível avaliar o desenvolvimento da estrutura porosa e a formação de mesoporos e microporos que estão de acordo com as variações observadas durante a análise de isotermas de adsorção-dessorção BET, utilizadas para avaliação das características superficiais. A amostra CAGi 700°C – 1:4 apresentou uma superfície rugosa que indica a presença de poros menores que não foram observados a partir do microscópio eletrônico de varredura, isso indica o desenvolvimento da estrutura porosa do material adsorvente a partir do método de produção estabelecido nesta pesquisa.

A microanálise de composição química por EDS indicou que os adsorventes são majoritariamente constituídos por carbono e oxigênio, e que o processo de lavagem dos carvões ativados após a etapa de ativação para remoção do excesso de agente ativador foi efetivo. Com base nos dados de EDS, também foi possível avaliar a estabilidade dos carvões ativados produzidos levantando comparativos a partir da razão molar de O/C_{org} , que indicou que os adsorventes que apresentaram maior valor de área superficial aparente, CAGi 700°C – 1:4 e CACa 700°C – 1:4, possuem alta estabilidade.

A partir da análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), é possível afirmar que o processo de ativação para ambas as biomassas estudadas proporcionou o desenvolvimento de uma estrutura aromática característica dos adsorventes produzidos e a presença de grupos funcionais oxigenados na superfície dos materiais. Os grupos funcionais observados durante a análise de FT-IR, são provenientes da composição química estrutural dos materiais precursores avaliados, e a presença desses grupos na superfície dos carvões ativados colabora para as interações estabelecidas entre o adsorvente e o meio em que é empregado. Com isso, é possível reiterar que os resíduos lignocelulósicos estudados apresentam características químicas desejáveis para a produção de carvão ativado.

Portanto, a partir dos resultados de caracterização dos adsorventes produzidos é possível afirmar que os resíduos lignocelulósicos estudados apresentam características propícias para a produção de carvão ativado e o processo de ativação empregado neste estudo foi eficiente para o desenvolvimento da estrutura porosa e, também, das características físicas e químicas superficiais almejadas para produção de um bom adsorvente.

7 TRABALHOS FUTUROS

Após a produção e caracterização dos carvões ativados produzidos, a avaliação da capacidade adsortiva dos adsorventes será realizada de acordo com a norma JIS K 1474, que estabelece uma metodologia para a realização de diferentes ensaios de adsorção com carvões ativados (JIS, 2007). O intuito da avaliação da capacidade adsortiva dos carvões ativados produzidos está relacionado com a possibilidade de emprego desses materiais em condições reais de uso, por isso, em um trabalho a ser desenvolvido futuramente, será estudada a performance dos carvões ativados de modo a levantar informações a respeito do seu emprego em processos de tratamento de fluidos e resíduos industriais por adsorção.

REFERÊNCIAS

- ABATAN, O. G.; ONI, B. A.; AGBOOLA, O.; EFEVBKHAN, V.; ABIODUN, O. O. Production of activated carbon from African star apple seed husk, oil seed and whole seed for wastewater treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, n. 4, p. 41-50, 2019.
- ABETO, A. T.; BEYAN, S. M.; BEKELE, B. A.; FIROMSA, K. W. Optimization and Modeling of Cr (VI) Removal from Tannery Wastewater onto Activated Carbon Prepared from Coffee Husk and Sulfuric Acid (H₂SO₄) as Activating Agent by Using Central Composite Design (CCD). **Hindawi**, v. 2023, n. 5663261, p. 1-14, 2023.
- ABEWAA, M.; MENGISTU, A.; TAKELE, T.; FITO, J.; NKAMBULE, T. Adsorptive removal of malachite green dye from aqueous solution using Rumex abyssinicus derived activated carbon. **Scientific Reports**, v. 13, n. 14, p. 701-717, 2023.
- ADILLA, N.; YUSUP, S. Co-valorization of delayed petroleum coke palm kernel shell for activated carbon production. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, n. 12, p. 1-9, 2021.
- AFRIDI, M. N.; LEE, W. H.; KIM, J. O. Effect of phosphate concentration, anions, heavy metals, and organic matter on phosphate adsorption from wastewater using anodized iron oxide nanoflakes. **Environmental Research**, v. 171, n. 4, p. 28-36, 2019.
- AHMAD, A. A.; AL-RAGGAD, M.; SHAREEF, N. Production of activated carbon derived from agricultural by products via microwave induced chemical activation: a review. **Carbon Letters**, v. 31, n. 95, p. 957-971, 2021.
- AHMED, T.; GUPTA, S. S. Adsorptive accumulation of methylene blue dye from aqueous effluent by NiFe₂O₄-GO nano-adsorbent. **World Journal of Chemical Education**, v. 9, n. 1, p. 28-41, 2021.
- AJAY, K. M.; DINESH, M. N. Performance studies of bamboo based nano activated carbon electrode material for supercapacitor applications. **Proceedings**, v. 46, n. 10, p. 4510-4514, 2021.
- AKCAY, C.; CEYLAN, F.; ARSLAN, R. Production of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) from some waste lignocellulosic materials and FT-IR characterization of structural changes. **Scientific Reports**, v. 13, n. 12897, p. 1-13, 2023.
- ALCANIZ-MONGE, J.; ROMAN-MARTINEZ, M. C.; LILLO-RODENAS, M. A. Chemical activation of lignocellulosic precursors and residues: what else to consider? **Molecules**, v. 27, n. 1630, p. 1-26, 2022.
- ALCARAZ, L.; ESCUDERO, M. E.; ALGUACIL, F. J.; LLORENTE, I.; URBIETA, A.; FERNANDEZ, P.; LOPEZ, F. A. Dysprosium removal from water using active carbons obtained from spent coffee ground. **Nanomaterials**, v. 9, n. 13, p. 1-16, 2019.
- ALENCAR, B. R. A.; VAZ, F. L.; NETO, A. G. B.; AQUINO, K. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C.; DUTRA, E. D.; Concentration of alkaline hydrogen peroxide (AHP)

affects the recycle of the liquid fraction in the pre-treatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. **Waste Biomass Valorization**, v. 11, n. 61, p. 179-188, 2020.

AL-GHOUTI, M. A.; DA'ANA, D. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 393, n. 12, p. 83-105, 2020.

ALHWAYZEE, M. H.; IMRAN, A. M.; NASSRULLAH, K. S. Evaluation of Solid Biomass Fuel for Some Iraqi Agricultural Wastes Using Proximate and Ultimate Analyses. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 671, n. 012006, p. 1-15, 2020.

ALI, R.; ASLAM, Z.; SHAWABKEH, R. A.; ASGHAR, A.; HUSSIEN, I. A. BET, FTIR and RAMAN characterizations of activated carbon from waste oil fly ash. **Turkish Journal of Chemistry**, v. 44, n. 2, p. 279-295, 2020.

ALMEIDA, M. E. B.; PEQUENO, L. A. B.; CARVALHO, M. N.; TAVARES, R. G. Conjecture of operational parameters in the removal of apparent color and turbidity of textile effluent by adsorption technology. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 8, n. 4, p. 324-330, 2023.

ALLOUD, S. S.; ALHARBI, H. A.; HAMEED, B. H.; GIESY, J. P.; ALMADY, S. S.; ALOTAIBI, K. D. Production of activated carbon from date palm stones by hydrothermal carbonization and microwave assisted KOH/NaOH mixture activation for dye adsorption. **Scientific Reports**, v. 13, n. 19, p. 64-76, 2023.

ALTINTIG, E.; SARICI, B.; KARATAS, S. Prepared activated carbon from hazelnut shell where coated nanocomposite with Ag⁺ used for antibacterial and adsorption properties. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 13, p. 671-687, 2023.

ALVEAR-DAZA, J. J.; PASQUALE, G. A.; RENGIFO-HERRERA, J.; ROMANELLI, G. P.; PIZZIO, L. R. Mesoporous activated carbon from sunflower shells modified with sulfonic acid groups as solid acid catalyst for itaconic acid esterification. **Catalysis Today**, v. 372, n. 5, p. 1-8, 2021.

ALVES, A. T.; LASMAR, D. J.; MIRANDA, I. P. A.; CHAAR, J. S.; REIS, J. S. The Potential of Activated Carbon in the Treatment of Water for Human Consumption, a Study of the State of the Art and Its Techniques Used for Its Development. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 12, n. 8, p. 43-53, 2021.

AMONIO, J. V. M.; CARAGDAG, I. J.; ESCORPIZO, J. A.; MIRANDA, K. M.; RAYMUNDO, A. J.; ROQUE, E. Production of activated carbon from corn cobs and mango kernels via H₃PO₄ activation and mediated hydrothermal treatment. **MATEC Web of Conferences**, v. 26, n. 8, p. 1-3, 2019.

AMRUTHA, JEPPU, G.; GIRISH, C. R.; PRABHU, B.; MAYER, K. Multi-component adsorption isotherms: review and modeling studies. **Environmental Process**, v. 10, n. 38, p. 1-52, 2023.

ANASTOPOULOS, I.; IGHALO, J. O.; IGWEGBE, C. A.; GIANNAKOUDAKIS, D. A.; TRIANTAFYLLIDIS, K. S.; PASHALIDIS, I.; KALDERIS, D. Sunflower-biomass derived

adsorbents for toxic/heavy metals removal from (waste) water. **Journal of Molecular Liquids**, v. 342, n. 11, p. 40-49, 2021.

ANDINI, N. D.; PRASETIYANI, Y.; MUMTAHINAH, F. A.; ASTIKA, B.; YUDHA, C. S. The Conversion of Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Stem Waste into Activated Carbon by the Pyrolysis Method Using ZnCl_2 Activator. **Equilibrium Journal of Chemical Engineering**, v. 7, n. 2, p. 107-115, 2023.

ANGEL-MERAZ, E. D.; ORANTES-FLORES, H. J.; MORALES, E. R.; SEVILLA-CAMACHO, P. Y.; CATILLO-PALOMERA, R. The use of activated carbon from coffee endocarp for the manufacture of supercapacitors. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 20, n. 1, p. 1-8, 2020.

ANISIMOVA, O. S.; KOLOMYTSA, V. A. Biofuel production from sunflower husk. **Earth and Environmental Science**, v. 659, n. 121, p. 1-5, 2021.

ARAGAW, T.; LETA, S.; ALAYU, E.; MEKONNEN, A. Chromium removal from electroplating wastewater using activated coffee husk carbon. **Adsorption Science & Technology**, v. 22, n. 55, p. 1-17, 2022.

ARALDI, A. **Desenvolvimento de protótipo para torrefação de biomassa visando à geração de energia**. Orientador: Prof.Dr^a.: Martha Andreia Brand, 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 2022.

ARAÚJO, A. C. C. **Composição química monomérica da lignina da madeira de Eucalyptus spp. Para produção de carvão vegetal**. Orientador: Paulo Fernando Trugilho, 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2015.

ARAUJO, D. A. **Remoção de óleo da água produzida por adsorção: estudo de adsorventes, comparação entre processos e proposição de aumento de escala**. Orientador: Alfredo Ismael Curbelo Garnica, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2017.

AREFYEVA, O. D.; ZEMNUKHOVA, L. A.; KOVEKHOVA, A. V.; MORGUN, N.; TSVETNOV, M. A. Produção, composição e propriedades de materiais contendo carbono a partir de matérias-primas vegetais. **Journal ASU**, v. 13, n. 2, p. 1-8, 2020.

ARNELLI, A.; SANTOSO, B.; ASTUTI, Y. Modification of activated carbon of rice husk using HDTMA-Br (SMAC) surfactant as nitrite ion (NO_2^-) adsorbent. **Journal of Physics**, v. 1943, n. 2159, p. 1-9, 2020.

ARRUDA, M. D. M. **Caracterização da lignina das folhas de Crataeva tapia e seu potencial em formulações medicinais e cosméticas**. Orientador: Ivone Antônia de Souza, 2021. Dissertação (Mestrado em Morfotecnologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2021.

ASHOKKUMAR, V.; VENKATKARTHICK, R.; JAYASHREE, S.; CHUETOR, S.; DHARMARAJ, S.; KUMAR, G.; CHEN, W. H.; NGAMCHARUSSRIVICHAR, C. Recent

advances in lignocellulosic biomass for biofuels and value-added bioproducts – a critical review. **Bioresource Technology**, n. 344, v. 126195, p. 1-15, 2022.

AYALEW, A. A.; ARAGAW, T. A. Utilization of treated coffee husk as low-cost bio sorbent for adsorption of methylene blue. **Adsorption Science & Technology**, v. 38, n. 6, p. 205-222, 2020.

AYAWEI, N.; EBELEGI, A. N.; WANSKASI, D. Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. **Journal of Chemistry**, v. 207, n. 3, p. 1-11.

AYYALUSAMY, S.; MISHRA, S. Optimization of preparation conditions for activated carbons from polyethylene terephthalate using response surface methodology. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 35, n. 3, p. 1105-1116, 2018.

AZANAW, A.; BIRLIE, B.; TESHOME, B.; JEMBERIE, M. Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 6, n. 10, p. 230-243, 2022.

AZEVEDO, P. G. F.; OLIVEIRA, D. C. S.; CAVALCANTI, L. A. P. Processos físicos e químicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 17, p. 1667-1678, 2020.

AZEVEDO, S. G.; SEQUEIRA, T.; SANTOS, M.; MENDES, L. Biomass-related sustainability: A review of the literature and interpretive structural modeling. **Energy**, v. 171, n. 11, p. 1107-1125, 2019.

AZNAR, J. S. **Characterization of activated carbon produced from coffee residues by chemical and physical activation**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – KTH Chemical Science and Engineering, Estocolmo, Suécia, 2011.

BAG, O.; TEKIN, K.; KARAGOZ, S. Microporous activated carbons from lignocellulosic biomass by KOH activation. **Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures**, v. 10, n. 7, p. 1-8, 2020.

BAGHIRZADE, B. S.; ZHANG, Y.; REUTHER, J. F.; SALEH, N. B.; VENKATESAN, A. K.; APUL, O. G. Thermal Regeneration of Spent Granular Activated Carbon Presents an Opportunity to Break the Forever PFAS Cycle. **Environmental Science & Technology**, v. 55, n. 56, p. 5608-5619, 2021.

BAHIACARBON. BAHACARBON Agro Industrial LTDA. Disponível em: <<https://bahiacarbon.com.br>>. Acesso em: 16 de jul 2024.

BAHIRAEI, A.; BEHIN, J. Effect of citric acid and sodium chloride on characteristics of sunflower seed shell-derived activated carbon. **Chemical Engineering Technology**, v. 44, n. 9, p. 1604-1617, 2021.

BAKAR, N. A.; OTHMAN, N.; YUNUS, Z. M.; ALTOWAYTI, W. A. H.; AL-GHEETHI, A.; ASHARUDDIN, S. M.; TAHIR, M. *et al.* Nipah (Musa Acuminata Balbisiana) banana peel as a lignocellulosic precursor for activated carbon: characterization study after carbonization

process with phosphoric acid impregnated activated carbon. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 11, p. 85-98, 2023.

BAKAR, N. A.; OTHMAN, N.; YUNUS, Z. M.; ALTOWAYTI, W. A. H.; TAHIR, M.; FITRIANI, N.; MOHD-SALLEH, S. N. A. An insight review of lignocellulosic materials as activated carbon precursor for textile wastewater treatment. **Environmental Technology & Innovation**, v. 22, n. 101, p. 445-479, 2021.

BAKSHI, S.; BANIK, C.; LAIRD, D. A. Estimating the organic oxygen content of biochar. **Scientific Reports**, v. 10, n. 13, p. 82-104, 2020.

BAKSI, S.; SAHA, D.; SAHA, S.; SARKAR, U.; BASU, D.; KUNIYAL, J. C. Pre-treatment of lignocellulosic biomass: review of various physico-chemical and biological methods influencing the extent of biomass depolymerization. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 138, p. 96-118, 2023.

BARBOSA, L. N. **Otimizando o processo de extração e hidrólise ácida para biomassas da Amazônia e do cerrado**. Orientadora: Prof.^a Dr.^a Magale Karine Diel Rambo, 2021. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantis, Palmas, TO, 2021.

BARCZAK, B.; LUCZAK, J.; KAZIMIERSKI, P.; KLUGMANN-RADZIEMSKA, E.; LOPEZ, G.; JANUSZEWICZ, K. Exploring synergistic effects in physical-chemical activation of *Acorus calamus* for water treatment solutions. **Journal of Environmental Management**, v. 347, n. 119, p. 1-11, 2023.

BARHOUM, A.; JEEVANANDAM, J.; RASTOGI, A.; SAMYN, P.; BOLUK, Y.; DUFRESNE, A.; DANQUAH, M. K.; BECHELANY, M. Plant cellulose, hemicelluloses, lignins and volatile oils for the synthesis of nanoparticles and nanostructured materials. **Nanoscale**, v. 8, n. 3, p. 1-50, 2020.

BASHEER, A. O.; HANAFIAH, M. M.; ALSAADI, M. A.; AL-DOURI, Y.; AL-RAAS, A. A.; Synthesis and optimization of high surface area mesoporous date palm fiber-based nanostructured powder activated carbon for aluminum removal. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 71, n. 9, p. 21-34, 2020.

BASSO, S. **Análise do carvão vegetal para uso doméstico**. Orientador: Giane Gonçalves Lenzi, 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2017.

BASTIAN, F.; HUTABARAT, O. S.; DIRPAN, A.; NAINU, F.; HARAPAN, H.; EMRAN, T. B.; SIMAL-GANDARA, J. From plantations to cup: changes in bioactive compounds during coffee processing. **Foods**, v. 10, n. 28, p. 1-27, 2021.

BAYSAL, M.; BILGE, K.; YILMAZ, B.; PAPILA, M.; YURUM, Y. Preparation of high surface area activated carbon from waste-biomass of sunflower piths: Kinetics and equilibrium studies on the dye removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 17, p. 1702-1713, 2018.

BAYTAR, O.; CEYHAN, A. A.; SAHIN, O. Production of activated carbon from *Elaeagnus angustifolia* seeds using H₃PO₄ activator and methylene blue and malachite green adsorption. **International Journal of Phytoremediation**, v. 8, n. 5, p. 1-11, 2020.

BAYTAR, O.; SAHIN, O.; SAKA, C. Sequential application of microwave and conventional heating methods for preparation of activated carbon from biomass and its methylene blue adsorption. **Applied Thermal Engineering**, v. 138, n. 5, p. 42-51, 2018.

BEDADA, D.; ANGASSA, K.; TIRUNEH, A.; KLOOS, H.; FITO, J. Chromium removal from tannery wastewater through activated carbon produced from *Parthenium hysterophorus* weed. **Energy, Ecology and Environmental**, v. 5, n. 3, p. 184-195, 2020.

BEHERE, K.; YOON, S. n-Layer BET adsorption isotherm modeling for multimeric Protein A ligand and its lifetime determination. **Journal of Chromatography B**, v. 11, n. 6, p. 12-33, 2021.

BERGER, C. **Modificação superficial de carvão ativado com ozônio e fotoinserção de moléculas orgânicas**. Orientador: Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira, 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

BEZERRAM V. R. **Avaliação do potencial energético de biomassa gerada no estado da Paraíba**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2019.

BHUTTO, A. W.; QURESHI, K.; HARIJAN, K.; ABRO, R.; ABBAS, T.; BAZMI, A. A.; KARIM, S.; YU, G. Insight into progress in pre-treatment of lignocellulosic biomass. **Energy**, v. 122, n. 7, p. 24-45, 2017.

BIMESTRE, T. A.; CANETTIERI, E. V.; TUNA, C. E. **Cavitação hidrodinâmica como pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar: uma revisão sistemática**. In: Agenda da Sustentabilidade no Brasil Conhecimentos Teóricos, Metodológicos e Empíricos. 2021.

BIRI, S. T.; IONESCU, M.; GHEORGHIT, N. E.; UNGUREANU, N.; DUT, N. V. V. Study of the compression behavior of sunflower seeds using the finite element method. **AGROFOR International Journal**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2019.

BIRIS, S. S.; IONESCU, M.; GHEORGHITA, N. E.; UNGUREANU, N.; VLADUT, N. V. Study of the compression behavior of sunflower seeds using the finite element method. **AGROFOR International Journal**, v. 4, n. 1, p.1-9, 2019.

BLAKER, C.; MUTHMANN, J.; PASEL, C.; BATHEN, D. Characterization of activated carbon adsorbents – state of the art and novel approaches. **ChemBioEng Reviews**, v. 6, n. 4, p. 119-138, 2019.

BLESSON, S.; RAO, A. U. Symbiotic effects of coffee husk ash incorporated ternary AAB system on qualitative, durability and sustainable characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 425, n. 26, p. 605-619, 2024.

BOLIGON, J. **Produção e caracterização de carvão ativado a partir da borra de café solúvel**. Orientador: Isabel Craveiro Moreira, 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, PR, 2015.

BONECHAR. BONECHAR Carvão Ativado. Disponível em: <<https://www.bonechar.com.br>>. Acesso em: 16 de jul de 2024.

BOSCH, D.; BACK, J. O.; GURTNER, D.; GIBERTI, S.; HOFMANN, A.; BOCKREIS, A. Alternative feedstock for the production of activated carbon with ZnCl₂: forestry residue biomass and waste wood. **Carbon Resources Conversion**, v. 5, n. 2, p. 299-309, 2022.

BRAGA, R. S. **Desenvolvimento de filme polimérico à base de hemicelulose extraída do bagaço de cana-de-açúcar**. Orientador: Matheus Poletto, 2018. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade do Caxias do Sul, Caxias do Sul, RJ, 2018.

BRASCARBO. BRASCARBO. Disponível em: <<https://brascarbo.com.br>>. Acesso em: 16 de jul de 2024.

BRASIL. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&view=processo&id=1835. Acesso em: 15 jun. 2023.

BRAZIL, O. A. V.; VILANOVA-NETA, J. L.; SILVA, N. O.; VIEIRA, I. M. M.; LIMA, A. S.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P.; FIGUEIREDO, R. T. Integral use of lignocellulosic residues from different sunflower accessions: analysis of the production potential for biofuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, n. 1, p. 430-438, 2019.

BRIÃO, G. V.; SILVA, M. G. C.; VIEIRA, M. G. A.; CHU, K. H. Correlation of type II adsorption isotherms of water contaminants using modified BET equations. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 46, n. 10, p. 57-64, 2022.

BRITO, J. M. A. L. **Carbonização sustentável para valorização do bambu tuldoide: produção de carvão ativado e caracterização do bio-óleo recuperado**. Orientador: Carlos Henrique Ataíde, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2020.

BRITO, J. M. A. L. **Carbonização sustentável para valorização do bambu bambusa tuldoide: produção de carvão ativado e caracterização do bio-óleo recuperado**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2020.

BRITO, J. M. A. L. **Tratamento biológico de efluentes industriais**. Orientador: Vicelma Luiz Cardoso, 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2017.

BULNES, C. A.; OKOYE, P. U. A review on trends in lignin extraction and valorization of lignocellulosic biomass for energy applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, n. 12, p. 23-47, 2021.

BURBANO, A. A.; GASCÓ, G.; HORST, F.; LASSALLE, V.; MÉNDEZ, A. Production, characteristics and use of magnetic biochar nanocomposites as sorbents. **Biomass and Bioenergy**, n. 172, v. 10, p. 1-11, 2023.

CADETE, R. M.; MELO-CHEAB, M. A.; DUSSÁN, K. J.; RODRIGUES, R. C. L. B.; SILVA, S. S.; GOMES, F. C. O.; ROSA, C. A. Production of bioethanol in sugarcane bagasse hemicellulosic hydrolysate by *Scheffersomyces parashehatae*, *Scheffersomyces illinoensis* and *Spathaspora arborariae* isolated from Brazilian ecosystems. **Journal of Applied Microbiology**, v. 123, n. 64, p. 1203-1213, 2017.

CALIXTO, G. Q.; MELO, D. M. A.; MELO, M. A. F.; BRAGA, R. M. Analytical pyrolysis (Py-GC/MS) of corn stover, bean pod, sugarcane bagasse and pineapple crown leaves for biorefining. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 39, n. 1, p. 37-46, 2022.

CAMPOS, G. A. F.; PEREZ, J. P. H.; BLOCK, I.; SAGU, S. T.; CELIS, P. S.; TAUBERT, A.; RAWEL, H. M. Preparation of activated carbons from spent coffee grounds and coffee parchment and assessment of their adsorbent efficiency. **Processes**, v. 9, n. 13, p. 1-18, 2021.

CANDIDO, I. C. M.; SOARES, J. M. D.; BARBOSA, J. A. B.; OLIVEIRA, H. P. Adsorption and identification of traces of dyes in aqueous solutions using chemically modified eggshell membranes. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, n. 10, p. 267-277, 2019.

CÂNDIDO, N. R. **Produção e caracterização de carvões de eucaliptos ativados fisicamente com CO₂ ou gás da carbonização**. Orientador: Vânia Márcia Duarte Pasa, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019.

CASCO, M. E.; MARTINEZ-ESCANDELL, M.; KANEKO, K.; SILVESTRE-ALBERO, J.; RODRIGUEZ-REINOSO, F. Very high methane uptake on activated carbons prepared from mesophase pitch: a compromise between microporosity and bulk density. **Carbon**, v. 93, n. 3, p. 11-21, 2015.

CASTIGLIONI, M.; RIVOIRA, L.; INGRANDO, I.; BUBBA, M. D.; BRUZZONITI, M. C. Characterization techniques as supporting tools for the interpretation of biochar adsorption efficiency in water treatment: a critical review. **Molecules**, v. 26, n. 50, p. 63-85, 2021.

CASTILHO, L. R. **Síntese e caracterização de nanotubos de carbono de acesso restrito magnético e seu uso para extração de chumbo e cádmio em amostras de leite**. Orientador: Eduardo Costa de Figueiredo, 2023. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2023.

CASTILLO-SUAREZ, L. A.; SIERRA-SANCHEZ, A. G.; LINARES-HERNANDEZ, I.; MARTINEZ-MIRANDA, V.; TEUTLI-SEQUEIRA, E. A. A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 10, p. 553-590, 2023.

ÇEÇEN, F. **Activated Carbon**. 1 ed. p. 1-34. Encyclopedia of Chemical Technology, 2014. CEFIC. **Test methods for activated carbon**. 1 ed. ASTM: USA, 1986.

CHAEMSANIT, S.; MATAN, N.; MATAN, N. Activated carbon for food packaging application: review. **Walailak Journal of Science & Technology**, v. 15, n. 4, p. 255-271, 2018.

CHANG, C. K.; TUN, H.; CHEN, C. C. An activity-based formulation for Langmuir adsorption isotherm. **Adsorption**, v. 26, n. 3, p. 75-86, 2020.

CHANGJA, J.; SHUANG, C.; QING, H.; PING, L.; QIKAI, Z.; JIANHUI, S.; MINGRUI, L. Study on Application of Activated Carbon in Water Treatment. **Earth and Environmental Science**, v. 237, n. 49, p. 81-87, 2019.

CHEN, D.; XU, J.; PENG LING, P.; ZHOU FANG, Z.; REN, Q; XU, K. *et al.* Formation and evolution mechanism of persistent free radicals in biochar during biomass pyrolysis: Insights from biochar's element composition and chemical structure. **Fuel**. v. 357, n. 129910, p. 1-12, 2024.

CHEN, J.; LIAO, Y.; WAN, X.; TIE, S.; ZHANG, B.; LAN, S.; GAO, X. A high performance MoO₃@MoS₂ porous nanorods for adsorption and photodegradation of dye. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 291, n. 121, p. 1-10, 2020.

CHEN, L. Study on the preparation of straw activated carbon and its phenol adsorption properties. **Earth and Environmental Science**, v. 52, n. 12, p. 26-33, 2017.

CHEN, N.; REN, J.; YE, Z.; XU, Q.; LIU, J.; SUN, S. Study on vacuum pyrolysis of coffee industrial residue for bio-oil production. **Earth and Environmental Science**, v. 59, n. 17, p. 1-8, 2017.

CHEN, R.; HAN, N.; LI, L.; WANG, S.; MA, X.; WANG, C.; LI, H.; LI, H.; ZENG, L. Fundamental understanding of oxygen content in activated carbon on acetone adsorption desorption. **Applied Surface Science**, v. 508, n. 145, p. 211-218, 2020.

CHEN, W.; GONG, M.; LI, K.; XIA, M.; CHEN, Z.; XIAO, H.; FANG, Y.; CHEN, Y.; YANG, H.; CHEN, H. Insight into KOH activation mechanism during biomass pyrolysis: chemical reactions between O-containing groups and KOH. **Applied Energy**, v. 278, n. 11, p. 730-742, 2020.

CHENG, J.; HU, S. C.; SUN, G. T.; KANG, K.; ZHU, M. Q.; GENG, Z. C. Comparison of activated carbons prepared by one-step and two-step chemical activation process based on cotton stalk for supercapacitors application. **Energy**, v. 215, n. 11, p. 144-159, 2021.

CHEW, T. W.; HNG, P. S.; ABDULLAH, B. C. T. G. L.; CHIN, K. L.; LEE, C. L.; HAFIZUDDIN, B. M. S. M. N.; TAUNGMAI, L. A review of bio-based activated carbon properties produced from different activating chemicals during chemicals activation process on biomass and its potential for Malaysia. **Materials**, v. 16, n. 73, p. 65-80, 2023.

CONGRESSO INTERNACIONAL DA AGROINDÚSTRIA, 2020. **Anais eletrônicos**. Recife, PE. Tema: Ciência, Tecnologia e Inovação: do campo à mesa. Disponível em: <https://doi.org/10.31692/ICIAGRO.2020.0415>. Acesso em: 21 jul. 2023.

CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC, 2018, Maceió. **Anais Eletrônicos**. Disponível em: <https://www.confea.org.br/eventos/contecc/contecc-2018>. Acesso em: 04 dez. 2023.

CONTESCU, C. I.; ADHIKARI, S. P.; GALLEGU, N. C.; EVANS, N. D.; BISS, B. E. Activated carbons derived from high-temperature pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Journal of Carbon Research**, v. 4, n. 51, p. 1-16, 2018.

CORREA, C. R.; STOLLOVSKY, M.; HEHR, T.; RAUSCHER, Y.; ROLLI, B.; KRUSE, A. Influence of the Carbonization Process on Activated Carbon Properties from Lignin and Lignin-Rich Biomasses. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 8, p. 22-33, 2017.

CORTÉS, J. C.; NAVARRO-QUILES, A.; SANTOJA, F. J.; SFERLE, S. M. Statistical analysis of randomized pseudo-first/second order kinetic models. Application to study the adsorption on cadmium ions onto tree fern. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 240, n. 10, p. 91-105, 2023.

COSMIN, S.; AUREL, L.; CATALIN, C. Ecological briquettes from sunflower seed husk. **E3S Web of Conferences**, v. 80, n. 1, p. 1-5, 2019.

COSTA, F. R. T. **Microscopia eletrônica de varredura: potencialidades e aplicações**. Orientador: Adeilton Pereira Maciel, 2016. Monografia (Bacharel em Química Industrial) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, 2016.

CRUZ, G. J. F.; PIRILA, M.; MATEJOVA, L.; AINASSAARI, K.; SOLIS, J. L.; FAJGAR, R. et al. Two unconventional precursors to produce ZnCl₂ based activated carbon for water treatment applications. **Chemical Engineering Technology**, v. 41, n. 8, p. 1649-1659, 2018.

CRUZ, J. F.; VALDIVIEZO, G.; CARRIÓN, L.; RIMAYCUNA, J.; AINASSAARI, K.; GÓMEZ, M. M.; SOLIS, J. L.; KEISKI, R. L.; CRUZ, G. F. L. Production and characterization of activated carbon based on coffee husk residue for phosphate removal in aqueous solutions. **Journal of Physics**, v. 1173, n. 6596, p. 1-10, 2019.

CUI, X.; YANG, J.; SHI, X.; LEI, W.; HUANG, T.; BAI, C. Pelletization of sunflower seed husks: evaluating and optimizing energy consumption and physical properties by response surface methodology (RSM). **Process**, v. 7, n. 591, p. 1-20, 2019.

DADA, A. O.; ADEKOLA, F. A.; ODEBUNMI, E. O.; OGUNLAJA, A. S.; BELLO, O. S. Two-three parameters isotherm modeling, kinetics with statistical validity, desorption and thermodynamic studies of adsorption of Cu(II) ions onto zerovalent iron nanoparticles. **Scientific Reports**, v. 11, n. 16, p. 54-69, 2021.

DAI, L.; ZHOU, N.; DENG, W.; CHENG, Y.; WANG, Y.; LIU, Y.; COBB, K.; LEI, H.; CHEN, P.; RUAN, R. Recent advances in improving lignocellulosic biomass-based bio-oil production. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 149, n. 104, p. 845-852, 2020.

DAIEM, M. A.; ALOTAIBI, A. A.; ALOSIME, E. M.; ZAIDI, B.; SAID, N. Structural-property relationship in activated carbon synthesized from rice straw for electronic application. **Polish Journal of Environmental**, v. 29, n. 5, p. 3535-3547, 2020.

DANISH, M.; PIN, Z.; ZIYANG, L.; AHMAD, T.; MAJEED, S.; YAHYA, A. N. A.; KHANDAY, W. A.; KHALIL, H. P. S. A. Preparation and characterization of banana trunk activated carbon using H_3PO_4 activation: A rotatable central composite design approach. **Materials Chemistry and Physics**, v. 282, n. 12, p. 89-105, 2022.

DAO, T. M.; LUU, T. L. Synthesis of activated carbon from macadamia nutshells activated by H_2SO_4 and K_2CO_3 for methylene blue removal in water. **Bioresource Technology Reports**, v. 12, n. 10, p. 83-89, 2020.

DARWISH, A. A. A.; RASHAD, M.; AL-AOH, A. Methyl orange adsorption comparison on nanoparticles: Isotherm, kinetics, and thermodynamic studies. **Dyes and Pigments**, v. 1, n. 5, p. 16-25, 2019.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. 1 ed. EDIPUCRS: Porto Alegre, 2007.

DE'NOBILI, M. D.; BERNHARDT, D. C.; BASANTA, M. F.; ROJAS, A. M. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) seed hull waste: composition, antioxidant activity, and filler performance in pectin-based film composites. **Frontiers in Nutrition**, v. 8, n. 77, p. 1-14, 2021.

DEIVASIGAMANI, P.; KUMAR, P. S.; SUNDARAMAN, S.; SOOSAI, M. R.; RENITA, A. A.; KARTHIKEYAN, M.; BAKTENOV, N.; BAIGENZHENOV, O.; VENKATESAN, D.; KUMAR, A. J. Deep insights into kinetics, optimization and thermodynamic estimates of methylene blue adsorption from aqueous solution onto coffee husk (Coffee arabica) activated carbon. **Environmental Research**, v. 236, n. 116735, p. 1-14, 2023.

DELFINO, A. V. **Avaliação de materiais a base de quitosana para o uso como liberadores de compostos bioativos voláteis**. Orientador: Fabiane C. A. Galdino, 2018. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2018.

DESHPANDE, S.; MARATHE, R.; JAYBHAYE, H.; KAKDE, A.; DHOTE, V. Characterization of Lignocellulosic Biomass for Bioenergy: A Review. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 11, n. 5, p. 1-4, 2022.

DJAMA, C.; BOUGUETTOUCHA, A.; CHEBLI, D.; AMRANE, A.; TAHRAOUI, H.; ZHANG, X.; MOUNI, L. Experimental and theoretical study of methylene blue adsorption on a new raw material, *Cynara scolymus* – a statistical physics assessment. **Sustainability**, v. 15, n. 103, p. 64-90, 2023.

DUAN, D.; CHEN, D.; HUANG, L.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; XIAO, G.; ZHANG, W.; LEI, H.; RUAN, R. Activated carbon from lignocellulosic biomass as catalyst: a review of the applications in fast pyrolysis process. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 158, n. 105, p. 246-256, 2021.

DULIE, N. W.; WOLDEYES, B.; DEMSASH, H. D.; JABASINGH, A. S. An insight into the valorization of hemicellulose fraction of biomass into furfural: catalytic conversion and product separation. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 5, p. 31-52, 2021.

DUTRA, D. K. R. **Obtenção De Carvão Ativado A Partir Do Resíduo De Casca Do Eucalipto Branco**. Orientadora: Profa. Dra. Cláucia Fernanda Volken de Souza, 2021.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso II em Química Industrial) - Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, RS, 2021.

DUTTA, D.; ARYA, S.; KUMAR, S. Industrial wastewater treatment: current trend, bottlenecks, and best practices. **Chemosphere**, v. 285, n. 131, p. 245-257, 2021.

EBC. **European Biochar Certificate – Guidelines for a sustainable production of biochar**. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Suíça, 2012.

EBRAHIMIAN, E.; DENAYER, F. M. J.; AGHBASHLO, M.; TABATABAEI, M.; KARIMI, K. Biomethane and biodiesel production from sunflower crop: a biorefinery perspective. **Renewable Energy**, v. 200, n. 13, p. 52-61, 2022.

EGUCHI, T.; KANAMOTO, Y.; TOMIOKA, M.; TASHIMA, D.; KUMAGI, S. Effect of Ball Milling on the Electrochemical Performance of Activated Carbon with a Very High ELETROBRÁS. **Beneficiamento de grãos de café: uso produtivo e eficiente da energia elétrica**. In: Centros Comunitários de Produção. 2015.

ELMOUWAHIDI, A.; BAILON-GARCIA, E.; PEREZ-CADENAS, A.; MALDONADO-HODAR, F. J.; CARRASCO-MARIN, F. Activated carbons from KOH and H₃PO₄-activated of olive residues and its application as supercapacitor electrodes. **Electrochimica Acta**, v. 229, n. 2, p. 219-228, 20147.

ELKJALIFA, S.; AL-ANSARI, T.; MACKEY, H. R.; MCKAY, G. Food waste to biochars through pyrolysis: A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 144, n. 3, p. 310-320, 2019.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. (Org.): Paulo César Teixeira. 3 ed. Embrapa: Brasília, DF, 2017.

ESPINAL, L. Porosity and its measurement. In: **Characterization of Materials**. John Wiley & Sons, Inc.: EUA, 2012.

EZEALIGO, U. S.; EZEALIGO, B. N.; PLAZA, M. P.; DIM, E. N.; KEMAUSUOR, F.; ACHENIE, L. E. K. *et al.* Preliminary characterisation and valorisation of Ficus benjamina fruits for biofuel application. **Biomass Conversion and Biorefinery**. v. 13, n. 13395, p. 12643-12654, 2022.

EZZATI, R. Derivation of pseudo-first-order, pseudo-second-order and modified pseudo-first-order rate equations from langmuir and freundlich isotherms for adsorption. **Chemical Engineering Journal**, v. 392, n. 12, p. 1-12, 2020.

FARHADI, H.; KERAMATI, N. Investigation of kinetics, isotherms, thermodynamics and photocatalytic regeneration of exfoliated graphitic carbon nitride/zeolite as dye adsorbent. **Scientific Reports**, v. 13, n. 4, p. 98-111, 2023.

FARIAS B. M. **Investigação cinética da pirólise de biomassas amazônicas por termogravimetria**. Orientadora: Prof.^a Dr.^a Daniele Regina da Silva Guerra, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2020.

FARIAS, T. T.; OLIVEIRA, V.; LUCENA, D. V.; GADELHA, A. J. F.; ROCHA, C. O. Emprego do processo de adsorção para atenuação do teor de óleos e graxas (TOG) em efluentes de poços produtores de petróleo. **Revista Pincipia**, edição especial, v. 49, p. 122-128, 2020.

FARMA, R.; TANIA, Y.; APRIYANI, I. Conversion of hazelnut seed shell biomass into porous activated carbon with KOH and CO₂ activation for supercapacitors. **Materials Today: Proceedings**, v. 87, n. 5, p. 51-56, 2023.

FATIMA, A.; HANIF, M. A.; RASHID, U.; JILANI, M. I.; ALHARTHI, F. A.; HAN, J. Adsorption, modeling, thermodynamic and kinetic studies of acteray golden removal from polluted water using Sindh clay and quartz as low-cost adsorbents. **Separations**, v. 10, n. 538, p. 1-20, 2023.

FAWZY, M. A.; AL-YASI, H. M.; GALAL, T. M.; HAMZA, R. Z.; ABDELKADER, T. G.; ALI, E. F.; HASSAN, H. A. Statistical optimization, kinetic, equilibrium isotherm and thermodynamic studies of copper biosorption onto Rosa damascena leaves as a low-cost biosorbent. **Scientific Reports**, v. 12, n. 85, p. 500-519, 2022.

FERNANDES, J. C.; GAMERO, C. A.; RODRIGUES, J. G. L.; NASCIMENTO, F. M. Avaliação de diferentes sistemas de manejo no desenvolvimento da cultura do girassol. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 9, n. 1, p. 73-82, 2016.

FERRAZ, F. M.; YUAN, Q. Organic matter removal from landfill leachate by adsorption using spent coffee grounds activated carbon. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 23, n. 141, p. 1-6, 2020.

FERREIRA, V. A. **Aplicação de carvão ativado em pó como etapa de tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. Orientador: Juacyara Carbonelli Campos, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2019.

FERREIRA, V. S. **Pré-tratamento para a biomassa lignocelulósica utilizando processos fotocatalíticos**. Orientador: Sarah Silva Brum. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Química e Biológica) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

FERREIRA, R.; PETROVA, T.; FERREIRA, A. F.; COSTA, M.; INAYDENOVA, I.; ATASOVA-VLADIMIROVA, S.; RANGUELOV, B. Size-Segregated particulate matter from gasification of Bulgarian agro-forest biomass residue. **Energies**, v. 385, n. 14, p. 1-20, 2021.

FILHO, I. J. C. **Separação dos principais componentes do cavaco de eucalipto, hidrólise enzimática da celulose e caracterização das frações obtidas**. Orientador: George Jackson de Moraes Rocha, 2016. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Industrial) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PB, 2016.

FISCHER, H. C. V.; LIMA, L. S.; FELSNER, M. L.; QUINÁIA, S. P. Estudo da capacidade de adsorção de carvões ativados comerciais versus tempo de armazenamento. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1090-1099, 2019.

FISCHER, T.; KRETZSCHMAR, A.; SELMERT, V.; JOVANOVIC, S.; KUNGL, H.; TEMPEL, H.; EICHEL, R. A. Post treatment strategies for pyrophoric KOH activated carbon nanofibers. **RSC Advances**, v. 14, n. 3845, p. 1-12, 2024.

FLETCHER, A.; SOMORIN, T.; ALADEOKIN, O. Production of high surface area activated carbon from peanut shell by chemical activation with zinc chloride: optimization and characterization. **BioEnergy Research**, v. 17, n. 4, p. 67-78, 2024.

FRAGA, A. C. **Valorização de matérias primas residuais: geração de adsorventes e catalisadores**. Orientador: Eduardo Falabella Sousa-Aguiar, 2013. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

FRANQUETO, R.; SILVA, J. D.; STARICK, E. K.; JACINTO, C. F. S. Anaerobic codigestion of bovine manure and banana tree leaf: the effect of temperature variability on biogas yield in different proportions of waste. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 14, p. 44-58, 2020.

FROLOV, S. M.; SILANTIEV, A. S.; SADYKOV, I. A.; SMETANYUK, V. A.; FROLOV, F. S.; HASIAK, Y. K. *et al.* Composition and Textural Characteristics of Char Powders Produced by Thermomechanical Processing of Sunflower Seed Husks. **Powders**, v. 2, n. 3390, p. 624-638, 2023.

FU, J.; KANG, Q.; AO, W.; WAHAB, N.; MAO, X.; RAN, C.; LIU, Y.; LIU, G.; ELLIS, N.; DAI, J. Comparison and analysis of one- and two-step activation for preparation of activated carbon from furfural residues. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 4, p. 681-694, 2023.

FU, J.; KANG, Q.; AO, W.; WAHAB, N.; MAO, X.; RAN, C.; LIU, Y.; LIU, G.; ELLIS, N.; DAI, J. Comparison and analysis of one- and two-step activation for preparation of activated carbon from furfural residues. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 46, p. 81-94, 2023.

FUKUMOTO, A. A. F.; KURODA, E. K. Selection of activated carbons for adsorption of microcystins. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 295-304, 2019.

GAJERAA, Z. R.; VERMAA, K.; TEKADEB, S. P.; SAWARKAR, A. N. Kinetics of co-gasification of rice husk biomass and high sulphur petroleum coke with oxygen as gasifying medium via TGA. **Bioresource Technology Reports**, v. 11, n. 100479, p. 1-10, 2020.

GAMA, B. M. V. **Adsorção dos íons cádmio e cobre em adsorventes preparados a partir de cascas de amendoim**. Orientador: Marta Maria Menezes Bezerra Duarte, 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PB, 2021.

GAMAL, M. E.; MOUSA, H. A.; EL-NAAS, M.; ZACHARIA, R.; JUDD, S. Bio-regeneration of activated carbon: a comprehensive review. **Separation and Purification Technology**, v. 197, n. 3, p. 45-59, 2018.

GANDARIASBEITIA, M.; LOPEZ-PEREZ, J. A.; JUARISTI, B.; LARREGLA, S. Sunflower seed husk as promising by product for soil biodisinfestation treatments and fertility improvement in protected lettuce crop. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, n. 90, p. 1654-1667, 2022.

GANJOO, R.; SHARMA, S.; KUMAR, A.; DAOUDA, M. M. A. **Activated carbon: fundamentals, classification and properties**. In: VERMA, C.; QURASHI, M. A. 1 ed., p. 22. Londres: Royal Society of Chemistry, 2023.

GARCÍA-GONZALEZ, P. Activated carbon from lignocellulosic precursors: a review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 18, p. 1393-1414, 2018.

GAUR, V. K.; SHARMA, P.; SIROHI, R.; AWASTHI, M. K.; DUSSAP, C. G.; PANDEY, A. Assessing the impact of industrial waste on environment and mitigation strategies: a comprehensive review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 395, n. 12, p. 19-32, 2020.

GELETUKHA, G.; DRAHNIEV, S.; ZHELIEZNA, T.; BASHTOVYI, A. **Prospects of sunflower residues use for energy**. 1ed. Bioenergy Association of Ukraine: Ukraine, 2020.

GETACHEW, T.; HUSSEN, A.; RAO, V. M. Defluoridation of water by activated carbon prepared from banana (*Musa paradisiaca*) peel and coffee (*Coffea arabica*) husk. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 12, n. 45, p. 1857-1866, 2015.

GILPAVAS, E.; CORREA-SANCHEZ, S. Assessment of the optimized treatment of indigo-polluted industrial textile wastewater by a sequential electrocoagulation activated carbon adsorption. **Journal of Water Process Engineering**, v. 36, n. 101, p. 306-318.

GLUBA, L.; RAFALSKA-PRZYSUCHA, A.; SZEWCZAK, K.; LUKOWSKI, M.; SZLAZAK, R.; VITKOVÁ, J. et al. Effect of fine size-fractionated sunflower husk biochar on water retention properties of arable sandy soil. **Materials**, v. 14, n. 13, p. 1-15, 2021.

GOHR, M. S.; ABD-ELHAMID, A. I.; EL-SHANSHORY, A. A.; SOLIMAN, H. M. A. Adsorption of cationic dyes onto chemically modified activated carbon: kinetics and thermodynamic study. **Journal of Molecular Liquids**, v. 346, n. 11, p. 27-39, 2022.

GOLÇALVES, M.; GUERREIRO, M. C.; OLIVEIRA, L. C. A.; CASTRO, C. S. A friendly environmental material: iron oxide dispersed over activated carbon from coffee husk for organic pollutants removal. **Journal of Environmental Management**, v. 127, n. 4797, p. 206-2011, 2013.

GOMEZ, I. C.; CRUZ, O. F.; SILVESTRE-ALBERO, J.; RAMBO, C. R.; ESCANDELL, M. M. Role of KCl in activation mechanisms of KOH chemically activated high surface area carbons. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 66, n. 102, p. 258-267, 2022.

GONÇALVES, A. C.; ZIMMERMANN, J.; SCWANTES, D.; OLIVEIRA, V. H. D.; DUDCZAK, F. C.; TARLEY, C. R. T.; PRETE, M. C.; SNAK, A. Recycling of tobacco wastes in the development of ultra-high surface area activated carbon. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 171, n. 105, p. 965-976, 2023.

GONÇALVES, M.; GUERREIRO, M. C.; OLIVEIRA, L. C. A.; SOLAR, C.; NAZARRO, M.; SAPAG, K. Micro mesoporous activated carbono from coffee husk as biomass waste for environmental applications. **Waste Biomass Valor**, v. 4, n. 64, p. 395-400, 2013.

GOULART, A. K. **Análise das tecnologias de pré-tratamento das biomassas lignocelulósicas**. Orientador: Peter Rudolf Seidl, 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

GUO, T.; ZHANG, Y.; CHEN, J.; LIU, W.; GENG, Y.; BEDANE, A. H. *et al.* Investigation of CO₂ adsorption on nitrogen-doped activated carbon based on porous structure and surface acid-base sites. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 53, n. 103925, p. 1-18, 2024.

GUO, X.; WANG, J. Comparison of linearization methods for modeling the Langmuir adsorption isotherm. **Journal of Molecular Liquids**, v. 296, n. 11, p. 1-8, 2019.

GUO, X.; WANG, J. Comparison of linearization methods for modeling the Langmuir adsorption isotherm. **Journal of Molecular Liquids**, v. 296, n. 18, p. 50-58, 2019.

GUPTA, N.; MAHUR, B. K.; IZRAYEEL, A. M. D.; AHUJA, A.; RASTOGI, V. K. Biomass conversion of agricultural waste residues for different applications: a comprehensive review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 73, p. 622-647, 2022.

GUTIERREZ, S.; MANGONE, F.; VERGARA, P.; GONZALEZ, V.; FERREIRA, J. P.; VILLAR, J. C.; GARVIA-CHOA, F. Lignocellulosic biomass pre-treatment by diluted sulfuric acid and ethanol water mixture: a comparative techno-economic analysis. **Bioresource Technology Reports**, v. 23, n. 101, p. 514-526, 2023.

HALDAR, D.; PURKAIT, M. K. A review of the environment friendly emerging techniques for pretreatment of lignocellulosic biomass: mechanistic insight and advancements. **Chemosphere**, v. 264, n. 12, p. 523-539, 2021.

HALDER, P.; KUNDU, S.; PATEL, S.; SETIAWAN, A.; ATKIN, R.; PARTHASARTHY, R. PAZ-FERREIRO, J.; SURAPANEMI, A.; SHAH, K. Progress on the pre-treatment of lignocellulosic biomass employing ionic liquids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, n. 2, p. 68-92, 2019.

HAN, T.; YANG, W.; JONSSON, P. G. Pyrolysis and subsequent steam gasification of metal dry impregnated lignin for the production of H₂-rich syngas and magnetic activated carbon. **Chemical Engineering Journal**, v. 394, n. 12, p. 902-912, 2020.

HANIF, S.; IQBAL, N.; NOOR, T.; ZAMAN, N.; VIGNAROOBAN, K. Electrocatalytic study of NiO-MOF with activated carbon composites for methanol oxidation reaction. **Scientific Reports**, v. 11, n. 17, p. 192-203, 2021.

HARABI, S.; GUIZA, S.; ALVAREZ-MONTERO, A.; GOMEZ-AVILES, A.; BAGANÉ, M.; BELVER, C.; BEDIA, J. Adsorption of pesticides on activated carbons from peach stones. **Processes**, v. 12, n. 238, p. 1-17, 2024.

HARIMISA, G. E.; JUSOH, N. W. C.; TAN, L. S.; SHAMELI, K.; GHAFAR, N. A.; MASUDI, A. Synthesis of potassium hydroxide-treated activated carbon via one-step activation method. **Journal of Physics**, v. 22, n. 9, p. 1-7, 2022.

HAVRYSH, V.; KALINICHENKO, A.; PYSARENKO, P.; SAMOJLIK, M. Sunflower residues-based biorefinery: circular economy indicators. **Processes**, v. 11, n. 630, p. 1-14, 2023.

HENDRAWAN, Y.; SAJIDAH, N.; UMAM, C.; FAUZY, M. R.; WIBISONO, Y.; HAWA, L. C. Effect of Carbonization Temperature Variations and Activator Agent Types on Activated Carbon Characteristics of Sengon Wood Waste (*Paraserianthes falcata* (L.) Nielsen). **Earth and Environmental Science**, v. 3, n. 2, p. 1-7, 2019.

HENRIQUE, M. A. **Estudo cinético da decomposição térmica de nanocristais de celulose de caroço de manga, eucalipto e celofane**. Orientador: Daniel Paquini, 2014. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.

HEYLMANN, K. K.; LOPES, B. V.; AFONSO, T. F.; DEMARCO, C. F.; JUNIOR, T. R. C.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêsego no tratamento de efluente têxtil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 485-494, 2021.

HGEIG, A.; NOVAKOVIC, M.; MIHAJLOVIC, I. Sorption of carbendazim and linuron from aqueous solutions with activated carbon produced from spent coffee grounds: Equilibrium, kinetic and thermodynamic approach. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 36, n. 1, p. 1-11, 2019.

HORAK, J.; BILAN, Y.; DANKEVUCH, A.; NITSENKO, V.; KUCHER, A.; STREIMIKIENE, D. Bioenergy production from sunflower husk in Ukraine: potential and necessary investments. **Journal of Business Economics and Management**, v. 24, n. 1, p. 1-19, 2023.

HÖRLLE, G. **Aplicação de carvão ativado no tratamento de efluente industrial**. Orientador: Ângela Beatrice Dewes Moura, 2019. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Feevale, Nova Hamburgo, RS, 2019.

HOSSEN, M. R.; TALBOT, M. W.; KENNARD, R.; BOUSFIELD, D. W.; MASON, M. D. A comparative study of methods for porosity determination of cellulose based porous materials. **Cellulose**, n. 27, v. 6, p. 6849-6860, 2020.

HU, Q.; WANG, Q.; FENG, C.; ZHANG, Z.; LEI, Z.; SHIMIZU, K. Insights into mathematical characteristics of adsorption models and physical meaning of corresponding parameters. **Journal of Molecular Liquids**, v. 254, n. 2, p. 20-25, 2018.

HUANG, B.; BARTHOLOMEW, C. H.; WOODFIELD, B. F. Improved calculations of pore size distribution for relatively large, irregular slit-shaped mesopore structure. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 184, n. 15, p. 112-121, 2014.

HUBETSKA, T.; KOBYLINSKA, N. G.; GARCIA, J. R. Sunflower biomass power plant by-products: properties and its potential for water purification of organic pollutants. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 157, n. 10, p. 237-249, 2021.

HUEBRA, L. S. **Avaliação da utilização da casca de café para a produção de um derivado celulósico**. Orientador: Carla da Silva Meireles, 2016. Monografia (Licenciatura em Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, 2016.

HUSIEN, S.; EL-TAWEEL, R. M.; SALIM, A. I.; FAHIM, I. S.; SAID, L. A.; RADWAN, A. G. Review of activated carbon adsorbent material for textile dyes removal: Preparation, and modelling. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 5, n. 10, p. 325-340, 2022.

HUSIEN, S.; EL-TAWEEL, R.; SALIM, A. I.; FAHIM, I. S.; SAID, L. A.; RADWAN, A. G. Review of activated carbon adsorbent material for textile dyes removal: preparation, and modelling. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 5, n. 10, p. 325-340, 2022.

HUSSAIN, O. A.; HATHOUT, A. S.; ABDEL-MOBDY, Y.; RASHED, M. M.; RAHIM, E. A. A.; FOUZY, A. S. M. Preparation and characterization of activated carbon from agricultural wastes and their ability to remove chlorpyrifos from water. **Toxicology Reports**, v. 10, n. 23, p. 146-154, 2023.

IBRAHIM, S. B.; LIRA, R. C.; SANTOS, E. L.; AMORIM, E. L. C.; BELEM, T. J. L.; MACEDO, W. V. *et al.* Biodigestão anaeróbia do bagaço de cana-de-açúcar pré-tratado e utilizando excretas de frango como inóculo. **PUBVET**, v. 11, n. 12, p. 1254-1262, 2017.

KUKHARETS, V. et al. An Algorithm for Managerial Actions on the Rational Use of Renewable Sources of Energy: Determination of the Energy Potential of Biomass in Lithuania. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 548, 3 jan. 2023.

ILLINGWORTH, J. M.; RAND, B.; WILLIAMS, P. T. Understanding the mechanism of two-step, pyrolysis-alkali chemical activation of fibrous biomass for the production of activated carbon fibre matting. **Fuel Processing Technology**, v. 235, n. 107, p. 348-368, 2022.

ISINKARALAR, K.; GULLU, G.; TURKYILMAZ, A. Experimental study of formaldehyde and BTEX adsorption onto activated carbon from lignocellulosic biomass. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 42, p. 79-89, 2023.

ISLAM, M. N.; KHAN, N.; MALIK, A. K.; RAHMAN, M. M. Preparation of bio inspired trimethoxysilyl group terminated poly(1-vinylimidazole)-modified-chitosan composite for adsorption of chromium(VI) ions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 379, n. 12, p. 92-103, 2019.

ISLAM, M.; ISLAM, M.; MITTAL, H.; ALILI, A. A.; ALHASSAN, S. Capturing water vapors from humid air using microporous activated carbon derived from sunflower seed shells. **Powder Technology**, v. 428, n. 11, p. 90-102, 2023.

ISLAMOVA, S.; KARAEVA, J.; TIMOFEEVA, S.; KADYIROV, A. An experimental study of sunflower husk pellets combustion. **BIO Web of Conferences**, v. 37, n. 00070, p. 1-5, 2021.

JAIME, F. K. L. **Avaliação de tratamentos térmicos e químicos na preparação de carvão ativado a partir de borra de café na adsorção de cafeína em meio aquoso**. Orientador:

Adriana França, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2016.

JAWAD, A. H.; ABDULHAMEED, A. S.; BHRUDIN, N. N.; HUM, N. N. M.; SURIP, S. N.; SYED-HASSAN, S. S. A.; YOUSIF, E.; SABAR, S. Microporous activated carbon developed from KOH activated biomass waste: surface mechanistic study study of methylene blue dye adsorption. **Water Science & Technology**, v. 84, n. 8, p. 1858-1873, 2021.

JENSEN, C. U.; GUERRERO, J. K. R.; KARATZOS, S.; OLOFSSON, G.; IVERSEN, S. B. Fundamentals of hydrofaction: renewable crude oil from woody biomass. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 7, n. 4, p. 95-110, 2017.

JEWIARZ, M.; WROBEL, M.; MUDRYK, K.; SZUFA, S. Impact of the drying temperature and grinding technique on biomass grindability. **Energies**, v. 13, n. 3392, p. 1-22, 2020.

JIANG, Z.; LOU, Y.; LIU, X.; SUN, W.; WANG, H.; LIANG, J. *et al.* Combined application of coffee husk compost and inorganic fertilizer to improve the soil ecological environmental and photosynthetic characteristics of arabica coffee. **Agronomy**, v. 13, n. 1212, p. 1-19, 2023.

JIANGA, X.; GUOA, F.; JIAA, X.; ZHANA, Y.; ZHOUA, H.; QIANB, L. Synthesis of nitrogen-doped hierarchical porous carbons from peanut shell as a promising electrode material for high-performance supercapacitors. **Journal os Energy Storage**. v. 30, n. 101451, p. 1-11, 2020.

JIS. **Test methods for activated carbon (JIS K 1474)**. Japanese Industrial Standard: 2007.

JJAGWE, J.; OLUPOT, P. W.; MENYA, E.; KALIBBALA, H. M. Synthesis and application of granular activated carbon from biomass waste materials for water treatment: a review. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 9, n. 3, p. 2-30, 2021.

JUNG, K. W.; CHOI, B. H.; HWANG, M. J.; CHOI, J. W.; LEE, S. H.; CHANG, J. S.; AHN, K. H. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, n. 3, p. 60-68, 2017.

KALIYAPERUMAL, G.; NEDUNCHEZHIAN, M.; NATESAN, P.; POURES, M. V.; ARUANACHALAM, S.; RATHINAVELU, V.; SUBBAIYAN, N. Recycle of bio-waste banana and sisal fiber filled harmless epoxy hybrid composite for automotive roof application. **Environmental Quality Management**, v. 33, n. 1, p. 165-171, 2023.

KAMINSKA, A.; MIADLICKI, P.; KIELBASA, K.; KUJBIDA, M.; SRENSCEK-NAZZAL, J.; WROBEL, R. J.; WROBLEWSKA, A. Activated carbons obtained from orange peels, coffee grounds, and sunflower husks – comparison of physicochemical properties and activity in the alpha-pinene isomerization process. **Materials**, v. 14, n. 7448, p. 1-27, 2021.

KANG, K.; NANDA, S.; SUN, G.; QIU, L.; GU, Y.; ZHANG, T. *et al.* Microwave-assisted hydrothermal carbonization of corn stalk for solid biofuel production: Optimization of process parameters and characterization of hydrochar. **Energy**. v. 186, n 115795, p. 1-11, 2019.

KARAKEHYA, N. Effects of one-step and two-step KOH activation method on the properties and supercapacitor performance of highly porous activated carbons prepared from Lycopodium clavatum spores. **Diamond & Related Materials**, v. 135, n. 10, p. 873-884, 2023.

KASSAHUN, E.; TIBEBU, S.; TADESSE, Y.; AWISH, N. Synthesis optimization of activated carbon driven from scrap tire for adsorbent yield and methylene blue removal under response surface methodology. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 22, n. 2, p. 1-13, 2022.

KASSIMI, A. E.; ACHOUR, Y.; HIMRI, M. E.; LAAMARI, M. R.; HADDAD, M. E. Optimization of preparation conditions of highly efficient activated carbon for use in water treatment – experimental design approach. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 20, n. 8, p. 1-22, 2020.

KAZMI, B.; TAQVI, S. A. A.; NAQVI, S. R.; MIRANI, A. A.; SHAHBAZ, M.; NAQVI, M.; JUCHELKOVA, D.; ELDESOKY, G. E. Techno-economic assessment of sunflower husk pellets treated with waste glycerol for the bio-hydrogen production – a simulation-based case study. **Fuel**, v. 348, n. 128, p. 635-645, 2023.

KHAN, S. U.; ISLAM, D. T.; FAROOQI, I. H.; AYUB, S.; BASHEER, F. Hexavalent chromium removal in an electrocoagulation column reactor: Process optimization using CCD, adsorption kinetics and pH modulated sludge formation. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 122, n. 1, p. 18-30, 2019.

KIGGUNDU, N.; SITTAMUKYOTO, J. Pyrolysis of coffee husks for biochar production. **Journal of Environmental Protection**, v. 10, n. 15, p. 53-64, 2019.

KISHIBAYEV, K. K.; SERAFIN, J.; TOKPAYEV, R. R.; KHAVAZA, T. N.; ATCHABAROVA, A. A.; ABDUAKHYTOVA, D. A.; IBRAIMOV, Z. T.; SRENSCEK-NAZZAL, J. Physical and chemical properties of activated carbon synthesized from plant wastes and shungite for CO₂ capture. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 798-812, 2021.

KLIMEK-KOPYRA, A.; SADOWSKA, U.; KUBON, M.; GLINIAK, M.; SIKORA, J. Sunflower husk biochar as a key agrotechnical factor enhancing sustainable soybean production. **Agriculture**, v. 11, n. 305, p. 1-14, 2021.

KOCHITO, J.; GURE, A.; ABDISSA, N.; BEYENE, T. T.; FEMI, O. E. MnOx-Coffea arabica Husk and Catha edulis Leftover Biochar Nanocomposites for Removal of Methylene Blue from Wastewater. **The Scientific World Journal**, v. 24, n. 7, 1-17, 2024.

KOKULNATHAN, T.; SRIRAM, B.; PANDIYARAJAN, S.; RAMANATHAN, S.; PRIYA, T. S. Introduction to biowaste-derived materials. **Biomass-Derived Carbon Materials: Production and Applications**, v. 413, n. 2, p. 16-28, 2024.

KOMARNICKA, A.; MURAWSKA, A. Comparison of consumption and renewable sources of energy in European union countries – sectoral indicators, economic conditions and environmental impacts. **Energies**, v. 14, n. 3714, p. 1-24, 2021.

KONG, L.; ADIDHARMA, H. A new adsorption model based on generalized van der Waals partition function for the description of all types of adsorption isotherms. **Chemical Engineering Journal**, v. 375, n. 12, p. 112-120, 2019.

KONNERTH, P.; JUNG, D.; STRATEN, J. W.; RAFFELT, K.; KRUSE, A. Metal oxide-doped activated carbons from bakery waste and coffee grounds for application in supercapacitors. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 4, n. 1, p. 69-80, 2021.

KORANYI, T. I.; FRIDRICH, B.; PINEDA, A.; BARTA, K. Development of lignin-first approaches for the valorization of lignocellulosic biomass. **Molecules**, v. 25, n. 28, p. 15-37, 2020.

KÖSE, K. O.; PISKIN, B.; AYDINOL, M. K. Chemical and structural optimization of ZnCl_2 activated carbons via high temperature CO_2 treatment for EDLC applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 18, p.607-6016, 2018.

KUKHARETS, V.; JUOCIUNIENE, D.; HUTSOL, T.; SUKMANIUK, O.; CESNA, J.; KUKHARETS S. *et al.* An algorithm for managerial actions on the rational use of renewable sources of energy: determination of the energy potential of biomass in Lithuania. **Energies**, v. 16, n. 548, p. 1-17, 2023.

KUMAR, A.; JENA, H. M. High surface area microporous activated carbons prepared from Foz nut (*Euryale ferox*) shell zinc chloride activation. **Applied Surface Science**, v. 356, n. 7, p. 53-61, 2015.

KUMAR, M.; XIONG, X.; WAN, Z.; SUN, Y.; TSANG, D. C. W.; GUPTA, J.; GAO, B.; CAO, X.; TANG, J.; OK, Y. S. Ball milling as a mechanochemical technology for fabrication of novel biochar nanomaterials. **Bioresource Technology**, v. 312, n. 123, p. 613-625, 2020.

KUMARI, D.; SINGH, R. Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, n. 8, p. 77-91, 2018.

KUNUSA, W. R.; IYABU, H.; ABDULLAH, R. FT-IR, SEM and XRD analysis of activated carbon from sago wastes using acid modification. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 3, n. 8, p. 1-12, 2021.

KWIATKOWSKI, M.; SERAFIN, J.; BOOTH, A. M.; MICHALKIEWICZ, B. Computer analysis of the effect of activation temperature on the microporous structure development of activated carbon derived from common polypody. **Material**, v. 14, n. 51, p. 1-10, 2021.

LAKSACI, H.; KHELIFI, A.; BELHAMDI, B.; TRARI, M. Valorization of coffee grounds into activated carbon using physic-chemical activation by KOH/CO_2 . **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 50, p. 61-66, 2017.

LALTHA, M.; SEWSYNKER-SUKAI, Y.; GUEGUIM, K. E. B. Development of microwave-assisted alkaline pretreatment methods for enhanced sugar recovery from bamboo and corn cobs: process optimization, chemical recyclability and kinetics of bioethanol production. **Industrial Crops & Products**, v. 174, n. 11, p. 166-178, 2021.

LARASATI, A.; FOWLER, G. D.; GRAHAM, N. J. D. Insights into chemical regeneration of activated carbon for water treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 10, p. 55-66, 2021.

LEE, C. L.; CHIN, K. L.; H'NG, P. S.; RASHID, U.; MAMINSKI, M.; KHOO, P. S. Effect of pretreatment conditions on the chemical–structural characteristics of coconut and palm kernel shell: A potentially valuable precursor for eco-efficient activated carbon production. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, n. 10, p. 309-325, 2021.

LEE, S.; NA, S.; ROGERS, O. G.; YOUN, S. Quantifying surface morphology of manufactured activated carbon and the waste coffee grounds using the getis-ord-gi statistic and Ripley's K function. **Scientific Reports**, v. 11, n. 7, p. 543-552, 2021.

LENG, L.; HUANG, H.; LI, H.; LI, J.; ZHOU, W. Biochar stability assessment methods: A review. **Science of the Total Environment**, v. 647, n. 12, p. 210-222, 2019.

LEON, M.; SILVA, J.; CARRASCO, S.; BARRIENTOS, N. Design, Cost Estimation and Sensitivity Analysis for a Production Process of Activated Carbon from Waste Nutshells by Physical Activation. **Processes**, v. 8, n. 945, p. 1-14, 2020.

LERMEN, A. M. **Adsorção do corante azul de metileno em carvão ativado produzido a partir da pinha de Pinus taeda**. Orientador: Bruno München Wenzel, 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, RS, 2017.

LEWOYEHU, M. Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 159, n. 105, p. 279-296, 2021.

LI, J.; DONG, X.; LIU, X.; XU, X.; DUAN, W.; PARK, J.; GAO, L.; LU, Y. Comparative Study on the Adsorption Characteristics of Heavy Metal Ions by Activated Carbon and Selected Natural Adsorbents. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 1-17, 2022.

LI, S.; HAN, K.; LI, J.; LI, M.; LU, C. Preparation and characterization of super activated carbon produced from gulfweed by KOH activation. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 243, n. 4, p. 291-300, 2017.

LI, S.; TAN, X.; LI, H.; GAO, Y.; WANG, Q.; LI, G.; GUO, M. Investigation on pore structure regulation of activated carbon derived from sargassum and its application in supercapacitor. **Scientific Reports**, v. 16, n. 10106, p. 1-17, 2022.

LI, Z.; LI, Y.; ZHU, J. Straw-based activated carbon: optimization of the preparation procedure and performance of volatile organic compounds adsorption. **Materials**, v. 14, n. 3, p. 32-48, 2021.

LIAO, M.; KELLEY, S. S.; YAO, Y. Artificial neural network based modeling for the prediction of yield and surface area of activated carbon from biomass. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 13, n. 10, p. 1015-1027, 2019.

LIM, H. K.; ALI, U. F. M.; AHMAD, R.; AROUA, M. K. Adsorption of carbon dioxide (CO₂) by activated carbon derived from waste coffee grounds. **Earth and Environmental Science**, v. 7, n. 5, p. 1-10, 2021.

LIMA, E. A. **Obtenção e caracterização de lignina kraft utilizando resíduos industriais**. Orientador: Fabrício Maestá Bezerra, 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, PR, 2023.

LIMA, A. F. V. **Compósitos de cobaltitas/carvão ativo aplicados como eletrocatalisadores na reação de evolução de oxigênio**. Orientador: Fausthon Fred da Silva, 2021. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2021.

LIMA, I. S. **Pré-tratamento organossolve da biomassa de eucalipto utilizando glicerina bruta**. Orientador: Ricardo Reis Soares, 2019. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

LIMA, N. B., PADILHA, A. F. **Difração de raios X: uma introdução para iniciantes**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2022.

LIMA, W. C.; OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. Adsorption of phenylalanine from aqueous solutions using activated carbon from sunflower meal functionalized with sulfonic groups. **Foods**, v. 11, n. 3427, p. 1-27, 2022.

LIPPENS, B. C.; BOER, J. H. Studies on pore systems in catalysts V. the t method. **Journal of Catalysis**, v. 4, p. 319-323, 1965.

LIU, F.; XUAN, G.; AI, L.; LIU, Q.; YANG, L. Key factors that affect catalytic activity of activated carbon-based catalyst in chemical looping methane decomposition for H₂ production. **Fuel Processing Technology**, v. 215, n. 10, p. 745-754, 2021.

LIU, K.; OSTADHASSAN, M.; ZOU, J.; GENTZIS, T.; REZAEI, R.; BUBACH, B.; CARVAJAL-ORTIZ, H. Multifractal analysis of gas adsorption isotherms for pore structure characterization of the Bakken Shale. **Fuel**, v. 219, n. 3, p. 296-311, 2018.

LIU, Y.; XU, X.; QU, B.; LIU, X.; YI, W.; ZHANG, H. Study on adsorption properties of modified corn cob activated carbon for mercury ion. **Energies**, v. 14, n. 4483, p. 1-22, 2021.

LIZA, Y. F. A.; TAPIA, F. C.; ESPINOZA, R. F. R.; URQUIZA, R. J.; CASTAÑEDA, R. R. L.; CANTA, J. J. P. *et al.* Study of coffee husk (*Coffea arabica* L.) activated carbon in the treatment of aquifer water: adsorption of turbidity, colour and metals (iron-manganese). **Chemical Engineering Transactions**, v. 89, n. 3303, p. 655-661, 2021.

LLERENA, G. A.; LÁZARO, W. R. Adsorption of cyanide contained in aqueous solution using activated carbon obtained from coffee residue: adsorption efficiency, equilibrium and kinetic models. **Global Journal of Science Frontier Research**, v. 20, n. 1, p. 2-14, 2020.

LOBATO-PERALTA, D. R.; DUQUE-BRITO, E.; VILLAFAN-VIDALES, H. I.; LONGORIA, A.; SEBASTIAN, P. J.; CUENTAS-GALLEGOS, A. K.; ARANCIBIA-

LOBO, W. V. **Aplicação de resíduos da produção de polpa do açaí (*Euterpe oleracea* mart.) como bioadsorvente no tratamento de efluentes sintéticos.** Orientador: Flávio Augusto de Freitas, 2023. Dissertação (Mestrado em Química de Materiais e Interfaces) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 2023.

LOPES, W. S.; VILLAR, S. B. B. L.; RAMOS, R. O.; CEBALLOS, B. S. O.; LEITE, V. D.; SOUSA, J. T. Adsorção de microcistin-lr por carvão ativado granular produzido a partir de casca de coco de dendê. **Revista Aidis**, v. 11, n. 3, p. 319-331, 2018.

LOTFI, S.; YAZIDI, A.; TAAMALLI, S.; BONILLA-PETRICIOLET, A.; LOUIS, F.; BAKALI, A. E. *et al.* Adsorption of 3-aminophenol and resorcinol on avocado seed activated carbon: mathematical modelling, thermodynamic study and description of adsorbent performance. **Journal of Molecular Liquids**, v. 342, n. 116952, p. 1-7, 2021.

LOU, T.; YAN, X.; WANG, X. Chitosan coated polyacrylonitrile nanofibrous mat for dye adsorption. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 135, n. 9, p. 19-25, 2019.

LU, Y.; HE, Q.; FAN, G.; CHENG, Q.; SONG, G. Extraction and modification of hemicellulose from lignocellulosic biomass: a review. **Green Processing and Synthesis**, v. 21, n. 10, p. 779-804, 2021.

LUJAN-FACUNDO, M. J.; IBORRA-CLAR, M. I.; MENDOZA-ROCA, J. A.; ALCAINA-MIRANDA, M. I. Pharmaceutical compounds removal by adsorption with commercial and reused carbon coming from a drinking water treatment plant. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, n. 11, p. 66-75, 2019.

LUO, M.; CHEN, J.; LI, Q.; WANG, Y. Cotton-based activated carbon fiber with high specific surface area prepared by low-temperature hydrothermal carbonization with urea enhancement. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 62, n. 8, 44-53, 2023.

LÜTKE, S. F.; **Produção de carvão ativado a partir do bagaço de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) e sua aplicação como adsorvente.** Orientador: Tito Roberto Sant'Anna Cadaval Junior, 2016. Monografia (Bacharel em Química) – Universidade Federal do Rio de Grande, Rio Grande, RS, 2016.

MABROZ, F.; MACDONALD, T. J.; MARTIS, V.; PARKIN, P. Evaluation of the bet theory for the characterization of meso and microporous MOFs. **Small Methods**, v. 2, n. 1, p. 1-17, 2018.

MACEDO, K. R.; LIMA, C. K. M.; FILHO, L. F. S. **Métodos de tratamento de efluentes gerados pela indústria têxtil: uma revisão bibliográfica.** Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, RN, 2019.

MACHADO, C. R. A. **Estudos dos mecanismos atuantes no tratamento de efluentes pelo processo de lodos ativado combinado com carvão ativado.** Orientador: Juacyara Carbonelli Campos, 2016. Tese (Doutorado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

MAGALHÃES, A. L. L. **Carvão ativado de casca de laranja aplicado como suporte catalítico para vanádio.** Orientador: Mariana de Mattos Vieira Mello Souza, 2018.

Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

MAGALHÃES, L. A. **Desenvolvimento de metodologia para determinação de sílica cristalina respirável para particulado de minério brasileiro por difração de raios X.** Orientadora: Maria Irene Yoshida, 2014. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014.

MAGOMEDBEKOV, E. P.; MERKUSHKIN, A. O.; POKALCHUK, V. S.; OBRUCHIKOV, A. O.; LUKIANCHIKOV, I. Y.; CHEPURNOV, A. S.; VANINA, E. A. Calculation of the Henry's constant and the thickness of the equilibrium adsorption layer of radon in the layer-by-layer measurement of the sorbent activity. **Energies**, v. 15, n. 9569, p. 1-17, 2022.

MAGUANA, Y. E.; ELHADIRI, N.; BENCHANAA, M.; CHIKRI, R. Activated carbon for dyes removal: modeling and understanding the adsorption process. **Journal of Chemistry**, v. 20, n. 2, p. 1-9, 2020.

MAGUANA, Y. E.; ELHADIRI, N.; BOUCHDOUG, M.; BENCHANAA, M. Study of the influence of some factors on the preparation of activated carbon from walnut cake using the fractional factorial design. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 10, p. 93-99, 2018.

MAJD, M. M.; KORDZADEH-KERMANI, V.; GHALANDARI, V.; ASKARI, A.; SILLANPAA, M. Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010–2020). **Science of the Total Environment**, v. 812, n. 15, p. 1-28, 2022.

MALIK, M. A.; SAINI, C. S. Engineering properties of sunflower seed: effect of dehulling and moisture content. **Cogent Food & Agriculture**, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2016.

MALKI, M. A.; YASER, A. Z.; HAMZAH, M. A. A. M.; ZAINI, M. A. A.; LATIF, N. A.; HASMONI, S. H.; ZAKARIA, Z. A. Date Palm Biochar and Date Palm Activated Carbon as Green Adsorbent—Synthesis and Application. **Current Pollution Reports**, v. 9, n. 3, p. 74-90, 2023.

MAMNI, A.; RAMIREZ, N.; DEIANA, C.; GIMENEZ, M.; SARDELLA, F. Highly microporous sorbents from lignocellulosic biomass: Different activation routes and their application to dyes adsorption. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 10, p. 48-56, 2019.

MANASA, P.; LEI, Z. J.; RAN, F. Biomass waste derived low cost activated carbon from *Carcharias olitorius* (Jute Fiber) as sustainable and novel electrode material. **Journal of Energy Storage**, v. 30, n. 10, p. 94-105, 2020.

MANDEEP; GUPTA, G. K.; SHUKLA, P. Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: challenges, perspectives and innovations. **Bioresource Technology**, v. 297, n. 12, p. 496-506, 2020.

MANGUEIRA, E. S. V. **Produção de carvão ativado a partir de endocarpo de coco baía (cocos nucifera) aplicado ao processo de adsorção do herbicida metribuzin.** Orientador:

Rennio Felix de Sena, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2014.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARÃES, V. S. **Documentos 211: uso da biomassa para geração de energia**. 1 ed., p. 28. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016.

MAREE, Z.; STRYDOM, C. A.; BUNT, J. R. Chemical and physical characterization of spent coffee ground biochar treated by a wet oxidation method for the production of a coke substitute. **Waste Management**, v. 113, n. 4, p. 22-29, 2020.

MARIAH, M. A. A.; ROVINA, K.; VONNIE, J. M.; ERNA, K. H. Characterization of activated carbon from waste tea (*Camellia sinensis*) using chemical activation for removal of methylene blue and cadmium ions. **South African journal of Chemical Engineering**, v. 44, n. 1, p. 13-22, 2023.

MARIANA, M.; MULANA, F.; JUNIAR, L.; FATHIRA, D.; SAFITRI, R.; MUCHTAR, S.; BILAD, M. R.; SHARIFF, A. H. M.; HUDA, N. Development of biosorbent derived from the endocarp waste of gayo coffee for lead removal in liquid wastewater - effects of chemical activators. **Sustainability**, v. 13, n. 30, p. 50-67, 2021.

MARTINEZ, C. L. M.; ROCHA, E. P. A.; CARNEIRO, A. C. O.; GOMES, F. J. B.; BATALHA, L. A. R.; VAKKILAINEN, E.; CARDOSO, M. Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes. **Biomass and Bioenergy**, v. 11, n. 120, p. 68-76, 2019.

MARTINEZ, C. L. M.; SERMYAGINA, E.; SAARI, J.; JESUS, M. S.; CARDOSO, M.; ALMEIDA, G. M.; VAKKILAINEN, E. Hydrothermal carbonization of lignocellulosic agro-forest based biomass residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 147, n. 106, p.1-17, 2021.

MATIN, A.; MAJDAK, T.; KRIČKA, T.; GRUBOR, M. Valorization of sunflower husk after seeds convection drying for solid fuel production. **Journal of Central European Agriculture**. v. 20, n. 1, p. 389-401, 2019.

MAYSARAH, H.; DESIYANA, L. S.; NURZUHRA, S.; ILLIAN, D. N. Utilization of spent arabica coffee grounds as raw material for activated charcoal in liquid bath soap formulation. **Pharmaceutical Sciences and Research**, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2023.

MELO, T. C. S. de. **Caracterização energética do resíduo lignocelulósico da *Bixa orellana* L. para aplicação no processo de pirólise rápida**. Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Renata Martins Braga, 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, RN, 2020.

MENA, L. E. H. **Bambu como alternativa para produção de carvão ativado**. Orientador: Waldir Antonio Bizzo, 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2019.

MENDES, E. **Modelagem cinética da adsorção e da dessorção de íons zinco por micropartículas de vidro ricas em sódio no desenvolvimento de aluminossilicatos**

antimicrobianos atóxicos. Orientador: Nivaldo Cabral Kuhnen, 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

MENDES, F. M. T.; MARQUES, A. C. C.; MENDONÇA, D. L.; OLIVEIRA, M. S.; MOUTTA, R. O.; FERREIRA-LEITÃO, V. S. High Surface Area Activated Carbon from Sugar Cane Straw. **Waste Biomass Valor**, v. 6, n. 4, p. 33-40, 2015.

MICROMERITICS. **Calculations for the ASAP 2425.** 2020.

MILHOEM, M. P. S. **Estudos de isotermas no processo de adsorção – revisão.** Orientador: Douglas Azevedo Castro, 2018. Monografia (Bacharel em Química Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, TO, 2018.

MIRONOVA, N. A.; TAZEEVAA, E. G.; MILORDOVA, D. V.; YAKUBOVAA, S. G.; YAKUBOV, M. R. Influence of the Moisture Content of Mesoporous Silica Gel on the Efficiency of the Chromatographic Recovery of Vanadyl Petroporphyrins with Benzene. **Russian Journal of Applied Chemistry**, v. 96, n. 3, p. 332-341, 2023.

MISHRA, R. K.; SINGH, B.; ACHARYA, B. A comprehensive review on activated carbon from pyrolysis of lignocellulosic biomass: an application for energy and the environment. **Carbon Resources Conversion**, v. 2, n. 3, p. 1-46, 2024.

MISTAR, E. M.; AHMAD, S.; MUSLIM, A.; ALFATAH, T.; SUPARDAN, M. D. Preparation and characterization of a high surface area of activated carbon from *Bambusa vulgaris* – effect of NaOH activation and pyrolysis temperature. **Materials Science and Engineering**, v. 334, n. 12, p. 1-7, 2018.

MIZUNO, Y.; YAHAYA, A. G.; KRISTOF, J.; BLAJAN, M. G.; MURAKAMI, E.; SHIMIZU, K. Ozone Catalytic Oxidation for Gaseous Dimethyl Sulfide Removal by Using Vacuum-Ultra-Violet Lamp and Impregnated Activated Carbon. **Energies**, v. 15, n. 33, p. 14-30, 2022.

MOHAMMADIFARD, A.; ALLOUSS, D.; VOSOUGHI, M.; DARGAHI, A.; MOHARRAMI, A. Synthesis of magnetic Fe₃O₄/activated carbon prepared from banana peel (BPAC@ Fe₃O₄) and salvia seed (SSAC@ Fe₃O₄) and applications in the adsorption of Basic Blue 41 textile dye from aqueous solutions. **Applied Water Science**, v. 12, n. 88, p. 1-11, 2022.

MONDAL, S.; MAJUMDER, S. K. Honeycomb-like porous activated carbon for efficient copper (II) adsorption synthesized from natural source: Kinetic study and equilibrium isotherm analysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 10, p. 36-48, 2019.

MOOSAVI, S.; LAI, C. W.; GAN, S.; ZAMIRI, G.; PIVEHZHANI, O. A.; JOHAN, M. R. Application of efficient magnetic particles and activated carbon for dye removal from wastewater. **ACS Omega**, v. 5, n. 20, p. 684-697, 2020.

MOPOUNG, S.; SITTHIKHANKAEW, R.; KRUEKIT, J. Production of KMnO₄ loaded activated carbon from Sacha inchi seed shell by low activation temperature treatment for methylene blue removal. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 15, n. 2, p. 421-429, 2020.

MORAIS, R. M. **Produção de carvões ativados preparados a partir de diferentes materiais precursores**. Orientador: Roberto Carlos Costa Lelis, 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

MORAIS, R. M.; SANTANA, G. M.; LELIS, R. C. C.; PAES, J. B.; SCHUELER, M. V. E.; MORBECK, F. L. Produção e desempenho de carvão ativado fisicamente a partir de *Bambusa vulgaris*. **Brazilian Journal of Forestry Research**, v. 9, n. 3, p. 1-7, 2019.

MORALI, U.; DEMIRAL, H.; ŞENSOZ, S. Optimization of activated carbon production from sunflower seed extracted meal: Taguchi design of experiment approach and analysis of variance. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, n. 264800, p. 602-611, 2018.

MORO, M. K. **Pré-tratamento da biomassa de cana-de-açúcar por extrusão com dupla-rosca**. Orientador: Príamo Albuquerque Melo Júnior, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

MORTADA, W. I.; MOHAMED, R. A.; MONEM, A. A. A.; AWAD, M. M.; HASSAN, A. F. Effective and low-cost adsorption procedure for removing chemical oxygen demand from wastewater using chemically activated carbon derived from rice husk. **Separations**, v. 10, n. 43, p. 367- 372, 2023.

MUBARAK, M. F.; ZAYED, A. M.; AHMED, H. A. Activated carbon/Carborundum@Microcrystalline cellulose core shell nano-composite: synthesis, characterization and application for heavy metals adsorption from aqueous solutions. **Industrial Crops and Products**, v. 182, n. 11, p. 896-914, 2022.

MUKHERJEE, A.; SAHA, B.; NIU, C.; DALAI, A. K. Preparation of activated carbon from spent coffee grounds and functionalization by deep eutectic solvent: Effect of textural properties and surface chemistry on CO₂ capture performance. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 108815, p. 1-16, 2022.

MÜLLER, L. C.; ALVES, A. A. A.; MONDARDO, R. I.; SENS, M. L. Adsorção do azul de metileno em serragem de *Pinus elliottii* (pinus) e *Drepanostachyum falcatum* (bambu). **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 24, n. 4, p.687-695, 2019.

MUTTAKIN, M.; MITRA, S.; THU, K.; ITO, K.; SAHA, B. B. Theoretical framework to evaluate minimum desorption temperature for IUPAC classified adsorption isotherms. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 122, n. 8, p. 795-805, 2018.

NABIH, M. H.; HAJAM, N. E.; BOULIKA, H.; CHIKI, Z.; TAHAR, S. B.; KANDRI, N. I.; ZEROUALE, A. Preparation and characterization of activated carbons from cardoon “*Cynara cardunculus*” waste: application to the adsorption of synthetic organic dyes. **Materials Today: Proceedings**, v. 72, n. 33, p. 69-79, 2023.

NADEW, T. T.; KEANA, M.; SISAY, T.; GETYE, B.; HABTU, N. G. Synthesis of activated carbon from banana peels for dye removal of an aqueous solution in textile industries: optimization, kinetics, and isotherm aspects. **Water Practice & Technology**, v. 18, n. 4, p. 947-967, 2023.

NAGANATHAN, K. K.; FAIZAL, A. N. M.; ZAINI, M. A. A.; ALI, A. Adsorptive removal of bisphenol a from aqueous solution using activated carbon from coffee residue. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, n. 13, p. 07-12, 2021.

NAGARAJAN, L.; SARAVANAN, P.; KUMARAGURU, K.; ANNAMRENITA, A.; RAJESHKANNAN, R.; RAJASIMMAN, M. A facile approach in activated carbon synthesis from wild sugarcane for carbon dioxide capture and recovery: isotherm and kinetic studies. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 8, n. 22, p. 1-13, 2022.

NAJAFI, H.; SHARIFIAN, S.; ASASIAN-KOLUR, N. Gemifloxacin removal from aqueous solution by rice-straw based activated carbon: Batch adsorption and thermal regeneration. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 23, n. 42, p. 1-12, 2022.

NAKAEMA, H. **Estratégias de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica para melhorar a produção de biogás e bioquímicos em biorrefinarias**. Orientador: Paula Rúbia Ferreira Rosa, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2021.

NAQVI, S. R.; ALI, I.; NASIR, S.; TAQVI, S. A. A.; ATABANI, A.E.; CHEN, W. H. Assessment of agro-industrial residues for bioenergy potential by investigating thermo-kinetic behavior in a slow pyrolysis process. **Fuel**. v. 278, n. 118259, p. 1-8, 2020.

NARITA, C. K. C. Y. **Síntese de carvão ativado a partir de resíduos de tecido de algodão**. Orientador: Rubiane Ganascim Marques, 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, PR, 2022.

NARITA, C. Y. **Carvões ativados a partir de resíduo de coco verde por diferentes ativadores: obtenção, caracterização e aplicações**. Orientador: Marcelo Breda Mourão. 2021. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2021.

NATRAYAN, L.; NADH, V. S.; KATUBI, K. M.; ALI, D.; LEMU, D. G. Adsorption of SO₂ on ZnO Nanowires Using Activated Carbon by Langmuir Adsorption Isotherm. **Adsorption Science & Technology**, v. 22, n. 8, p. 1-8, 2022.

NEDJAI, R.; KABBASHI, N. A.; ALAM, M. Z.; ALKHATIB, M. F. R. Production and Characterization of Activated Carbon from Baobab Fruit Shells by Chemical Activation Using ZnCl₂, H₃PO₄ and KOH. **Journal of Physics**, v. 21, n. 9, p. 1-8, 2021.

NEGARA, D. N. K. P.; NINDHIA, T. G. T.; SURATA, I. W.; HIDAJAT, F.; SUCIPTA, M. Textural characteristics of activated carbons derived from tabah bamboo manufactured by using H₃PO₄ chemical activation. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, n. 14, p. 48-55, 2020.

NEME, I.; GONFA G.; MAIS, C. Activated carbon from biomass precursors usin phosphoric acid: A review. **Heliyon**. v. 8, n. 11940, p. 1-12, 2022.

NEMR, A. E.; ABOUGHALY, R. M.; SIKAILY, A. E.; MASOUD, M. S.; RAMADAN, M. S.; RAGAB, S. Microporous-activated carbons of type I adsorption isotherm derived from sugarcane bagasse impregnated with zinc chloride. **Carbon Letters**, v. 32, n. 2, p. 29-49, 2022.

NGUEABOUO, A. M. S.; TAGNE, R. F. T.; TCHUIFON, D. R. T.; FOTSOP, C. G.; TAMO, A. K.; ANAGHO, S. G. Strategy for optimizing the synthesis and characterization of activated carbons obtained by chemical activation of coffee husk. **Material Advances**, v. 3, n. 83, p. 8361-8374, 2022.

NGUYEN, D. V.; DUONG, C. T. T.; VU, C. N. M. V.; NGUYEN, H. M.; PHAM, T. T.; TRAN-THUY, T. M. *et al.* Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product. **Data in Brief**, v. 51, n. 109781, p. 1-9, 2023.

NIZAM, N. U. M.; HANAFIAH, M. M.; MAHMOUDI, E.; HALIM, A. A.; MOHAMMAD, A. W. The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon. **Scientific Reports**, v. 11, n. 8, p. 63-80, 2021.

NJANJA, E.; MBOKOU, S. F.; PONTIE, M.; NACEF, M.; TONLE, I. K. Comparative assessment of methylene blue biosorption using coffee husks and corn cobs: towards the elaboration of a lignocellulosic-based amperometric sensor. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 5, p. 13-27, 2019.

NOBRE, J. R. C.; CASTRO, J. P.; BIANCHI, M. L.; BORGES, W. M. S.; TRUGILHO, P. F.; MOULIN, J. C.; NAPOL, A. Characterization of activated carbon produced from sawdust massaranduba. **Scientia Florestalis**, v. 43, n. 107, p. 693-702, 2015.

NOWICKI, P.; KAZMIERCZAK, J.; PIETRZAK, R. Comparison of physicochemical and sorption properties of activated carbons prepared by physical and chemical activation of cherry stones. **Powder Technology**, v. 269, n. 3, p. 12-19, 2015.

ODA, T. Y. R. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado a partir de lodo biológico de indústrias têxtil e de papel**. Orientador: Ana Augusta Passos Rezende, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.

OGINNI, O.; SINGH, K.; OPORTO, G.; DAWSON-ANDOH, B.; McDONALD, L.; SABOLSKY, E. Influence of one-step and two-step KOH activation on activated carbon characteristics. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, n. 10, p. 266-276, 2019.

OKOLIE, J. A.; NANDA, S.; DALAI, A. K.; KOZINSKI, J. A. Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 21, p. 45-69, 2021.

OLADEJO, J.; SHI, K.; CHEN, Y.; LUO, X.; GANG, Y.; WU, T. Closing the active carbon cycle: regeneration of spent activated carbon from a wastewater treatment facility for resource optimization. **Chemical Engineering & Processing: Process Intensification**, v. 150, n. 10, p. 1-8, 2020.

OLIVEIRA, G. F. **Produção de carvão ativado a partir do pecíolo do babaçu**. Orientador: Cláudio Teodoro de Carvalho, 2016. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2016.

OLIVEIRA, I. N. G. B.; GUIMARÃES, L. G.; SANTOS, H. V. R.; CUBA, R. M. F.; TERÁN, F. J. C. Influencia de la encapsulación del biocarbón activado a partir de la cáscara de banana

con alginato de sodio para la eliminación de fósforo em medio acuoso. **Boletim do Observatório Ambiental**, v. 16, n. 22, p. 120-139, 2022.

OLIVEIRA, P. B. **Preparação e caracterização de blendas à base de lignina kraft oxipropilada e amido**. Orientador: Daniel Paquini, 2021. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2021.

OLIVEIRA, G. A.; GEVAERD, A.; MANGRICH, A. S.; MARCOLINO-JUNIOR, L. H.; BERGAMINI, M. F. Biochar obtained from spent coffee grounds: evaluation of adsorption properties and its application in a voltametric sensor for lead (II) ions. **Microchemical Journal**, n. 165, v. 10, p. 1-9, 2021.

OLUYINKA, O. A.; OKE, E. A.; OYELUDE, E. O.; ABUGRI, J.; RAHEEM, S. A. Recapitulating potential environmental and industrial applications of biomass wastes. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 24, n. 2090, p. 2089-2107, 2022.

OSMAN, A. I.; EL-MONAEM, E. M.; ELGARAHY, A. M.; ANIAGOR, C. O.; HOSNY, M.; FARGHALI, M. *et al.* Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 23, p. 37-98, 2023.

OZBAY, N.; YARGIC, A. S.; SAHIN, R. Z. Y.; YAMAN, E. Valorization of banana peel waste via in-situ catalytic pyrolysis using Al-Modified SBA-15. **Renewable Energy**, v. 140, n. 11210, p. 633-646, 2019.

PADILHA, L. F. **Desenvolvimento de catalisadores anódicos a base de óxidos mistos para a oxidação parcial do metano**. Orientador: Martin Schmal, 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

PAGALAN, E.; SEBRON, M.; GOMEZ, S.; SALVA, S. J.; AMPUSTA, R.; MACARAYO, A. J.; JOYNO, C.; IDO, A.; ARAZO, R. Activated carbon from spent coffee grounds as an adsorbent for treatment of water contaminated by aniline yellow dye. **Industrial Crops & Products**, v. 145, n. 111, p. 953-961, 2020.

PALLARÉS, J.; GONZÁLEZ-CENCERRADO, A.; ARAUZO, I. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. **Biomass and Bioenergy**, v. 115, n. 3, p. 64-73, 2018.

PANIZZI-CARRÃO, M.; MANDARINO, J. K. G. **Produtos protéicos do girassol**. In: Girassol: derivados protéicos. Embrapa: Londrina, p. 27. 2005.

PAREDES-LAVERDE, M.; SALAMANCA, M.; DIAZ-CORRALES, J.; FLOREZ, E.; SILVA-AGREDO, J.; TORRES-PALMA, R. A. Understanding the removal of an anionic dye in textile wastewaters by adsorption on ZnCl₂ activated carbons from rice and coffee husk wastes: a combined experimental and theoretical study. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 105685, p. 1-14, 2022.

PARIGOT, P. **Relação entre a umidade e o poder calorífico da biomassa utilizada na cocelpa**. Orientador: Prof. Dr. Rui Maggi dos Anjos, 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.

PARITOSH, K.; KUSHWAHA, S. K.; YADAV, M.; PAREEK, N.; CHAWADE, A.; VIVEKANAND, V. Food waste to energy: an overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling. **Biomed Research International**, v. 17, n. 3, p. 1-20, 2017.

PARK, J. E.; LEE, G. B.; KIM, H.; HONG, B. U. High surface area activated carbon production from cow manure controlled by heat treatment conditions. **Process**, v. 10, n. 1282, p. 1-13, 2022.

PATEL, P.; MUTEEN, A.; MONDAL, P. Treatment of greywater using waste biomass derived activated carbons and integrated sand column. **Science of The Total Environment**, v. 711, n. 13, p. 586-601, 2020.

PATEL, R. K.; PRASAD, R.; SHANKAR, R.; KHARE, P.; YADAV, M. Adsorptive removal of methylene blue dye from soapnut shell & pineapple waste derived activated carbon. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v. 13, n. 1, p. 81-87, 2021.

PATRA, B. R.; NANDA, S.; DALAI, A. K.; MEDA, V. Taguchi-based process optimization for activation of agro-food waste biochar and performance test for dye adsorption. **Chemosphere**, v. 285, n. 13, p. 53-64, 2021.

PEDICINI, R.; MAISANO, S.; CHIODO, V.; CONTE, G.; POLICICCHIO, A.; AGOSTINO, R. G. Posidonia oceanica and wood chips activated carbon as interesting materials for hydrogen storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 14, p. 38-47, 2020.

PEGO, M. F. F. **Modificação superficial de carvão ativado utilizando tratamento corona**. Orientador: Maria Lucia Bianchi, 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2016.

PEREA-MORENO, M. A.; MANZANO-AGUGLIARO, F.; PEREA-MORENO, A. J. Sustainable energy based on sunflower seed husk boiler for residential buildings. **Sustainability**, v. 10, n. 34, p. 7-27, 2018.

PEREIRA, P. H. F.; ORNAGHI, H. L.; ARANTES, V.; CIOFFI, M. O. H. Effect of chemical treatment of pineapple crown fiber in the production, chemical composition, crystalline structure, thermal stability and thermal degradation kinetic properties of cellulosic materials. **Carbohydrate Research**, v. 499, n. 108, p. 227-236, 2021.

PICCIN, J. S.; CADAVAL, T. R. S.; PINTO, L. A. A.; DOTTO, G. L. **Adsorption isotherms in liquid phase: experimental, modeling and interpretations**. In: Adsorption Process for Water Treatment and Purification, (Org.): BONILLA-PRETICIOLET, 2017.

PICCOLI, V.; GONÇALVES, G. R.; CIPRIANO, D. F.; FREITAS, J. C. C.; SCHETTINO, M. A. Production of phosphorus containing activated carbons from coffee husk and application in adsorption processes. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 1, p. 75-88, 2020.

PILÓ-VELOSO, D. NMR study of lignin from Eucalyptus grandis. In: Brazilian Symposium on The Chemistry of Lignin and Other Wood Components, 1, 1989, São Carlos. **Proceedings**, p. 95-113, 1989.

PINHEIRO, D. R. **Adsorção de Cu^{2+} em alumina de transição obtida a partir da mistura de gibbsita e hidróxido de alumínio gel.** Orientador: Marlice Cruz Martinelli, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2015.

PINHEIRO, L. P. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da produção integrada de bioetanol 1G e 2G em biorrefinaria de cana utilizando levedura recombinante.** Orientador: Thais Suzane Milessi Esteves, 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2022.

PIRIYA, R. S.; JAYABALAKRISHNAN, R. M.; MAHESWARI, M.; BOOMIRAJ, K.; OUMABADY, S. Coconut shell derived ZnCl_2 activated carbon for malachite green dye removal. **Water Science & Technology**, v. 83, n. 5, p. 1167-1183, 2021.

POMPÊU, G. C. S. **Estudo do conteúdo calorífico de ligninas extraídas de diferentes fontes de biomassa vegetal.** Orientador: Reinaldo Ruggiero, 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia do Biocombustível) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

PONCE, J.; ANDRADE, J. G. S.; SANTOS, L. N.; BULLA, M. K.; BARROS, B. C. B.; FAVARO, S. L. et al. Alkali pretreated sugarcane bagasse, rice husk and corn husk wastes as lignocellulosic biosorbents for dyes. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 2, n. 10, p. 61-69, 2021.

PORTELA, C. I.; BRAZIL, T. R.; MENDONÇA, T. A. P.; SANTOS, E. B.; DOMINGUES, R. A.; VIEIRA, N. C. S.; GONÇALVES, M. Activated carbon obtained from coffee husk waste activated by CaCl_2 as support of TiO_2 for the enhanced photocatalytic degradation of Victoria Blue B dye. **Diamond & Related Materials**, v. 139, n. 110, p. 417-426, 2023.

POYILIL, S.; PALATEL, A.; CHANDRASEKHARAN, M. Physico-chemical characterization study of coffee husk for feasibility assessment in fluidized bed gasification process. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 101007, p. 51041-51053, 2022.

PRAKASH, M. O.; RAGHAVENDRA, G.; OJHA, S.; PANCHAL, M. Characterization of porous activated carbon prepared from arhar stalks by single step chemical activation method. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, n. 14, p. 76-81, 2021.

PRASETYO, I.; ROCHMANDI; WAHYONO, E.; ARIYANTO, T. Controlling Synthesis of Polymer-Derived Carbon Molecular Sieve and its Performance for CO_2/CH_4 Separation. **Engineering Journal**, v. 21, n. 4, 2016.

PRAUCHNER, M. J.; SAPAG, K.; RODRIGUEZ-REINOSO, F. Tailoring biomass based activated carbon for CH_4 storage by combining chemical activation with H_3PO_4 or ZnCl_2 and physical activation with CO_2 . **Carbon**, v. 110, n. 13, p. 138-147, 2016.

PRUSOV, A. N.; PRUSOVA, S. M.; RADUGIN, M. V.; BAZANOV, A. V. Flax shive as a source of activated carbon for adsorption of methylene blue. **Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures**, v. 29, n. 9, p. 685-694, 2021.

RAHAMAN, M.; DAS, A.; BOSE, S. Development of copper – iron bimetallic nanoparticle impregnated activated carbon derived from coconut husk and its efficacy as a novel adsorbent toward the removal of chromium (VI) from aqueous solution. **Water Environmental Federation**, v. 24, n. 68, p. 1417-1427, 2021.

RAHMAN, A.; HANGO, H. J.; DANIEL, L. S.; UAHENGO, V.; JAIME, S. J.; BHASKARUNI, S. V. H. S.; JONNALAGADDA, S. B. Chemical preparation of activated carbon from *Acacia erioloba* seed pods using H_2SO_4 as impregnating agent for water treatment: an environmentally benevolent approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, n. 117, p. 89-97, 2019.

RAIHAN, R.; SETIAWAN, A.; HAKIM, L.; MUHAMMAD, M.; ARIF, M.; HOSSEINIAMOLI, H. Preparation and characterization of activated carbon made from robusta coffee skin (*Coffea Canephora*). **Journal of Chemical Engineering & Environment**, v. 15, n. 2, p. 15-29, 2020.

RAJAN, M. J.; ANISH, C. I. **Role of activated carbon in water treatment**. In: Water Quality – New Perspectives, (Org.): DINCER, S.; TAKCI, H. A. M.; OZDENEFE, M. S. 1 ed. p. 1-18, 2022.

RAMIREZ, N.; SARDELLA, F.; DEIANA, C.; SCHLOSSER, A.; MÜLLER, D.; KIBLING, P. A. *et al.* Capacitive behavior of activated carbons obtained from coffee husk. **The Royal Society of Chemistry**, v. 10, n. 38, p. 38097-38106, 2020.

YAN, J. The impact of climate policy on fossil fuel consumption: Evidence from the Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI). **Energy Economics**, v. 100, p. 105333, ago. 2021.

RAO, J.; LV, Z.; CHEN, G.; PENG, F. Hemicellulose: structure, chemical modification and application. **Progress in Polymer Science**, v. 140, n. 1, p. 675-726, 2023.

RASHIDI, N. A.; YUSUP, S. A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes. **Chemical Engineering Journal**, v. 314, n. 2, p. 77-90, 2017.

RASOULI, K.; RASOULI, J.; MOHTARAM, M. S.; SABBAGHI, S.; KAMYAB, H.; MORADI, H.; CHELLIAPAN, S. Biomass-derived activated carbon nanocomposites for cleaner production: a review on aspects of photocatalytic pollutant degradation. **Journal of Cleaner Production**, v. 419, n. 13, p. 1-31, 2023.

RASSAEI, F. Kinetics, isotherms, thermodynamic adsorption, and desorption studies of chromium in two types of calcareous soils. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 16, n. 2, p. 14-55, 2023.

REN, J.; CHEN, N.; WAN, L.; LI, G.; CHEN, T.; YANG, F.; SUN, S. Preparation of High Performance Activated Carbon from Coffee Grounds after Extraction of Bio-Oil. **Molecules**, v. 26, n. 257, p. 1-11, 2021.

REVELLAME, E. D.; FORTELA, D. L.; SHARP, W.; HERNANDEZ, R.; ZAPPI, M. E. Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: a review. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 1, n. 3, p. 32-55, 2020.

REVINDRAN, R.; HASSAN, S. S.; WILLIAMS, G. A.; JAISWAL, A. K. A review on bioconversion of agro industrial wastes to industrially important enzymes. **Bioengineering**, v. 5, n. 93, p. 1-20, 2018.

REZA, M. S.; YUN, C. S.; AFROZE, S.; RADENHAMAD, N.; BAKAR, M. S. A.; SAIDUR, R. *et al.* Preparation of activated carbon from biomass and it's applications in water and gas purification a review. **Arab Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 27, n. 1, p. 208-238, 2020.

RIJO, B.; DIAS, A. P. S.; RAMOS, M.; JESUS, N.; PUNA, J. Catalyzed pyrolysis of coffee and tea wastes. **Energy**, v. 235, n. 121, p. 252-264, 2021.

RIMOLI, M. F. S.; NOGUEIRA, R. M.; FERRARINI, S. R.; CASTRO, P. M.; PIRES, E. M. Preparation and characterization of carbon from the fruit of Brazil nut tree activated by physical process. **Revista Árvore**, v. 43, n. 2, p. 1-10, 2019.

RIVERA, J. A.; ORTEGA-JIMENEZ, C. H. Power generation with biomass from coffee: a literature review, current trend and scope for future research. **MATEC Web of Conferences**, v. 293, n. 502, p. 1-5, 2019.

RODIGUEZ, M. H.; YPERMAN, J.; CARLEER, R.; MAGGEN, J.; DADI, D.; GRYGLEWICZ, G. *et al.* Adsorption of Ni (II) on spent coffee and coffee husk based activated carbon. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 18, p. 1161-1170, 2018.

RODIONOVA, M. V.; BOZIEVA, A. M.; ZHARMUKHAMEDOV, S. K.; LEONG, Y. K.; LAN, J. C. W.; VEZIROGLU, A.; VEZIROGLU, T. N. *et al.* A comprehensive review on lignocellulosic biomass biorefinery for sustainable biofuel production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 22, p. 1481-1498, 2022.

ROSE, E. D.; BARTUCCI, S.; BONAVENTURA, C. P.; CONTE, G.; AGOSTINO, R. G.; POLICICCHIO, A. Effects of activation temperature and time on porosity features of activated carbons derives from lemon peel and preliminary hydrogen. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 672, n. 13, p. 727-738, 2023.

RUHIAT, Y.; GUNTARA, Y. Pollutant Absorber Design to Minimize Air Pollution Emissions from Industry. **Materials Science and Engineering**, v. 8, n. 5, p. 1-5, 2020.

SAEED, A. A.; HARUN, N. Y.; SUFIAN, S.; BILAD, M. R.; NUFIDA, B. A.; ISMAIL, N. M.; ZAKARITA, Z. Y.; JAGABA, A. H.; GHALEB, A. A. S.; AL-DHAWI, B. N. S. Modeling and optimization of biochar-based adsorbent derived from kenaf using response surface methodology on adsorption of Cd²⁺. **Water**, v. 13, n. 9, p. 1-18.

SAHU, S.; PAHI, S.; SAHU, J. K.; SAHU, U. K.; PATEL, R. K. Kendu (*Diospyros melanoxylon* Roxb) fruit peel activated carbon—an efficient bioadsorbent for methylene blue dye: equilibrium, kinetic, and thermodynamic study. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 22, p. 579-592, 2020.

SAJJADI, B.; CHEN, W. Y.; EGIEBOR, N. O. A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications. **Activation of Biochar for Energy and Environment**, n. 2, v. 4, p. 1-42, 2018.

SALVE, A. P. **Métodos de extração e aproveitamento da lignina proveniente de biomassa vegetal**. Orientador: Felipe Fernando Furlan, 2020. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2020.

SAMPAIO T. Q. S. **Influência dos extrativos hidrofílicos de biomassas nas composições dos bio-óleos e a possibilidade de aplicação ao petróleo**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Moraes Pires, 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2023.

SANTOS, C. J. R. **Termoliquefação da torta da extração do óleo de girassol em alta pressão para a produção de bio-óleo**. Orientador: Elton Franceschi, 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju, SE, 2014.

SANTOS, J. P. E.; CORRÊA, L. M.; FERNANDES, P. A. A.; BOTTREL, S. E.; PEREIRA, R. O. Avaliação preliminar da remoção de atividade estrogênica de uma mistura de desreguladores endócrinos em água utilizando carvão ativado granular. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 9, n. 3, p. 92-107, 2021.

SANTOS, J. W. **Efeito da ativação por vapor ou dióxido de carbono na porosidade do carvão ativado produzido a partir de briquetes de bagaço de malte e levedura**. Orientador: Gilberto da Cunha Gonçalves, 2021. Monografia (Bacharel em Processos Químicos), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, PR, 2021.

SANTOS, M. L. G. **Parâmetros que influenciam a produção de carvão ativado da biomassa residual do abacaxi (Ananas comosus) para remoção de corante industrial**. Orientador: Valdir Schalch, 2022. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, SP, 2022.

SANTOS, V. H. **Resíduos agroindustriais como precursores para preparação de materiais adsorventes visando a remoção de íons Cd (II) e Pb (II) em sistema de mistura binária**. Orientador: Marta Maria Menezes Bezerra Duarte, 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2021.

SANTOS, L. O.; OLIVEIRA, D. L.; NASCIMENTO, E. D.; ALENCAR, W. S.; SIQUEIRA, J. L. P.; VIEIRA, D. A.; SOUZA, A. D. V.; CARVALHO, F. A. O. Low-cost activated carbono from the husk of Pará nuts for dye removal from aqueous solution: kinetic and thermodynamic mechanism study. **Scientia Plena**, v. 18, n. 9, p. 1-18, 2022.

SARAVANAKUMAR, K.; SILVA, S.; SANTOSH, S. S.; SATHIYASEELAN, A.; GANESHALINGAM, A.; JAMLA, M. *et al.* Impact of industrial effluents on the environment and human health and their remediation using MOF-s based hybrid membrane filtration techniques. **Chemosphere**, v. 307, n. 135, p. 593-609, 2022.

SARKAR, K. K.; MAJEE, S.; PATHAL, U.; POLEPALI, S.; HALDER, G.; MANDAL, D. D.; MANDAL, T. Development of an integrated treatment strategy for removal of ondansetron

using simultaneous adsorption, oxidation and bioremediation technique. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 34, p. 2213-3437, 2019.

SCHERDEL, C.; REICHENQUER, G.; WIENER, M. Relationship between pore volumes and surface areas derived from the evaluation of N₂-sorption data by DR-, BET-, and t-plot. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 132, n. 3, p. 572-575, 2010.

SCHLUMBERGER, C.; THOMMES, M. Characterization of Hierarchically Ordered Porous Materials by Physisorption and Mercury Porosimetry - A Tutorial Review. **Advanced Materials Interfaces**, v. 21, n. 8, p. 1-25, 2021.

SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA UFAM E IFAM, 21, 2019. Amazonas. **Anais Eletrônicos**. Disponível em: <https://sncticet.ufam.edu.br/2019/anais/>. Acesso em: 03 jan. 2024.

SERAFIN, J.; BACA, M.; BIEGUN, M.; MIJOWSKA, E.; KALENCZUK, R. J.; SRENSCEK-NAZZAL, J.; MICHALKIEWICZ, B. Direct conversion of biomass to nanoporous activated biocarbons for high CO₂ adsorption and supercapacitor applications. **Applied Surface Science**, v. 497, n. 143, p. 722-741, 2019.

SERMYAGINA, E.; MARTINEZ, C. L. M.; NIKKU, M.; VAKKILAINEN, E. Spent coffee grounds and tea leaf residues: characterization, evaluation of thermal reactivity and recovery of high-value compounds. **Biomass and Bioenergy**, v. 150, n. 10, 141-182, 2021.

SETIAWAN, A.; DIANTI, L. R.; MAYANGSARI, N. E.; WIDIANA, D. R.; DERMAWAN, D. Removal of methylene blue using heterogeneous Fenton process with Fe impregnated kapok banana (*Musa acuminata* L.) peel activated carbon as catalyst. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 152, n. 110715, p. 1-9, 2023.

SETTER, C.; BORGES, F. A.; CARDOSO, C. R.; MENDES, R. F.; OLIVEIRA, T. J. P. Energy quality of pellets produced from coffee residue: characterization of the products obtained via slow pyrolysis. **Industrial Crops & Products**, v. 154, n. 11, p. 731-742, 2020.

SETTERA, C.; SILVAB, F. T. M.; ASSISA, M. R.; ATAÍDEB, C. H.; TRUGILHOA, P. F.; OLIVEIRAC, T. J. P. Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. **Fuel**, v. 261, n. 116420, p. 1-11, 2020.

SHABIR, F.; SULTAN, M.; MIYAZAKI, T.; SAHA, B. B.; ASKALANY, A.; ALI, I. *et al.* Recent updates on the adsorption capacities of adsorbent-adsorbate pairs for heat transformation applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, n. 10, p. 630-668, 2020.

SHAHCHERAGH, S. K.; MOHAGHEGHI, M. M. B.; SHIRPAY, A. Effect of physical and chemical activation methods on the structure, optical absorbance, band gap and urbach energy of porous activated carbon. **SN Applied Science**, v. 5, n. 3, p. 13-30, 2023.

SHARMA, P.; GAUR, V. K.; KIM, S. H.; PANDEY. Microbial strategies for bio transforming food waste into resources. **Bioresource Technology**, v. 299, n. 122, p. 580-591, 2020.

SHAUKAT, R. A.; SAQIB, Q. M.; KHAN, M. U.; CHOUGALE, M. Y.; BAE, J. Bio-waste sunflower husks powder based recycled triboelectric nanogenerator for energy harvesting. **Energy Reports**. v. 7, n. 65246, p. 726-731, 2021.

SHEN, F.; XIONG, X.; FU, J.; YANG, J.; QIU, M.; QI, X.; TSANG, D. C. W. Recent advances in mechanochemical production of chemicals and carbon materials from sustainable biomass resources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, n. 11, p. 44-64, 2020.

SIERADZKA, M.; KIRCZUK, C.; KALEMBA-REC, I.; MLONKA-MĘDRALA, A.; MAGDZIARZ, A. Pyrolysis of Biomass Wastes into Carbon Materials. **Energies**. v. 15, n. 1941, p. 1-12, 2022.

SILVA G. DOS S. P. **Carvão ativado de caroço de pêssego, uma alternativa para adsorção de compostos contaminantes em água de abastecimento público**. Orientadora: Prof^ª. Dra. Sueli Pércio Quináia, 2020. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Guarapuava, PR, 2020.

SILVA, A. L. **Caracterização mineralógica por difração de raios X e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia**. Orientador: Arno Heeren de Oliveira, 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.

SILVA, M. C. F. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir de resíduos de casca de Castanha do Pará (*Bertholletia excelsa*) e sua aplicação na adsorção de Fenol**. Orientador: Guilherme Luiz Dotto, 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023.

SILVA, A. O.; GARCIA, F. P.; PERAZZINI, M. T. B.; PERAZZINI, H. Design and economic analysis of a pre-treatment process of coffee husks biomass for an integrated bioenergy plant. **Environmental Technology & Innovation**, v. 30, n. 10, p. 131-151, 2023.

SILVA, J. P. **Caracterização da casca de grão de café (*Coffea arábica*, L) in natura, e de seus produtos obtidos pelo processo de pirólise em reator mecanicamente agitado**. Orientador: Araújo Augusta Bernárdez Pécora, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2012.

SILVA, L. C.; MORELI, A. P.; JOAQUIM, T. N. M. **Café: beneficiamento e industrialização**. In: Café na Amazônia. Embrapa: 2015.

SILVA, R. G. C. **Produção e caracterização de briquetes de biomassas lignocelulósicas em diferentes granulometrias**. Orientadora: Profa. Dra. Vânia Aparecida de Sá, 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, AL, 2020.

SILVA, R. N. **Rendimento de girassol submetido a diferentes espaçamentos**. Orientador: Leossávio César de Souza, 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Agônoma) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, PB, 2017.

SILVA, R. S. M. **Avaliação do potencial do uso da hemicelulose como matéria prima para a indústria de materiais**. Orientador: Marina Oliveira de Souza Dias, 2019. Monografia

(Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, SP, 2019.

SILVA, M. T. Q. S.; PERRETTO, F.; CARDOSO, M. R.; MAZER, W. Porosity: some characterization techniques. **Materials Today: Proceedings**, v. 9, n. 4, p. 67-84, 2023.

SILVEIRA, J. M.; CASTRO, C.; MESQUITA, C. M.; PORTUGAL, F. A. F. **Semeadura e manejo da cultura de girassol**. Embrapa, 2005.

SINGH, G.; KIM, I. Y.; LAKHI, K. S.; SRIVASTAVA, P.; NAIDU, R.; VINU, A. Single step synthesis of activated bio-carbons with a high surface area and their excellent CO₂ adsorption capacity. **Carbon**, v. 116, n. 4, p. 48-55, 2017.

SINGH, D. Activated carbon nanoparticles generated from coffee husk: a pioneering biomaterial for improving drug targeting in cancer. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 38, n. 5, p. 134-148, 2024.

SIRCAR, S. A practical perspective of fluid (gas or liquid) - Solid adsorption equilibrium. **Separation and Purification Technology**, v. 231, n. 11, p. 49-69, 2020.

SMANIOTTO, T. A. S. **Secagem e armazenamento de grãos de girassol**. Orientador: Osvaldo Resende, 2016. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, GO, 2016.

SMITH, M. D. **An abbreviated historical and structural introduction to lignocellulose**. In: Understanding Lignocellulose: Synergistic Computational and Analytic Methods. American Chemical Society, p. 1-15, 2019.

SOARES, V. C. **Avaliação das propriedades adsorptivas de carvões ativados produzidos via tratamento termoquímico convencional e não convencional com vistas à remoção de cádmio em meio aquoso**. Orientador: Adriana Silva Franca, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

SOLMAZ, A.; KARTA, M.; DEPCI, T.; TURNA, T.; SARI, Z. A. Preparation and characterization of activated carbons from Lemon pulp for oxytetracycline removal. **Environmental Monitoring and Assessment**, V. 195, N. 797, P. 1-18, 2023.

SOMASHEKARA, D.; MULKY, L. Sequestration of Contaminants from Wastewater: A Review of Adsorption Processes. **ChemBioEng Reviews**, v. 10, n. 4, p. 491-509, 2023.

SON, H.; AN, B. Investigation of Adsorption Kinetics for Perand Poly-fluoroalkyl substances (PFAS) Adsorption onto Powder Activated Carbon (PAC) in the Competing Systems. **Water Air Soil Pollut**, v. 2, n. 3, p. 129-146, 2022.

SONG, X.; ZHANG, S.; WU, Y.; CAO, Z. Investigation on the properties of the bio-briquette fuel prepared from hydrothermal pretreated cotton stalk and wood sawdust. **Renewable Energy**. v. 151, n. 200093, p. 184-191, 2020.

SOSA, J. A.; LAINES, J. R.; GARCIA, D. S.; HERNANDEZ, R.; ZAPPI, M.; MONTEROS, A. E. E. I. Activated carbono: a review of residual precursor, synthesis process, characterization

techniques, and applications in the improvement of biogas. **Environmental Engineering Residuals**, v. 28, n. 3, p. 1-21, 2023.

SOSA, J. A.; LAINES, J. R.; GARCIA, D. S.; HERNANDEZ, R.; ZAPPI, M.; MONTEROS, A. E. E. I. Activated carbon: a review of residual precursors, synthesis processes, characterization techniques, and applications in the improvement of biogas. **Environmental Engineering Residual**, v. 28, n. 3, p.22-43, 2023.

SOUKUP, K.; HEJTMANEK, V.; CRUZ, G. J. F.; JANDOVÁ, V.; SOLCOVA, O. Excess adsorption isotherms of hydrogen on activated carbons from agricultural waste materials. **Chemical Engineering Technology**, v. 40, n. 5, 900-906.

SOUZA, F. R. B. **Síntese e caracterização de hemiceluloses catiônicas a partir do reaproveitamento da palha de milho**. Orientador: Guimes Rodrigues Filho, 2012. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.

SOUZA, L. M. **Uso de espectroscopia no infravermelho médio, calibração multivariada e seleção de variáveis na quantificação de adulterantes em biodieseis e suas misturas com diesel**. Orientador: Waldomiro Borges Neto, 2014. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.

SOUZA, J. B.; MICHELIN, M.; AMÂNCIO, F. L. R.; BRAZIL, O. A. V.; LOURDES, M.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Sunflower stalk as a carbon source inductive for fungal xylanase production. **Industrial Crops & Products**, v. 153, n. 112, p. 368-375, 2020.

SOUZA, P. R.; DOTTO, G. L.; SALAU, N. P. G. Detailed numerical solution of pore volume and surface diffusion model in adsorption systems. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 122, n. 3, p. 98-107, 2017.

Specific Surface Area. **Batteries**, v. 6, n. 22, p. 1-16, 2020.

SRISUWAN, W.; JUBSLIP, C.; SRISORRACHATR, S. The Use of K₂CO₃ Modified Sunflower Seed Husks for Removing of Metal Ions from Industrial Wastewater. **Chemical Engineering Transactions**, v. 70, n. 18, p. 1-6, 2018.

STÄHELIN, P. M.; VALÉRIO, A.; SOUZA, S. M. A. G. U.; SILVA, A.; VALLE, J. A. B.; SOUZA, A. A. U. Benzene and toluene removal from synthetic automotive gasoline by mono and bicomponent adsorption process. **Fuel**, v. 231, n. 6, p. 45-52, 2018.

STELITANO, S.; CONTE, G.; POLICICCHIO, A.; ALOISE, A.; DESIDERIO, G.; AGOSTINO. Pinecone-Derived Activated Carbons as an Effective Medium for Hydrogen Storage. **Energies**, v. 13, n. 22, p. 1-16, 2020.

STRAWN, D. G.; CRUMP, A. R.; PEAK, D.; GARVIA-PEREZ, M.; MÖLLER, G. Reactivity of Fe-amended biochar for phosphorus removal and recycling from wastewater. **PLOS Water**, v. 2, n. 4, p. 1-21, 2022.

STROUB, N. G. F. **Mapeamento das oportunidades de valorização dos resíduos da produção do café brasileiro destinados à indústria de cosméticos**. Orientador: Armando

Lucas Cherem da Cunha, 2021. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2021.

SUAREZ, L.; CENTENO, T. A.; Unravelling the volumetric performance of activated carbons from biomass wastes in supercapacitors. **Journal of Power Sources**, v. 448, n. 22, p. 413-419, 2020.

SUHDI; RODIAWAN; WANG, S. C. The effect of impregnation ratio on the characteristics of activated carbon made from rubber fruit shells with KOH as the activation medium. **Earth and Environmental Science**, v. 11, n. 8, p. 1-5, 2022.

SULTAN, M.; MIYAZAKI, T.; KOYAMA, S. Optimization of adsorption isotherm types for desiccant air-conditioning applications. **Renewable Energy**, v. 121, n. 4, p. 441-450, 2018.

SULTANA, M.; ROWNOK, M. H.; SABRIN, M.; RAHAMAN, M. H.; ALAM, S. M. N. A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 6, n. 103, p. 382-396, 2022.

SUN, S.; YU, Q.; LI, M.; ZHAO, H.; WANG, Y.; JI, M. Effect of carbonization temperature on characterization and water vapor adsorption of coffee-shell activated carbon. **Adsorption Science & Technology**, v. 38, n. 10, p. 377-392, 2020.

TADAYON, Y.; BAHROLOLOOM, M. E.; JAVADPOUR, S. An experimental study of sunflower seed husk and zeolite as adsorbents of Ni (II) ion from industrial wastewater. **Water Resources and Industry**, v. 30, n. 10, p. 14-28, 2023.

TANG, Y.; YANG, Y.; HOU, S.; CHENG, D.; YAO, C.; ZHANG, S.; XIE, J.; WANG, X.; MA, X.; YU, Z.; LI, S. Multifunctional Iron–Humic Acid Fertilizer from Ball Milling Double Shelled Fe–N-doped Hollow Mesoporous Carbon Microspheres with Lignite. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 7, p. 17-31, 2021.

TARIGHAT, H.; BOUSTANI, P.; FARAHBOD, F. Investigation of Pollutant Adsorption by Synthesized CuO Nanosorbents Based on Accurate Analysis of Different Types of Adsorption Isotherms. **Chemistry Africa**, v. 6, n. 19, p. 91, 100, 2023.

TAYIBI, S.; MONLAU, F.; FAYOUD, N. E.; ABDELJAOUED, E.; HANNACHE, H.; ZEROUAL, Y.; OUKARROUM, A.; BARAKAT, A. Production and dry mechanochemical activation of biochars derived from Moroccan red macroalgae residue and olive pomace biomass for treating wastewater: thermodynamic, isotherm, and kinetic studies. **ACS Omega**, v. 6, n. 1, p. 59-71, 2021.

TEIXEIRA, I. R. F.; VERNASQUI, L. G.; SAI, N. B. P.; MEDEIROS, F. V. S. Adsorção de azul de metileno por meio de resíduos de Poincianella pluviosa var. peltophoroides (Benth.) L.P. Queiroz. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 6, p. 297-306, 2021.

TEIXEIRA, J. L. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco verde**. Orientador: Annelise Kopp Alves, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2020.

THI, T. T. L.; TA, H. S.; VAN, K. L. Activated carbons from coffee husk: preparation, characterization, and reactive red 195 adsorption. **Journal of Chemical Research**, v. 21, n. 5, p. 380-394, 2021.

THITHAI, V.; JIN, X.; AJAZ AHMED, M.; CHOI, J. W. Physicochemical Properties of Activated Carbons Produced from Coffee Waste and Empty Fruit Bunch by Chemical Activation Method. **Energies**, v. 14, n. 3002, p. 1-16, 2021.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIVIER, J. P.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. Physisorption of gases with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure Applied Chemistry**, v. 87, n. 10, p. 51-69, 2015.

TIAN, Y.; WU, J. A comprehensive analysis of the BET area for nanoporous materials. **Thermodynamics and Molecular-Scale Phenomena**, v. 5, n. 2, p. 1-26, 2017.

TIANA, Y.; WANG, F.; DJANDJAB, J. O.; ZHANG, S. L.; XUA, Y. P.; DUAN, P. G. Hydrothermal liquefaction of crop straws: Effect of feedstock composition. **Fuel**, v. 256, n. 116946, p. 1-6, 2020.

TOBASA BIOINDUSTRIAL. TOBASA Bioindustrial. Disponível em: <<https://www.tobasa.com.br>>. Acesso em: 16 de jul de 2024.

TOGIBASA, O.; MUMFAIJAH, M.; ALLO, Y. K.; DAHLAN, K.; ANSANAY, Y. O. The effect of chemical activating agent on the properties of activated carbon from sago waste. **Applied Sciences**, v. 11, n. 16, p. 40-51, 2021.

TOMASINI, M. C. **Produção sequencial de hidrogênio e metano via digestão anaeróbia a partir da fração hemicelulósica da palha de cana-de-açúcar**. Orientador: Viridiana Santana Ferreira-Leitão, 2020. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2020.

TOPRAK, A. Production and characterization of microporous activated carbon from cherry laurel (*Prunus laurocerasus* L.) stone: application of H₂ and CH₄ adsorption. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 10, n. 9, p. 77-86, 2020.

TOUNSADI, H.; KHALIDI, A.; ABDENNOURI, M.; BARKA, N. Activated carbon from *Diplotaxis Harra* biomass: Optimization of preparation conditions and heavy metal removal. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 59, n. 3, p. 348-358, 2016.

TRAN, T. H.; LE, A. H.; PHAM, T. H.; NGUYEN, D. T.; CHANG, S. W.; CHUNG, W. J.; NGUYEN, D. D. Adsorption isotherms and kinetic modeling of methylene blue dye onto a carbonaceous hydrochar adsorbent derived from coffee husk waste. **Science of the Total Environment**, v. 725, n. 138, p. 325-345, 2020.

TRAN, T. H.; LE, H. H.; PHAM, T. H.; NGUYEN, D. T.; LA, D. D.; CHANG, S. W.; LEE, S. M.; CHUNG, W. J.; NGUYEN, D. D. Comparative study on methylene blue adsorption behavior of coffee husk-derived activated carbon materials prepared using hydrothermal and soaking methods. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 10, p. 362-372, 2021.

TSAI, W. T.; HUANG, P. C.; LIN, Y. Q. Reusing cow manure for the production of activated carbon using potassium hydroxide (KOH) activation process and its liquid phase adsorption performance. **Processes**, v. 7, n. 737, p. 1-11, 2019.

TSAI, W. T.; JIANG, T. J. Optimization of physical activation process for activated carbon preparation from water caltrop husk. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 68, p. 75-84, 2023.

UDEH, N. U.; JAMES, B. L. Production and Characterization of Paw-paw Trunk Activated Carbon. **American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences**, v. 87, n. 1, p. 9-17, 2022.

UDDIN, M.; MALEK, N. N. A.; JAWAD, A. H.; SABAR, S. Pyrolysis of rubber seed pericarp biomass treated with sulfuric acid for the adsorption of crystal violet and methylene green dyes: an optimized process. **International Journal of Phytoremediation**, v. 25, n. 4, p. 393-402, 2022.

UKANWA, K. S.; PATCHIGOLLA, K.; SAKRABANI, R.; ANTHONY, E.; MANDAVGANE, S. A review of chemicals to produce activated carbon from agricultural waste biomass. **Sustainability**, v. 11, n. 62, p. 4-39, 2019.

ÜNER, O.; BAYRAK, Y. The effect of carbonization temperature, carbonization time and impregnation ratio on the properties of activated carbon produced from *Arundo donax*. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 268, n. 23, p. 225-234, 2018.

UTSEV, J. T.; IWAR, R. T.; IFYALEM, K. J. Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto *Delonix regia* Pod Activated Carbon: Batch Equilibrium Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Studies. **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 11, n. 7, p. 1058-1078, 2020.

VAILATI, A.; XU, S.; AIME, S.; CROCCOLO, F. Diffusion and convection in nature. **The European Physical Journal E**, v. 44, n. 1, p. 45-47, 2021.

VAKILI, A.; ZINATIZADEH, A. A.; RAHIMI, Z.; MOHAMMADI, P.; AZIZI, S.; KARAMI, A.; ABDULGADER, M. The impact of activation temperature and time on the characteristics and performance of agricultural waste-based activated carbons for removing dye and residual COD from wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 382, n. 13, p. 99-112, 2023.

VALLADARES, C.; CRUZ, J. F.; MATEJOVA, L.; HERRERA, E.; GOMEZ, M. M.; SOLIS, J. L.; SOUKUP, K.; SOLCOVÁ, O.; CRUZ, G. J. F. Study of the adsorption of dyes employed in the food industry by activated carbon based on residual forestry. **Peruvian Workshop on Solar Energy**, v. 11, n. 3, p. 11-22, 2019.

VALLE, J. P.; BRASIL, S. P.; CAMPOS, J. D. R.; NAVES, P. L. F. **Impregnação do carvão ativado com prata para controle de biofilmes microbianos**. In: Ciências da Saúde – Saberes e Práticas Interdisciplinares, (Org): PAULA, J. A. M.; AMARAL, V. C. S. Editora UEG: Anápolis, 2019.

VASQUEZ, V.; GIORGI, V.; BONFIGLIO, F.; MENENDEZ, P.; GIOIA, L.; OVSEJEVI, K. Lignocellulosic residues from bioethanol production: a novel source of biopolymers for laccase immobilization. **RSC Advances**, v. 13, n. 23, p. 463-472, 2023.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G.; SONG, Y. C.; LI, W. Y.; FENG, J. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. **Fuel**, v. 208, n. 030024, p. 377-409, 2017.

VEIGA, T. R. L. A.; LIMA, J. T.; DESSIMONI, A. L. DE A.; PEGO, M. F. F.; SOARES, J. R.; TRUGILHO, P. F. Caracterização de diferentes biomassas vegetais para produção de biocarvões. **Cerne**, v. 23, n. 4, p. 529-536, 2017.

VELMURUGAN, G.; SHANKAR, V. S.; NATRAYAN, L.; SEKAR, S.; PATIL, P. P.; KUMAR, M. S.; THANAPPAN, S. Multiresponse optimization of mechanical and physical adsorption properties of activated natural fibers hybrid composites. **Adsorption Science & Technology**, v. 22, n. 13, p. 738-744, 2022.

VILÉN, A.; LAURELL, P.; VAHALA, R. Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials. **Journal of Environmental Management**, v. 324, n. 116, p. 356-365, 2022.

VILLABONA, O. A.; TEJADA, T. C.; ACEVEDO, D.; MENDONZA, Z.; BARRIOS, P. L. Low-temperature activated carbon from mixed biomass oil palm residuals (fibrilla and cuesco) for use in the treatment of oily water. **International Journal of ChemTech Research**, v. 11, n. 5, p. 60-72, 2018.

VIVIAN, M. A.; SANTOS, J. R. S.; SEGURA, T. E. S.; JÚNIOR, F. G. S.; BRITTO, J. O. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar e suas potencialidades para geração de energia e polpa celulósica. **Madera y Bosques**, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2022.

VONNIE, J. M.; LI, C. S.; ERNA, K. H.; YIN, K. W.; FELICIA, W. X. L.; AQILAH, M. N. N.; ROVINA, K. Development of eggshell-based orange peel activated carbon film for synergetic adsorption of cadmium (II) ion. **Nanomaterials**, v. 12, n. 2750, p. 1-16, 2022.

WAN, S.; ZHENG, N.; ZHANG, J.; WANG, J. Role of neutral extractives and inherent active minerals in pyrolysis of agricultural crop residues and bio-oil formation. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, n. 1, p. 53-62, 2019.

WANG, B.; LAN, J.; BO, C.; GONG, B.; OU, J. Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review. **RSC Advances**, v. 13, n. 4, p. 1-28, 2023.

WANG, F.; OUYANG, D.; ZHOU, Z.; PAGE, S. J.; LIU, D.; ZHAO, X. Lignocellulosic biomass as sustainable feedstock and materials for power generation and energy storage. **Journal of Energy Chemistry**, v. 57, n. 1, p. 247-280, 2021.

WANG, H.; XU, J.; LIU, X.; SHENG, L. Preparation of straw activated carbon and its application in wastewater treatment: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, n. 12, p. 671-690, 2021.

WANG, H.; YANG, J.; LI, L.; SHI, K.; LI, X. Effects of oxygen content of pitch precursors on the porous texture and surface chemistry of pitch-based activated carbon fibers. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 248, p. 1-7, 2019.

WANG, J.; GUO, X. Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. **Journal of Hazardous Materials**, v. 390, n. 12, p. 156-174, 2020.

WANG, S.; LEE, Y. R.; WON, Y.; KIM, H.; JEONG, S. E.; HWANG, B. W. *et al.* Development of high-performance adsorbent using KOH-impregnated rice husk-based activated carbon for indoor CO₂ adsorption. **Chemical Engineering Journal**, v. 437, n. 13, p. 378-394, 2022.

WANG, S.; NAM, H.; LEE, D.; NAM, H. H₂S gas adsorption study using copper impregnated on KOH activated carbon from coffee residue for indoor air purification. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 10, p. 797-808, 2022.

WEI, X.; XUE, X.; WU, L.; YU, H.; LIANG, J.; SUN, Y. High-grade bio-oil produced from coconut shell: A comparative study of microwave reactor and core-shell catalyst. **Energy**, v. 212, n. 118692, p. 1-10, 2020.

WEI, Y.; JIA, X.; CHEN, Y.; JI, J. Single step carbonating and activating fir sawdust to activated carbon by recyclable molten carbonates and steam. **Science of The Total Environment**, v. 818, n. 15, p.78-87, 2022.

WU, L.; LI, Y.; FU, Z.; SU, B. L. Hierarchically structured porous materials: synthesis strategies and applications in energy storage. **National Science Review**, v. 7, n. 16, p. 1667-1701, 2020.

WU, S.; WEI, Z.; MOHAMED, T. A.; ZHENG, G.; QU, F.; WANG, F.; ZHAO, Y.; SONG, C. Lignocellulosic biomass bioconversion during composting: mechanism of action of lignocellulase, pretreatment methods and future perspectives. **Chemosphere**, v. 286, n. 131, p. 635-650, 2022.

XIAO, B.; HUANG, L.; HUANG, W.; ZHANG, D.; ZENG, X.; YAO, X. Glycine functionalized activated carbon derived from navel orange peel for enhancement recovery of Gd(III). **Journal of Rare Earths**, v. 40, n. 17, p. 94-102, 2022.

XU, S.; JIN, Y.; LI, R.; SHAN, M.; ZHANG, Y. Amidoxime modified polymers of intrinsic microporosity/alginate composite hydrogel beads for efficient adsorption of cationic dyes from aqueous solution. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 607, n. 8, p. 90-99, 2022.

YADAV, A.; DINDORKAR, S. S. Adsorption behaviour of hexagonal boron nitride nanosheets towards cationic, anionic and neutral dyes: insights from first principle studies. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 640, n. 12, p. 509-519, 2022.

YAHYA, H. S. M.; ABBAS, T.; ALIAS, H.; AMIN, N. A. S. Steam reforming of toluene over Ni-Co/modified-activated carbon catalyst for hydrogen production: thermodynamic and experimental analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 50, n. 5, p. 61-77, 2024.

YAN, J. The impact of climate policy on fossil fuel consumption: evidence from the regional greenhouse gas initiative (RGGI). **Energy Economics**, v. 100, n. 105333, p. 1-11, 2021.

YANG, Z.; GLEISNER, R.; MANN, D. H.; XU, J.; JIANG, J.; ZHU, J. Y. Lignin Based Activated Carbon Using H₃PO₄ Activation. **Polymers**, v. 12, n. 28, p. 1-16, 2020.

YAZID, H.; BOUZID, T.; HIMRI, M. E.; REGTI, A.; HADDAD, M. E. Bisphenol A (BPA) remediation using walnut shell as activated carbon employing experimental design for parameter optimization and theoretical study to establish the adsorption mechanism. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 161, n. 11, p. 264-283, 2024.

YEPES-SANCHEZ, A.; SANTOS, A.; ROSAS, J. M.; RODRIHUEZ-MIRASOL, J.; CORDERO, T.; LORENZO, D. Regeneration of Granulated Spent Activated Carbon with 1,2,4-Trichlorobenzene Using Thermally Activated Persulfate. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 61, n. 96, p. 11-20, 2022.

YERDAULETOV, M. S.; NAZAROV, K.; MUKHAMETULY, B.; YELEUOV, M. A.; DAULBAYEV, C.; ABDULKARIMOVA, R. *et al.* Characterization of activated carbon from rice husk for enhanced energy storage devices. **Molecules**, v. 28, n. 5818, p. 1-12, 2023.

YILDIZ, A.; AÇIKBAS, B.; ATAV, R.; DALMIS, I. S.; BAYRAMOL, D. V.; BUGDAYCI, B. From industrial waste to carbon-containing nanocomposites to obtain multifunctional properties for industrial applications. **Industrial Crops and Products**, v. 188, n. 15, p. 1-10, 2022.

YOO, C. G.; MENG, X.; PU, Y.; RAGAUSKAS, A. J. The critical role of lignin in lignocellulosic conversion and recent pretreatment strategies: a comprehensive review. **Bioresource Technology**, v. 301, n. 12, p. 84-94, 2020.

YOUSFI, N.; FETTAKA, H.; VELASCO, L. F.; LODEWYCKX, P.; BOUTILLARA, Y.; TAZIBET, S. Efficiency comparison of activated carbons prepared in inert and in self-generated atmospheres. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 3, n. 6, p. 1-9, 2020.

YU, D.; MA, Y.; CHEN, M.; DONG, X. KOH activation of wax gourd-derived carbon materials with high porosity and heteroatom content for aqueous or all-solid-state supercapacitors. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 537, n. 5, p. 69-78, 2019.

YU, Y.; QIAO, N.; WANG, D.; ZHU, Q.; FU, F.; CAO, R.; WANG, R.; LIU, W.; XU, B. Fluffy honeycomb-like activated carbon from popcorn with high surface area and well-developed porosity for ultra-high efficiency adsorption of organic dyes. **Bioresource Technology**, v. 285, n. 12, p. 1-10, 2019.

YUAN, J.; PASSEPORT, E.; HOFMANN, R. Understanding adsorption and biodegradation in granular activated carbon for drinking water treatment: a critical review. **Water Research**, v. 21, n. 11, p. 26-43, 2022.

ZAICHENKO, V. M.; KNYAZEVA, M. I.; KRYLOVA, A. Y.; KULIKOV, A. B.; FALEEVA, Y. M. Pyrolysis of coffee husks and parchment. **Solid Fuel Chemistry**, v. 55, n. 1, p. 62-67, 2021.

ZAKARIA, R.; JAMALLUDDIN, N. A.; BAKAR, M. Z. A. Effect of impregnation ratio and activation temperature on the yield and adsorption performance of mangrove based activated carbon for methylene blue removal. **Results in Materials**, v. 10, n. 10, p. 183-194, 2021.

ZANGI, R. Breakdown of Langmuir adsorption isotherm in small closed systems. **Langmuir**, v. 40, n. 39, p. 1-10, 2024.

ZEFERINO, M.; RAMOS, S. Mercado mundial de óleos vegetais: panorama e perspectivas. **Análise e Indicadores do Agronegócio**, v. 18, n. 5, p. 1-8, 2023.

ZELEKE, N. M.; SINHA, D. K.; MENGESHA, G. A. Chemical Composition and Extraction of Micro Crystalline Cellulose from Outer Skin Isolated Coffee Husk. **Hindawi**, v. 2022, n. 7163359, p. 1-13, 2022.

ZGOLLI, A.; SOUISSI, M.; DHAOUADI, H. Purification of pesticide contaminated water using activated carbon from prickly pear seeds for environmentally friendly reuse in a circular econmy. **Sustainability**, v. 16, n. 406, p. 1-20, 2024.

ZHANG, J. Physical insights into kinetic models of adsorption. **Separation and Purification Technology**, v. 229, n. 11, p. 1-11, 2019.

ZHANG, J.; BAI, J.; DUAN, M.; YANG, J.; BIAN, L. Derivation of adsorption capacity and adsorption isotherm by a single adsorbate concentration in liquid–solid system. **Chemical Papers**, v. 75, n. 24, p. 59-76, 2021.

ZHANG, K.; PEI, Z.; WANG, D. Organic solvent pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and biochemicals: A review. **Bioresource Technology**, v. 2, n. 1, p. 1-13, 2015.

ZHANG, L.; PAN, J.; LIU, L.; SONG, K.; WANG, Q. Combined physical and chemical activation of sludge-based adsorbent enhances Cr (VI) removal from wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, n. 117, p. 904-913, 2019.

ZHANG, P.; LU, S.; LI, J.; XUE, H.; LI, W.; ZHANG, P. Characterization of shale pore system: a case study of Paleogene Xin'gouzui formation in the Jiangnan basin, China. **Marine and Petroleum Geology**, v. 79, n. 3, p. 21-34, 2017.

ZHANG, Q.; CHENG, L.; MA, X.; ZHOU, X.; XU, Z. Revalorization of sunflower stalk pith as feedstock for the coproduction of pectin and glucose using a two-step dilute acid pretreatment process. **Biotechnology and Biofuels**, v. 14, n. 1, p. 94-53, 2021.

ZHANG, W.; QIU, X.; WANG, C.; ZHONG, L.; FU, F.; ZHU, J.; ZHANG, Z.; QIN, Y.; YANG, D.; XU, C. C. Lignin derived carbon materials: current status and future trends. **Carbon Research**, v. 1, n. 14, p. 1-39, 2022.

ZHANG, X.; LI, Y.; LI, G.; HU, C. Preparation of Fe/activated carbon directly from rice husk pyrolytic carbon and its application in catalytic hydroxylation of phenol. **RSC Advances**, v. 5, n. 49, p. 1-9, 2015.

ZHAO, C.; GE, L.; LI, X.; ZUO, M.; XU, M.; CHEN, C.; LI, Q.; WANG, Y.; XU, C. Effects of the carbonization temperature and intermediate cooling mode on the properties of coal-based activated carbon. **Energy**, v. 273, n. 12, p. 77-86, 2023.

ZHAO, H.; YU, Q.; LI, M.; SUN, S. Preparation and water vapor adsorption of green walnut-shell activated carbon by CO₂ physical activation. **Adsorption Science & Technology**, v. 38, n. 2, p. 60-76, 2020.

ZHAO, H.; ZHONG, H.; JIANG, Y.; LI, H.; TANG, P.; LI, D.; FENG, Y. Porous ZnCl₂ activated carbon from shaddock peel: methylene blue adsorption behavior. **Material**, v. 15, n. 895, p. 1-16, 2022.

ZHAO, W.; CHEN, L.; JIAO, Y. Preparation of activated carbon from sunflower straw through H₃PO₄ activation and its application for acid fuchsin dye adsorption. **Water Science and Engineering**, v. 16, n. 2, p.192-202, 2023.

ZHAO, Y.; SHI, H.; TANG, X.; KUANG, D.; ZHOU, J.; YANG, F. performance and mechanism of As(III/V) removal from aqueous solution by Fe₃O₄-sunflower straw biochar. **Toxic**, v. 10, n. 534, p. 1-16, 2022.

ZHAO, Z.; WANG, B.; THENG, B. K.; LEE, X.; ZHANG, X.; CHEN, M.; XU, P. Removal performance, mechanisms, and influencing factors of biochar for air pollutants: a critical review. **Biochar**, v. 4, n. 30, p. 1-24, 2022.

ZHONG, L.; ZHANG, Y.; WANG, T.; JI, Y.; NORRIS, P.; PAN, W. P. Optimized methods for preparing activated carbon from rock asphalt using orthogonal experimental design. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 136, n. 19, p. 89-99, 2019.

ZHOU, T.; XIA, F.; DENG, Y.; ZHAO, Y. Removal of Pb (II) from aqueous solutions using waste textiles/poly(acrylic acid) composite synthesized by radical polymerization technique. **Journal of Environmental Sciences**, v. 67, n. 3, p. 68-77, 2018.

ZHUANG, S.; CHENG, R.; WANG, J. Adsorption of diclofenac from aqueous solution using UiO-66-type metal-organic frameworks. **Chemical Engineering Journal**, v. 359, n. 3, p. 54-62, 2019.

ZHURKA, M.; SPYRIDONIDIS, A.; VASILIADOU, I. A.; STAMATELATOU, K. Biogas production from sunflower head and stalk residues: effect of alkaline pretreatment. **Molecules**, v. 25, n. 164, p. 1-15.

ZIELINSKI, B.; MIADLICKI, P.; PRZEPIORSKI, K. Development of activated carbon for removal of pesticides from water: case study. **Scientific Reports**, v. 12, n. 20, p. 1-14, 2022.

ZIEZIO, M.; CHARMAS, B.; JEDYNAK, K.; HAWRYLUK, M.; KUCIO, K. Preparation and characterization of activated carbons obtained from the waste materials impregnated with phosphoric acid(V). **Applied Nanoscience**, v. 10, n. 4, p. 03-16, 2020.

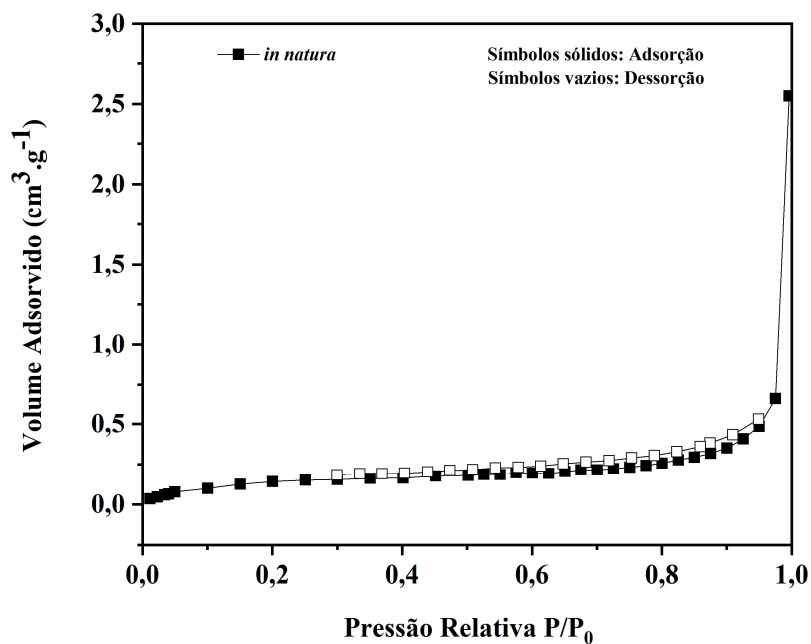
ZINLA, D.; GBAHA, P.; KOFFI, P. M. E.; KOUA, B. K. Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in Cote d'Ivoire. **Fuel**, v. 283, n. 119256, p. 1-9, 2021.

ZOGLAMI, A.; PAES, G. Lignicellulosic biomass: understanding recalcitrance and predicting hydrolysis. **Frontiers in Chemistry**, v. 7, n. 874, p. 1-11, 2019.

ZORNITTA, R. L.; BARCELOS, K. M.; NOGUEIRA, F. G. E.; RUOTOLO, L. A. M. Understanding the mechanism of carbonization and KOH activation of polyaniline leading to enhanced electrosorption performance. **Carbon**, v. 156, n. 3, p. 46-58, 2020.

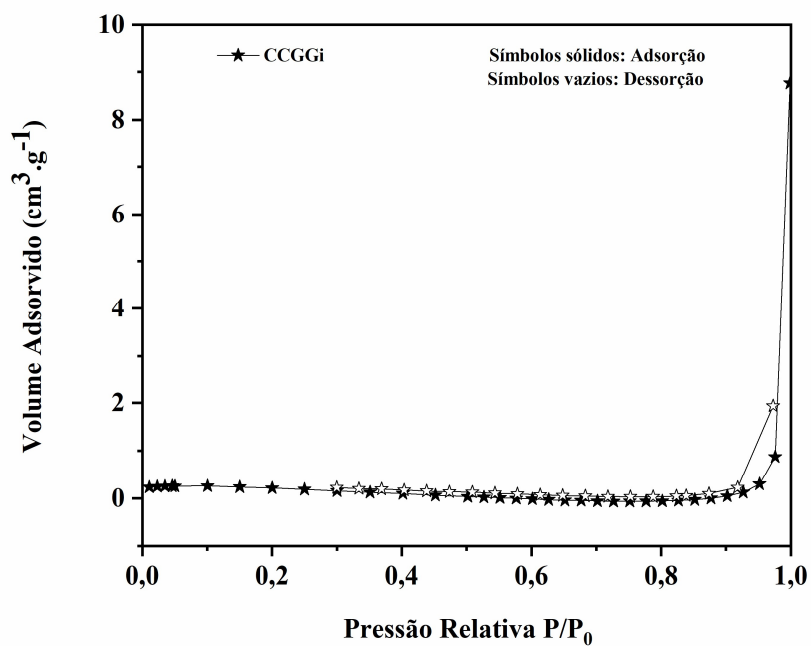
APÊNDICE A – ISOTERMAS DE ADSORÇÃO-DESSORÇÃO DE N₂

Figura 1. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra *in natura* de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh.



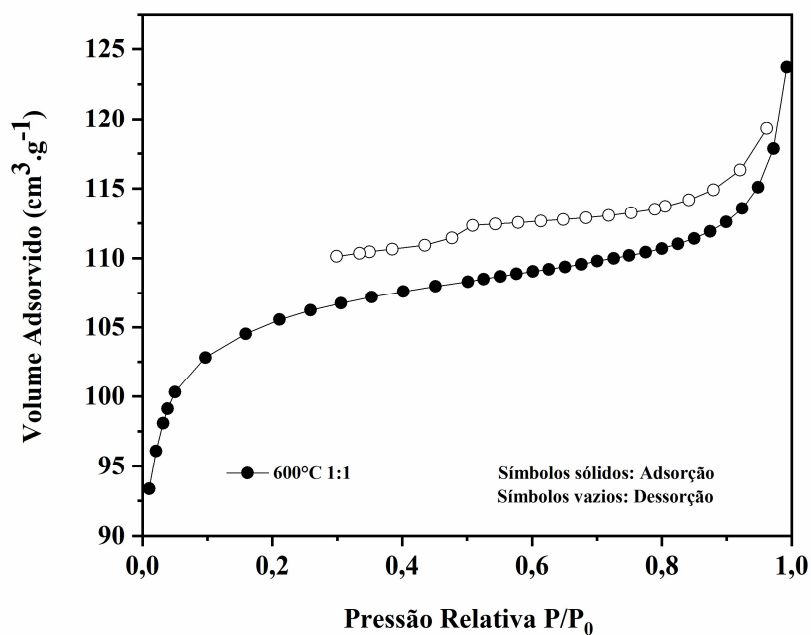
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 2. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CCGGi.



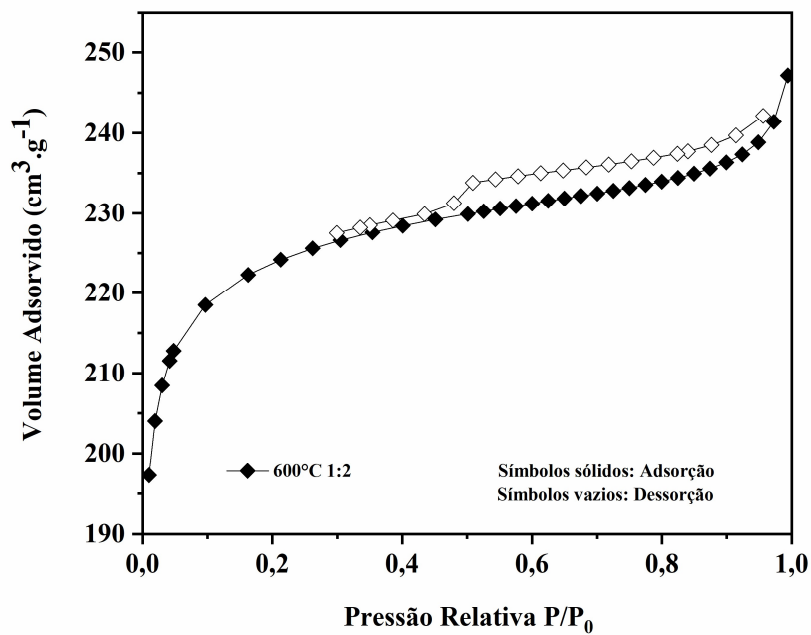
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 3. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 600 – 1:1.



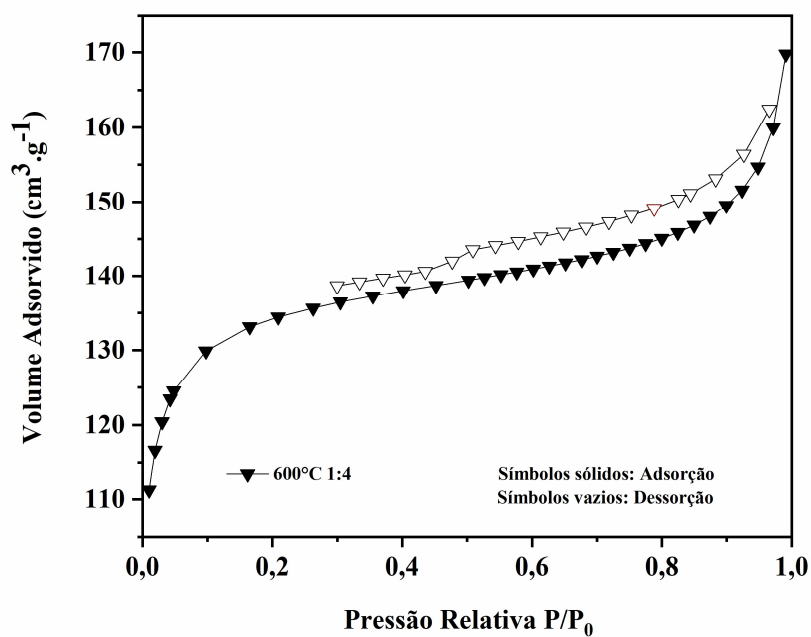
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 4. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 600 – 1:2.



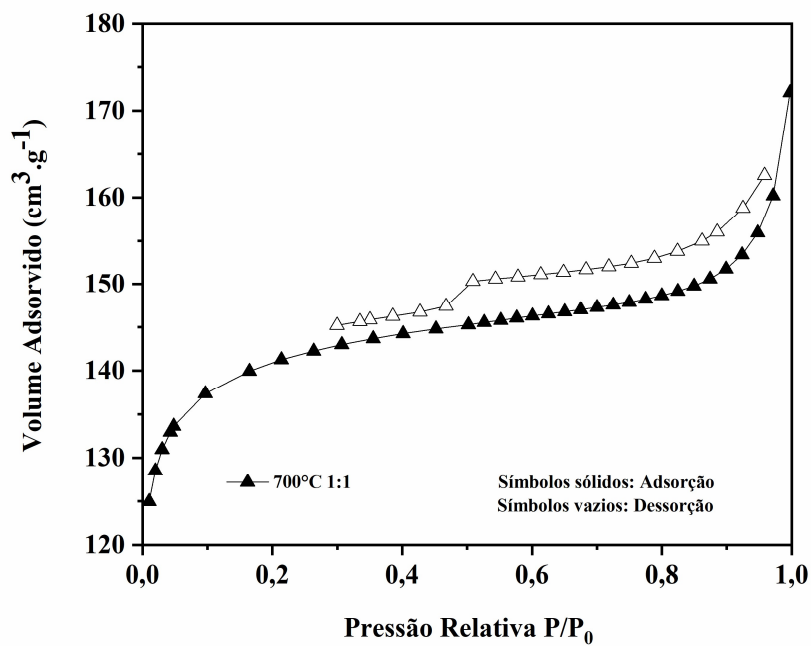
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 5. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 600 – 1:4.



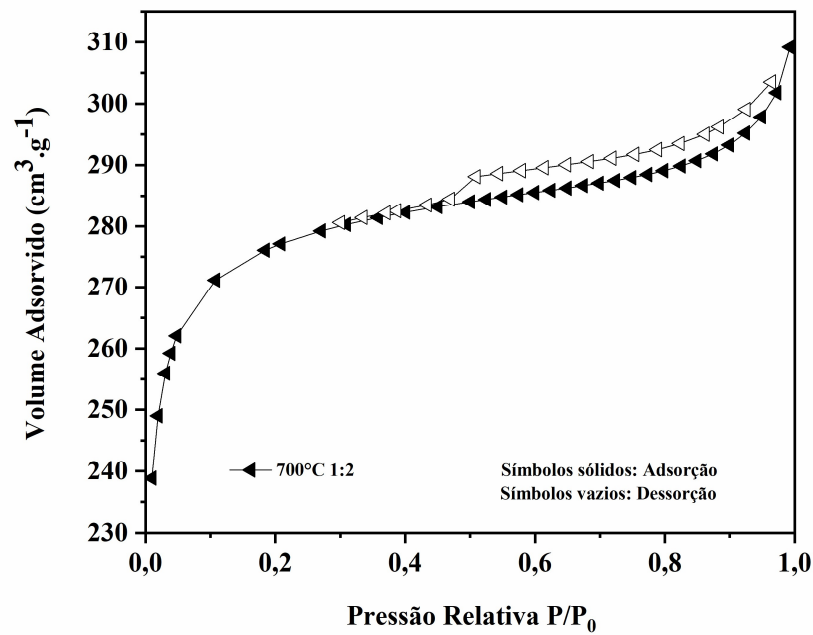
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 6. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 700 – 1:1.



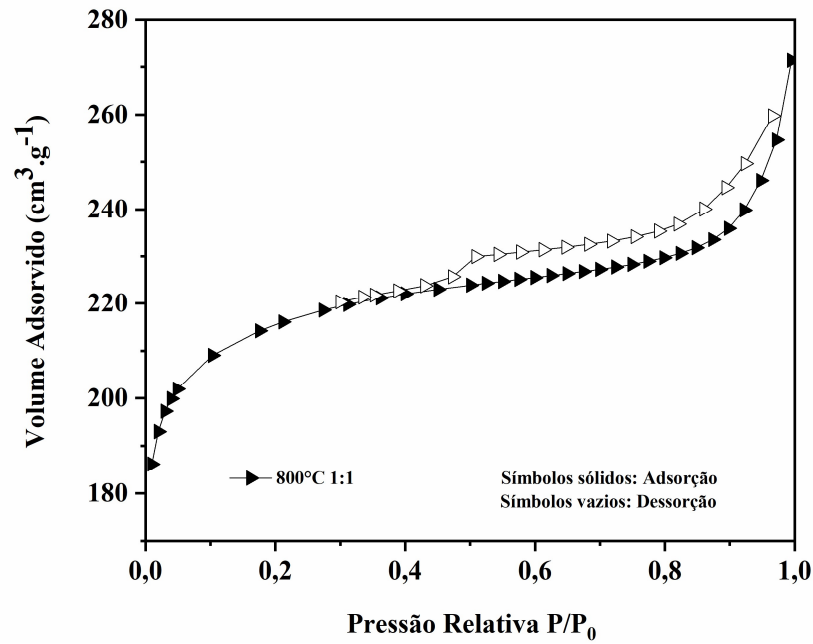
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 7. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 700 – 1:2.



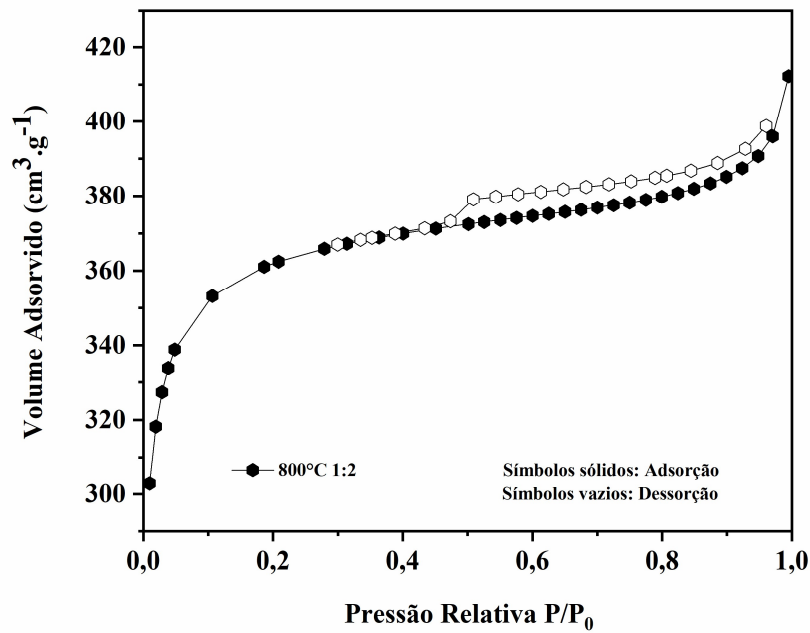
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 8. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 800 – 1:1.



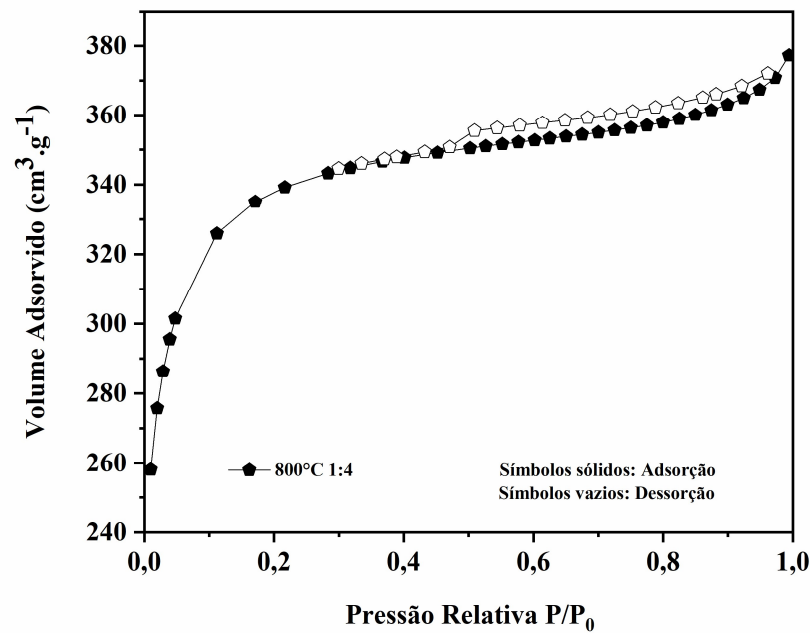
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 9. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 800 – 1:2.



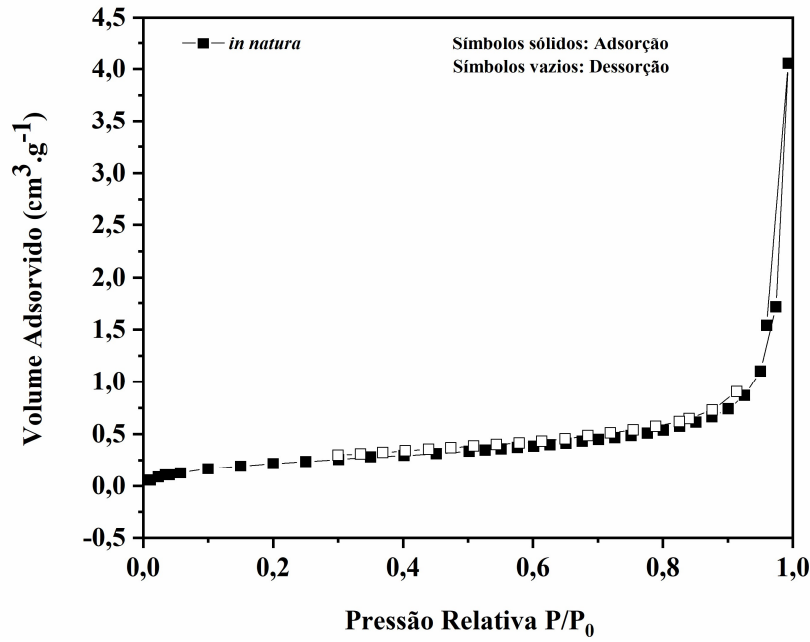
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 10. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CAGi 800 – 1:4.



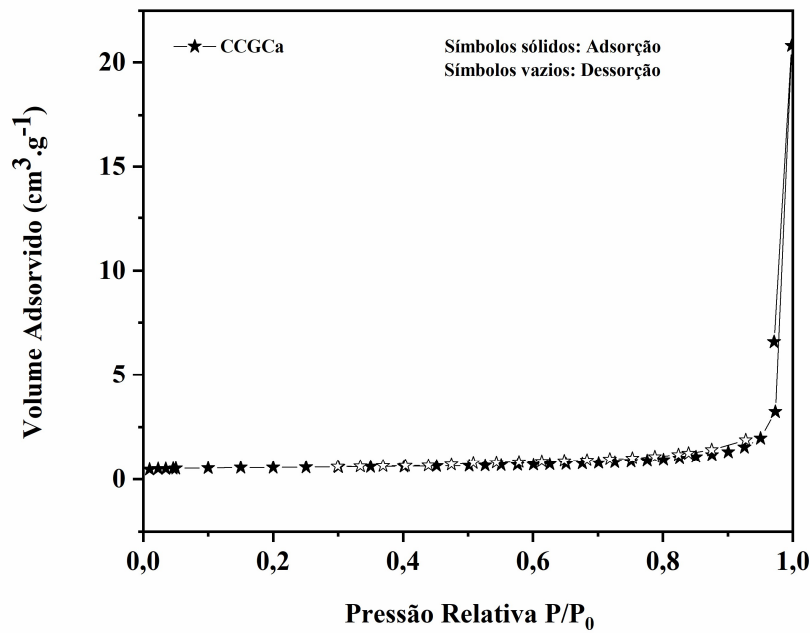
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 11. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra *in natura* de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh.



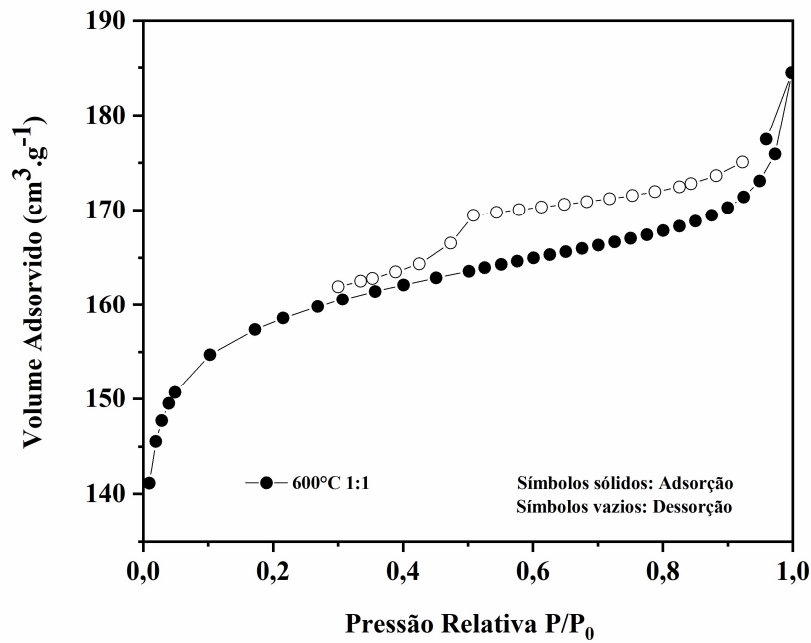
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 12. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CCGCa.



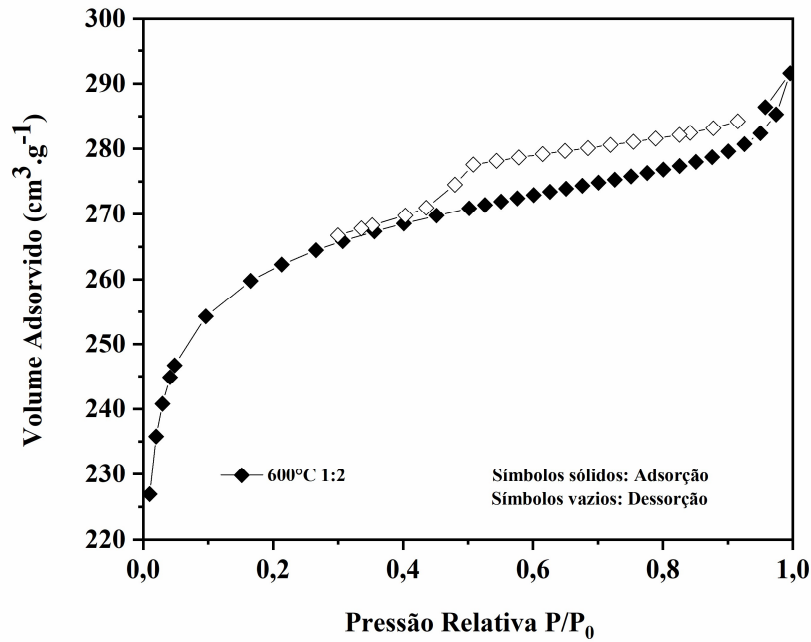
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 13. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 600 – 1:1.



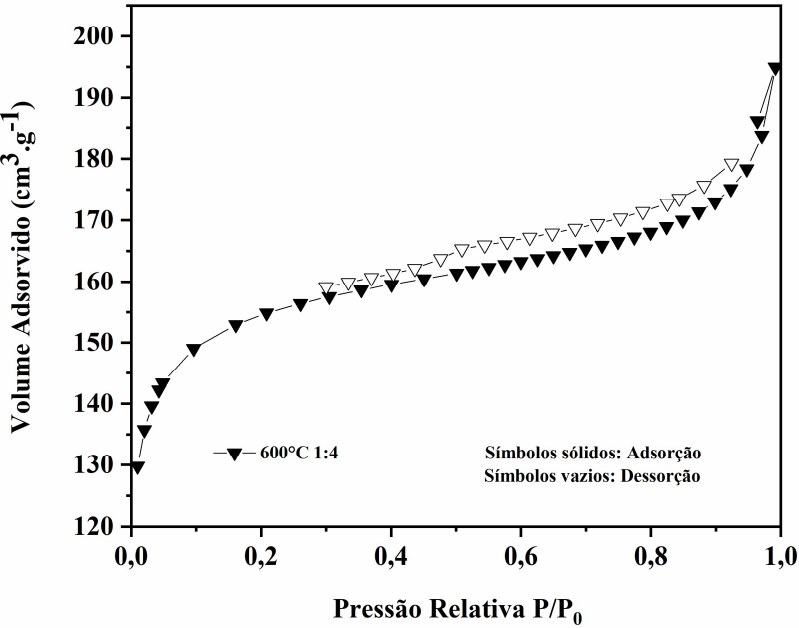
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 14. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 600 – 1:2.



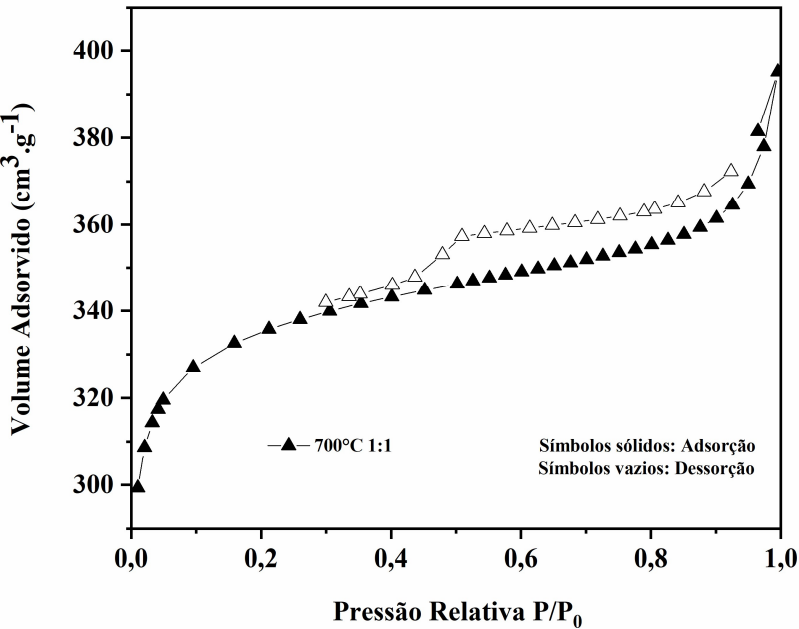
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 15. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 600 – 1:4.



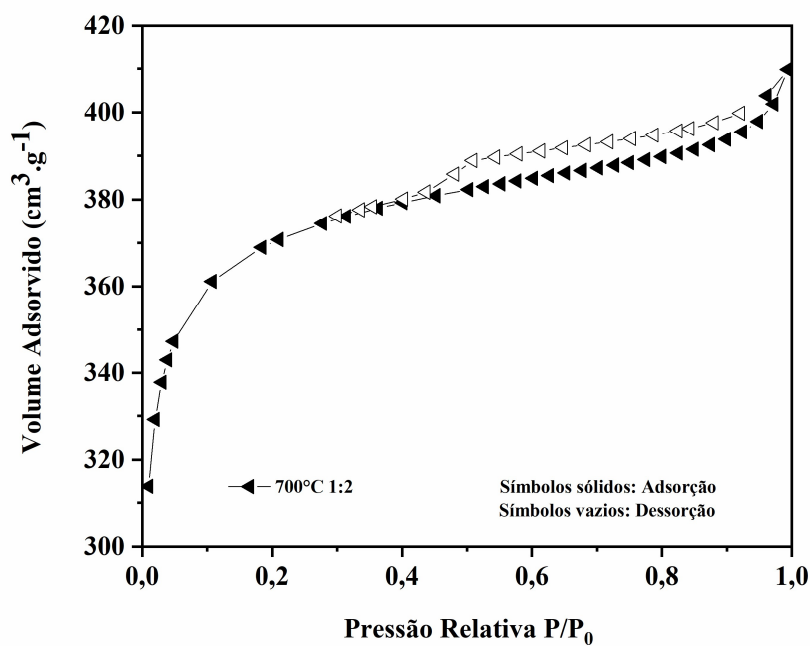
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 16. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 700 – 1:1.



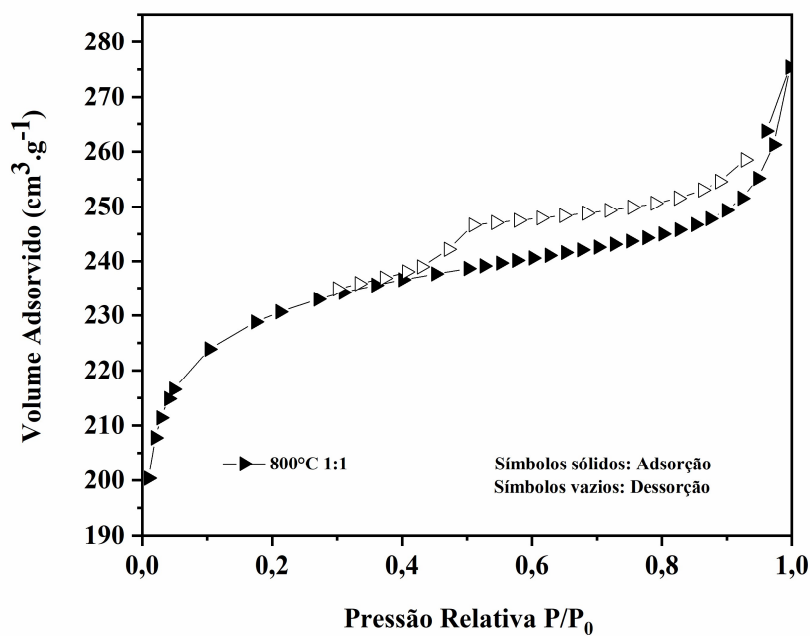
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 17. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 700 – 1:2.



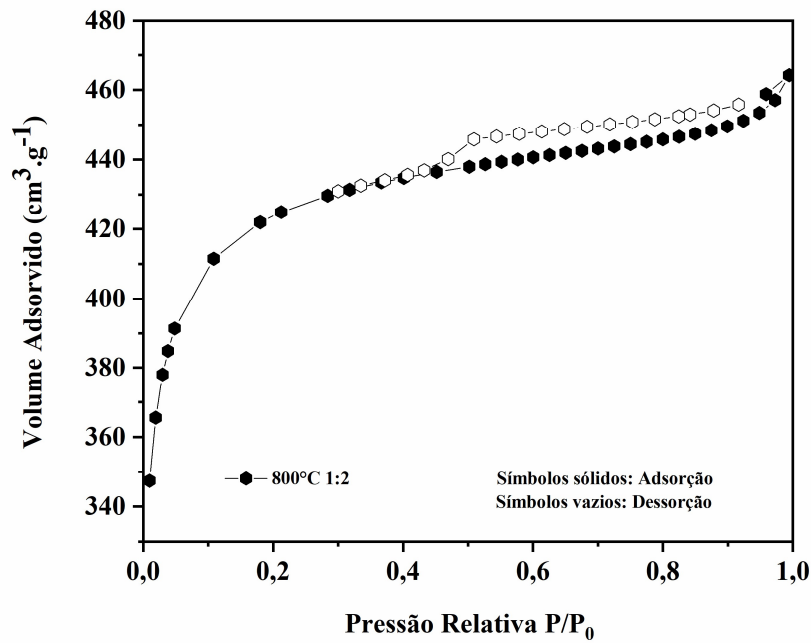
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 18. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 800 – 1:1.



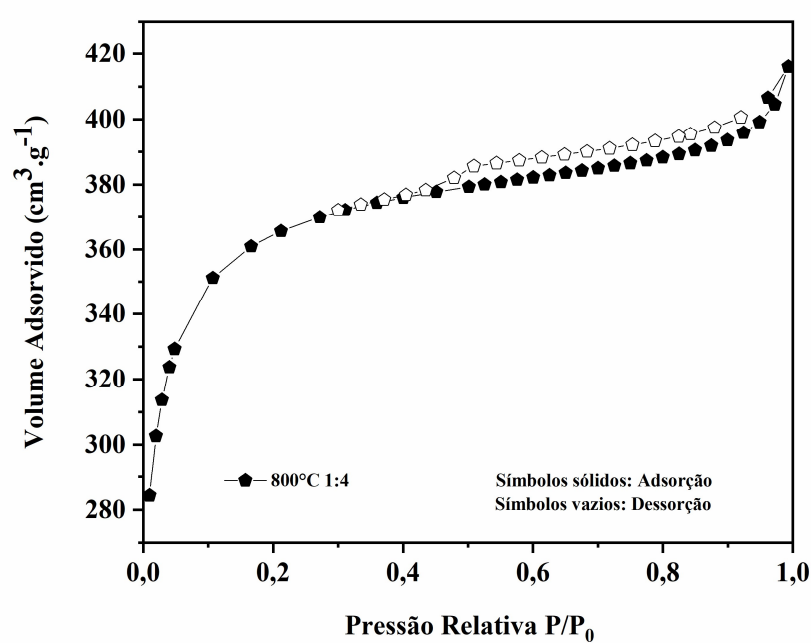
FONTE: Do autor, 2024.

Figura 19. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 800 – 1:2.



FONTE: Do autor, 2024.

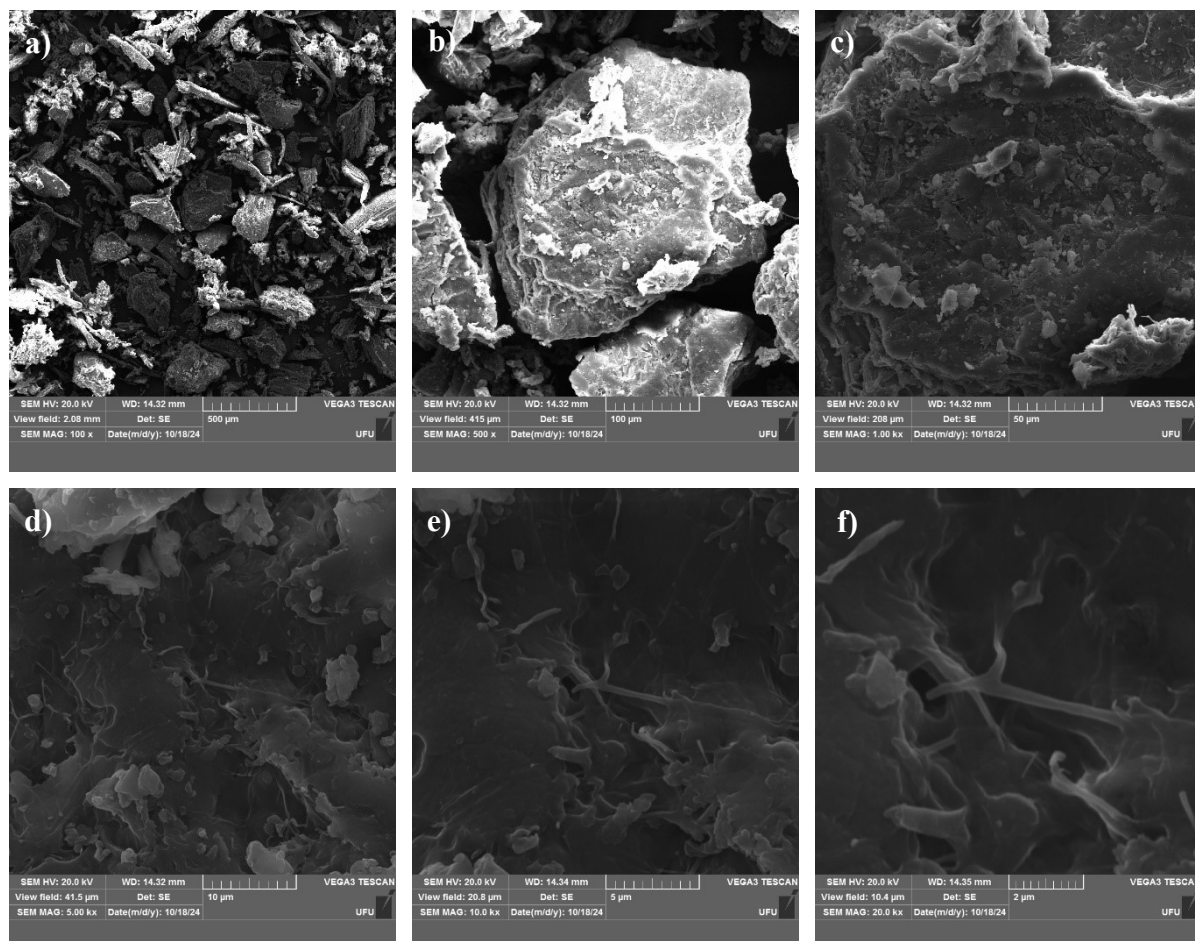
Figura 20. Isotermas de adsorção-dessorção de gás nitrogênio para a amostra CACa 800 – 1:4.



FONTE: Do autor, 2024.

APÊNDICE B – MICROGRAFIAS (MEV)

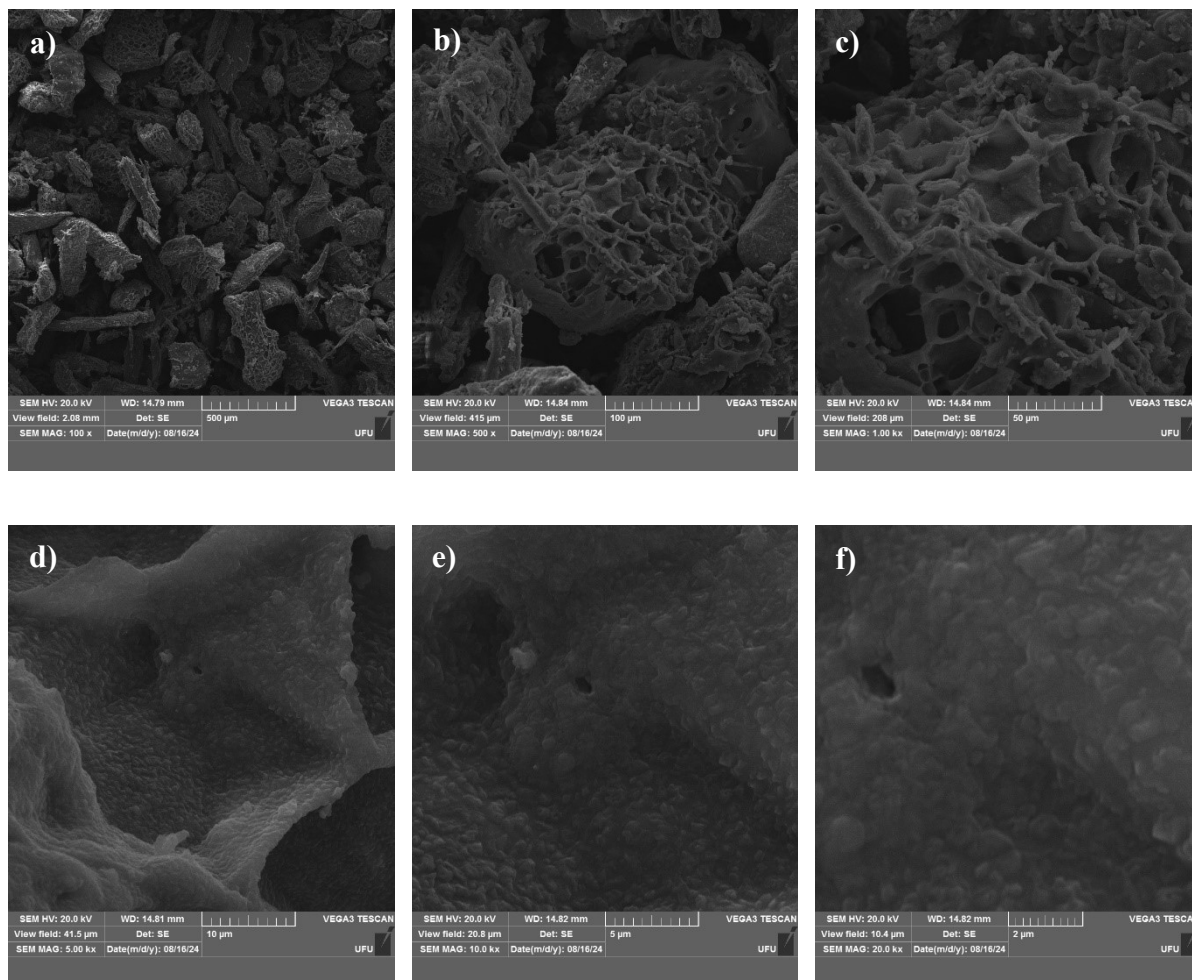
Figura 1. Micrografias referentes a amostra de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh, com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 µm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 µm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 µm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.

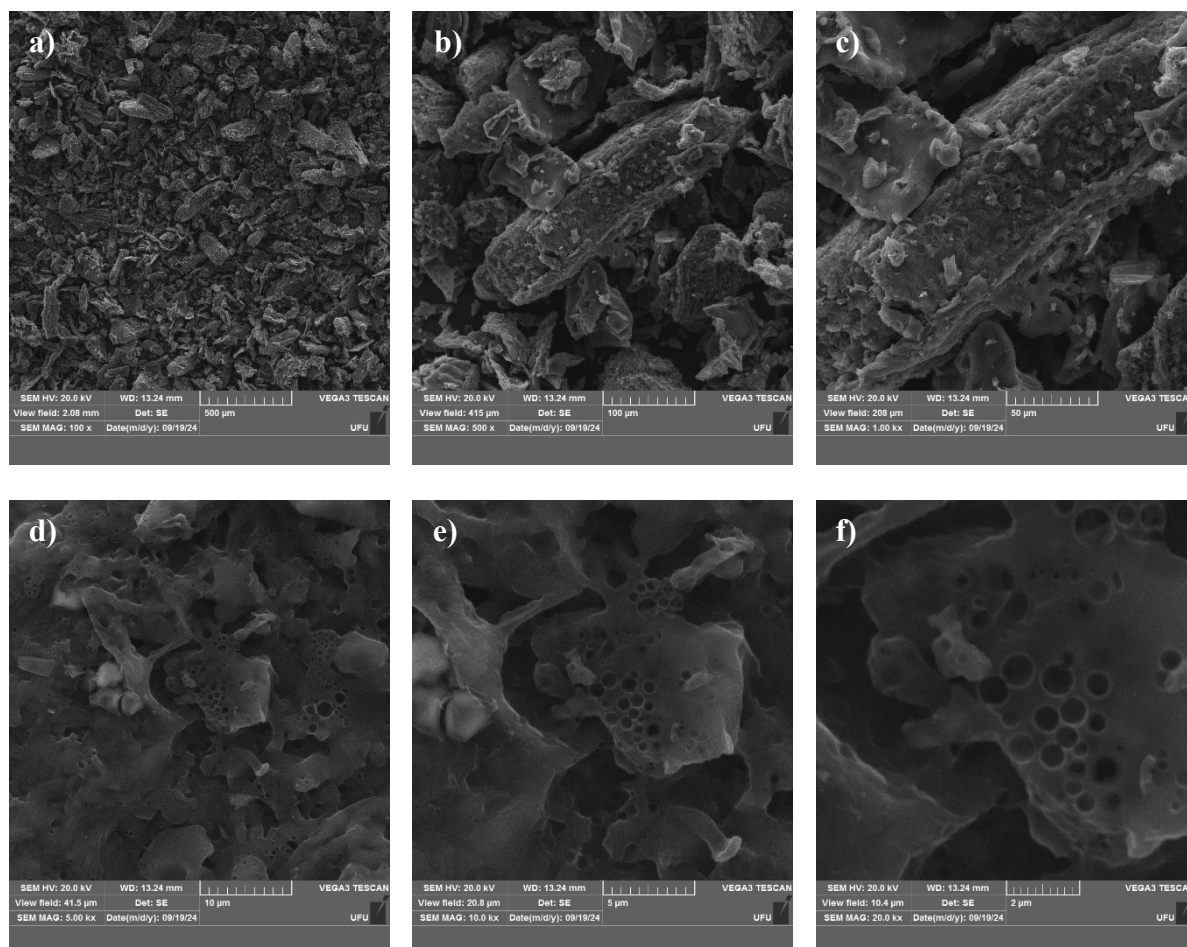
Figura 2. Micrografias referentes a amostra de carvão de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh, com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μ m; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μ m; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μ m; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μ m; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μ m e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μ m.

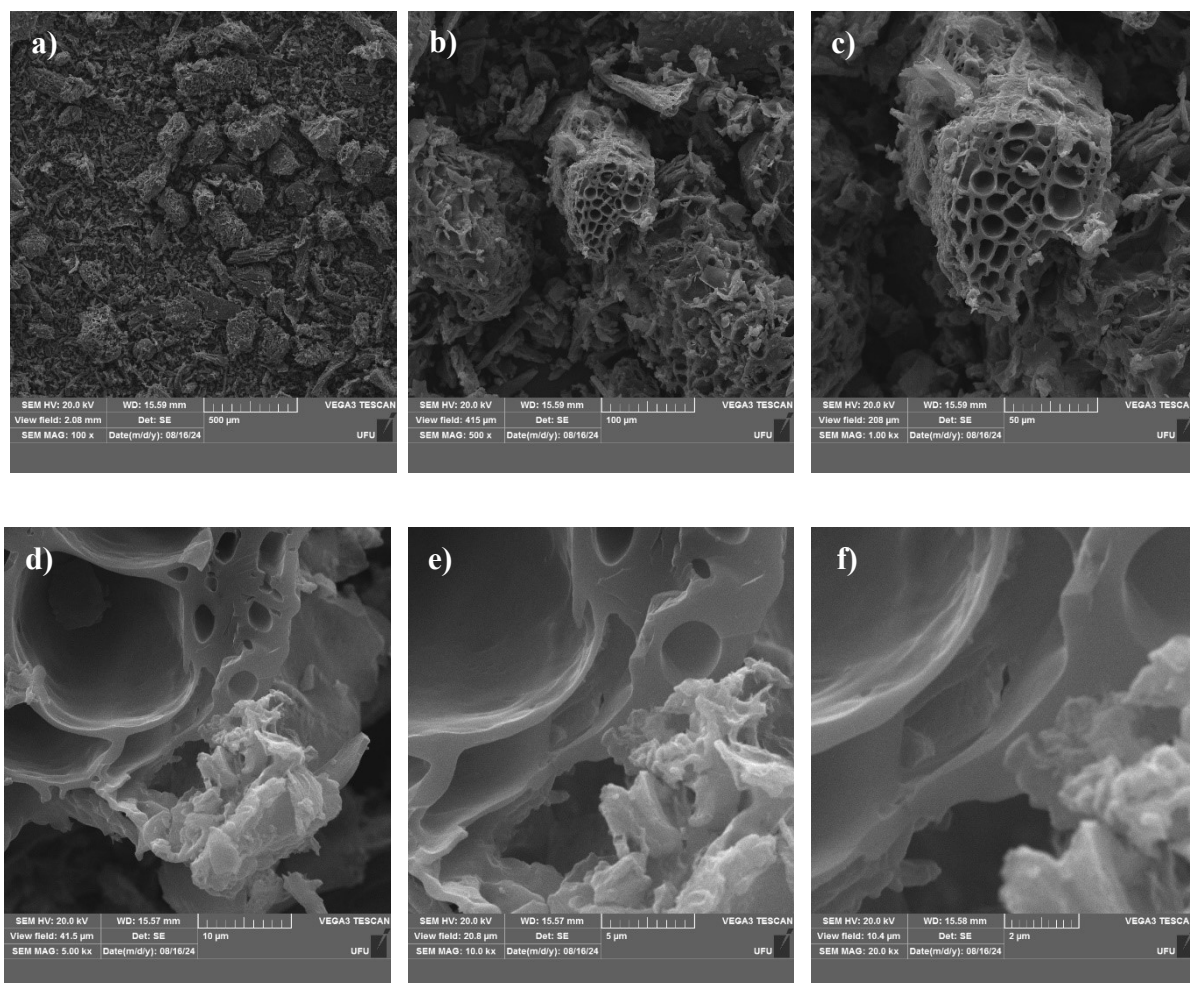
Figura 3. Micrografias referentes a amostra CACa 600°C – 1:1 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 µm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 µm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 µm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.

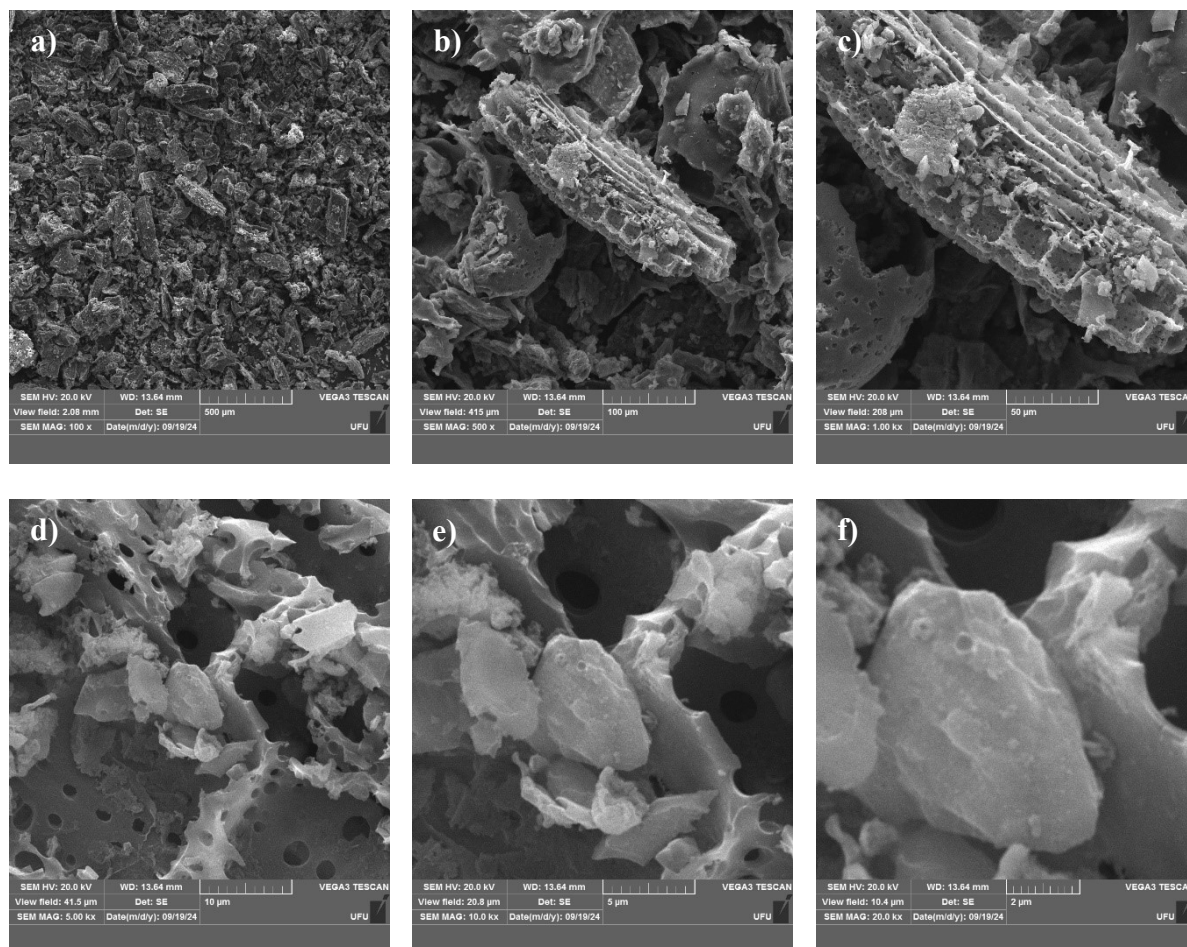
Figura 4. Micrografias referentes a amostra CACa 600°C – 1:2 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 µm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 µm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 µm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.

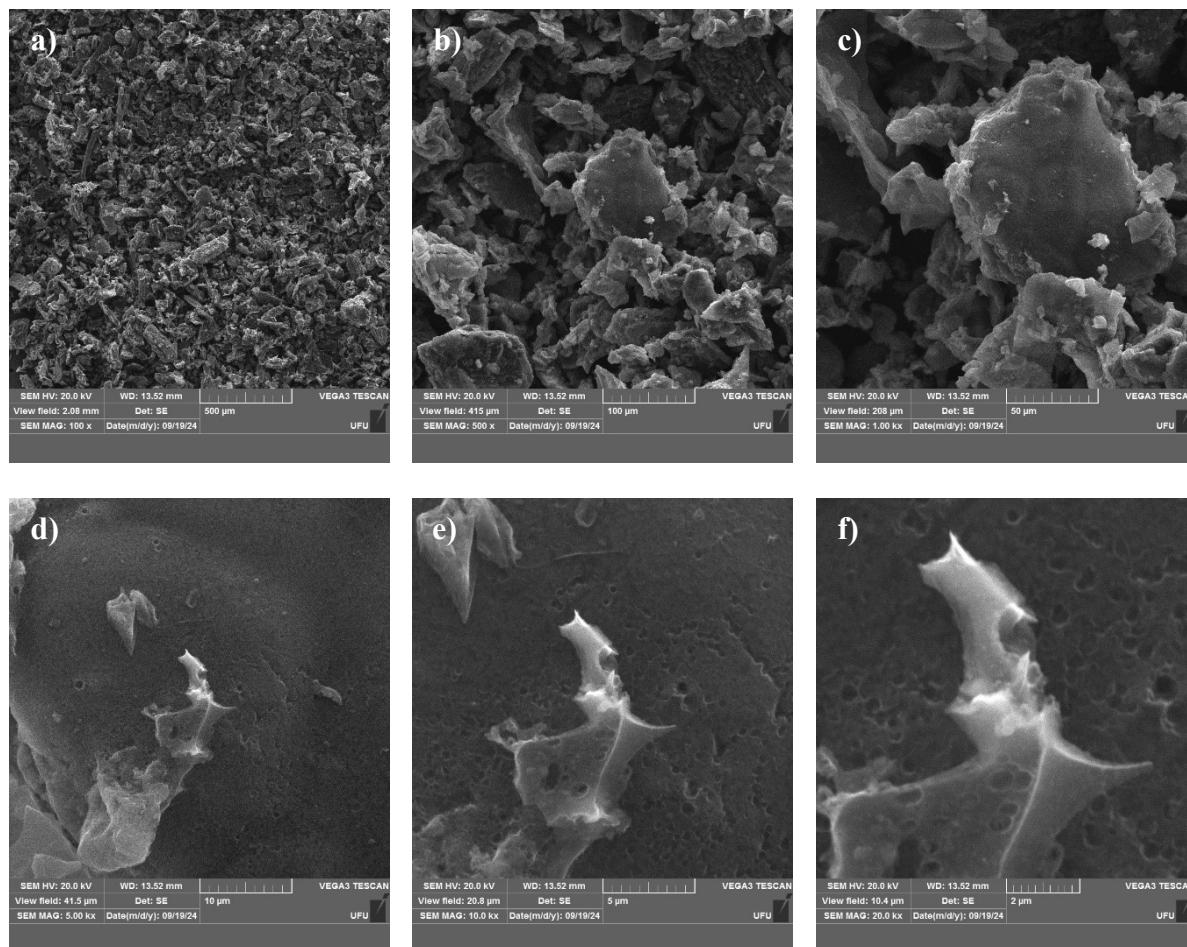
Figura 5. Micrografias referentes a amostra CACa 600°C – 1:4 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 µm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 µm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 µm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.

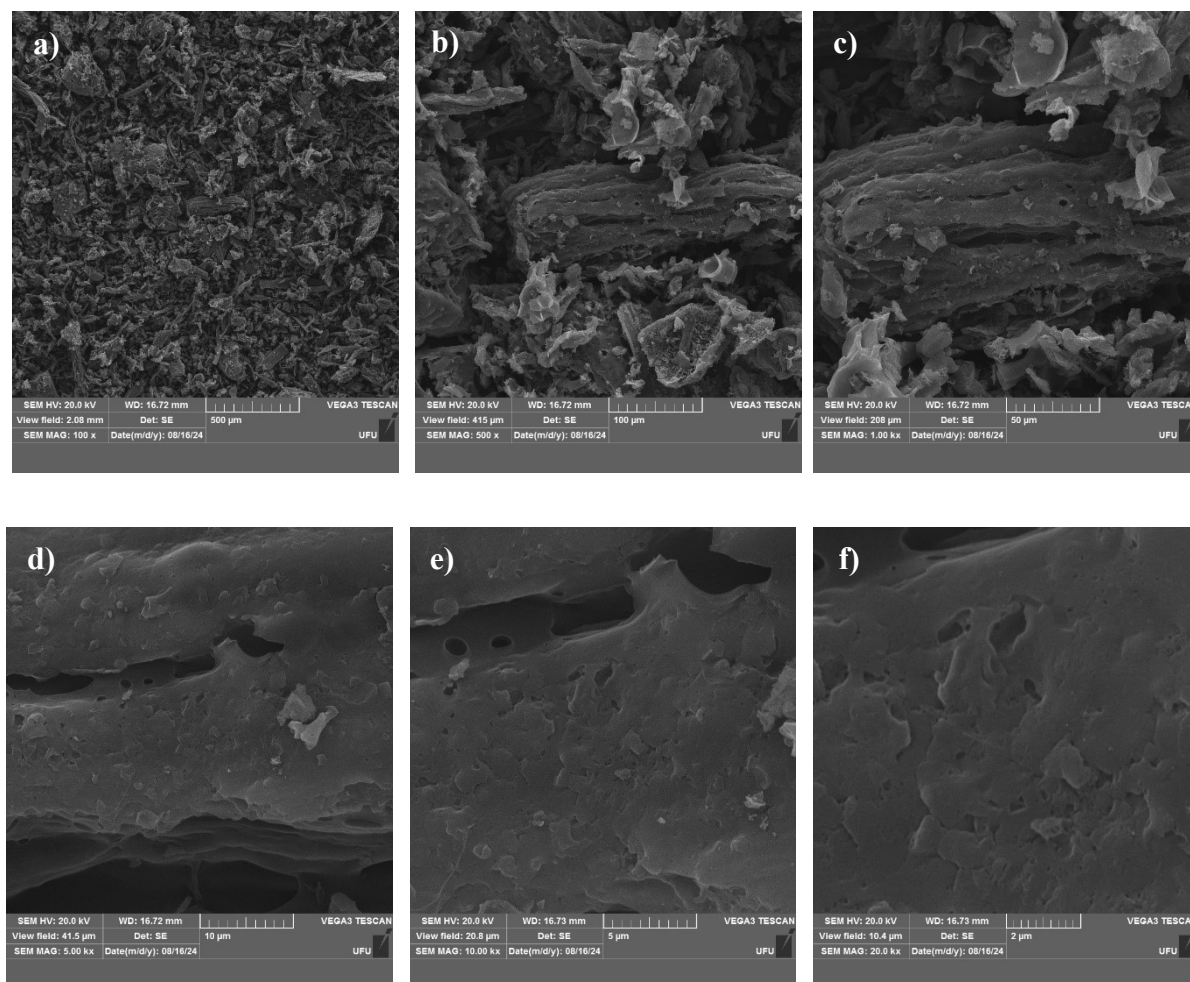
Figura 6. Micrografias referentes a amostra CACa 700°C – 1:1 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μ m; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μ m; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μ m; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μ m; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μ m e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μ m.

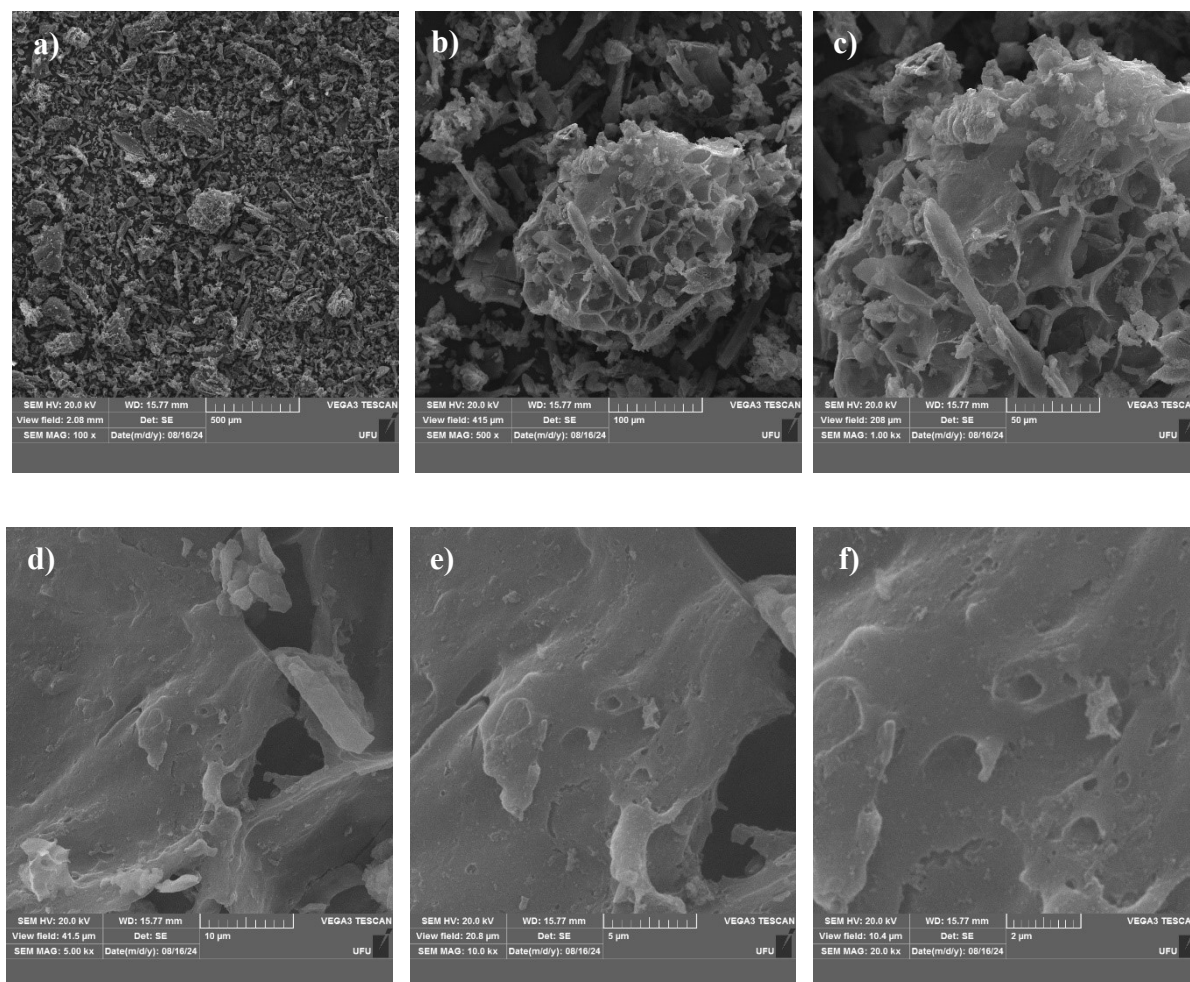
Figura 7. Micrografias referentes a amostra CACa 700°C – 1:2 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm.

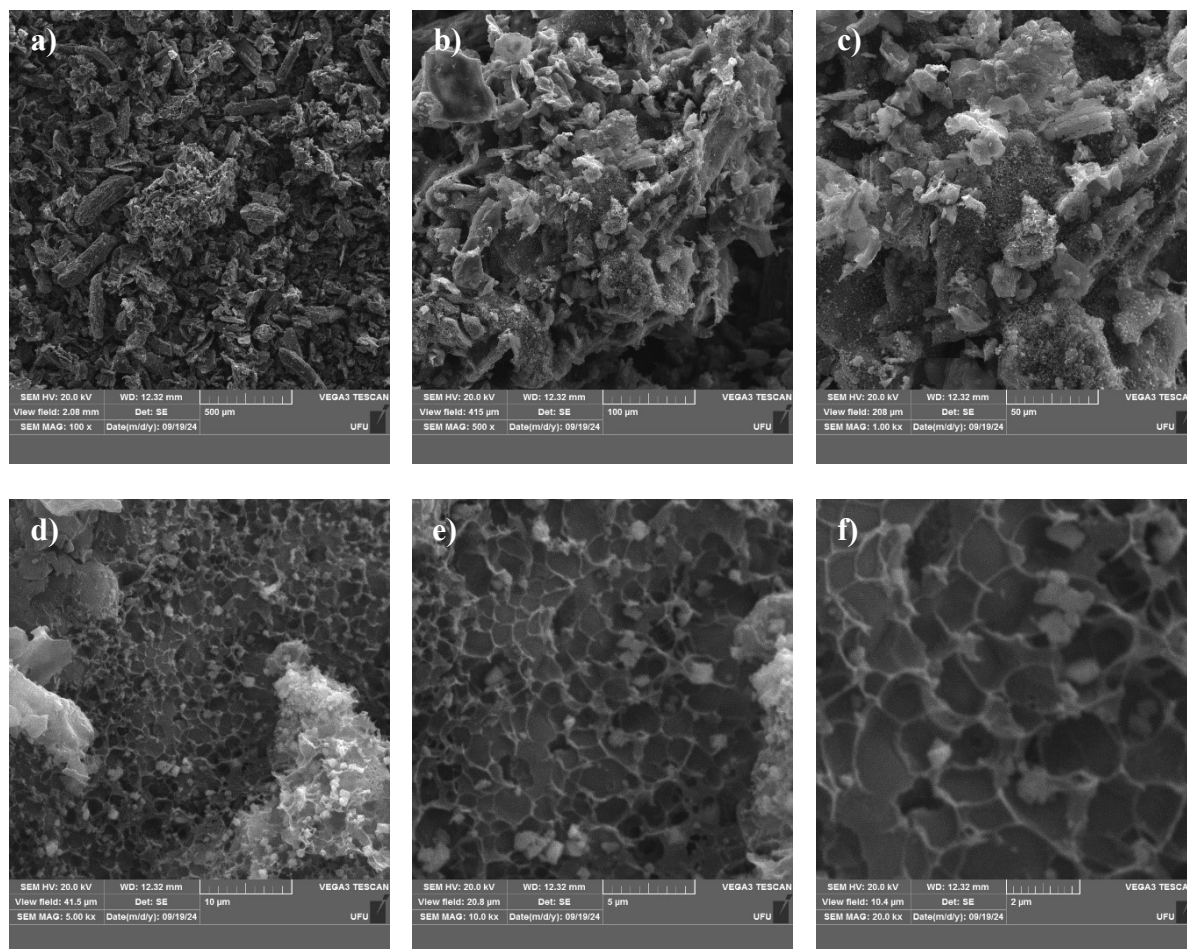
Figura 8. Micrografias referentes a amostra CACa 700°C – 1:4 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 µm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 µm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 µm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.

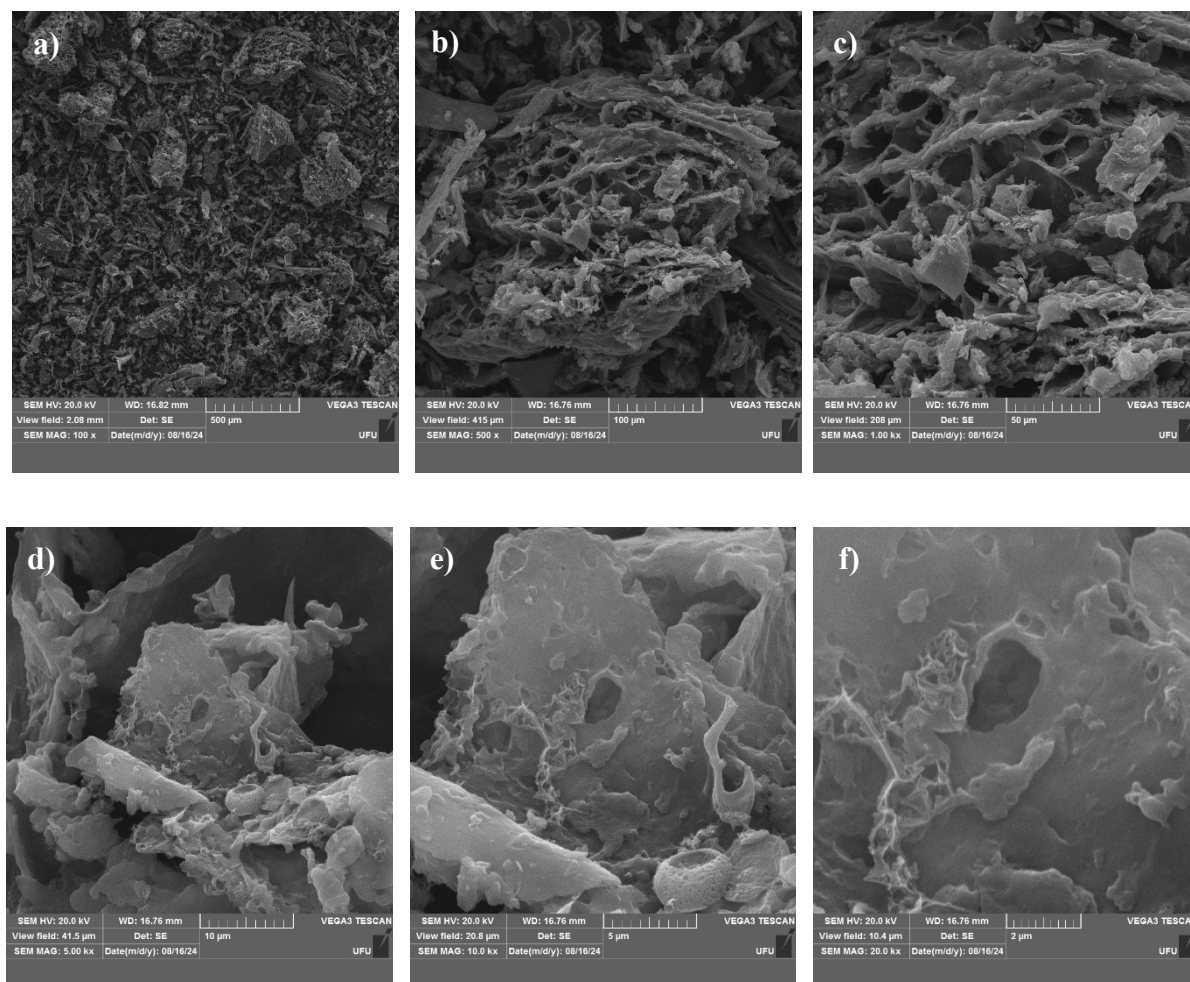
Figura 9. Micrografias referentes a amostra CACa 800°C – 1:1 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm ; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm ; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm ; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm ; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm .

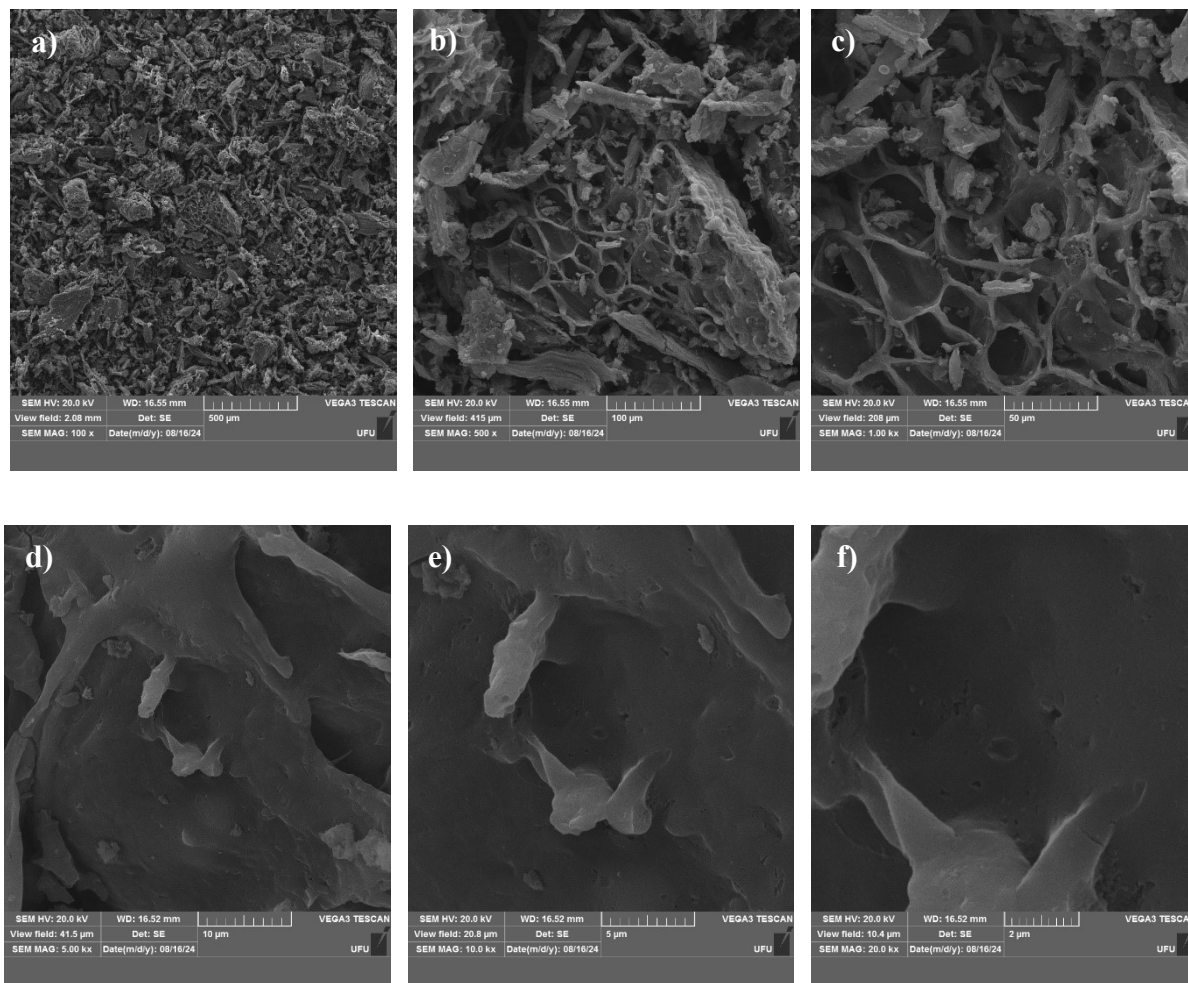
Figura 10. Micrografias referentes a amostra CACa 800°C – 1:2 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm.

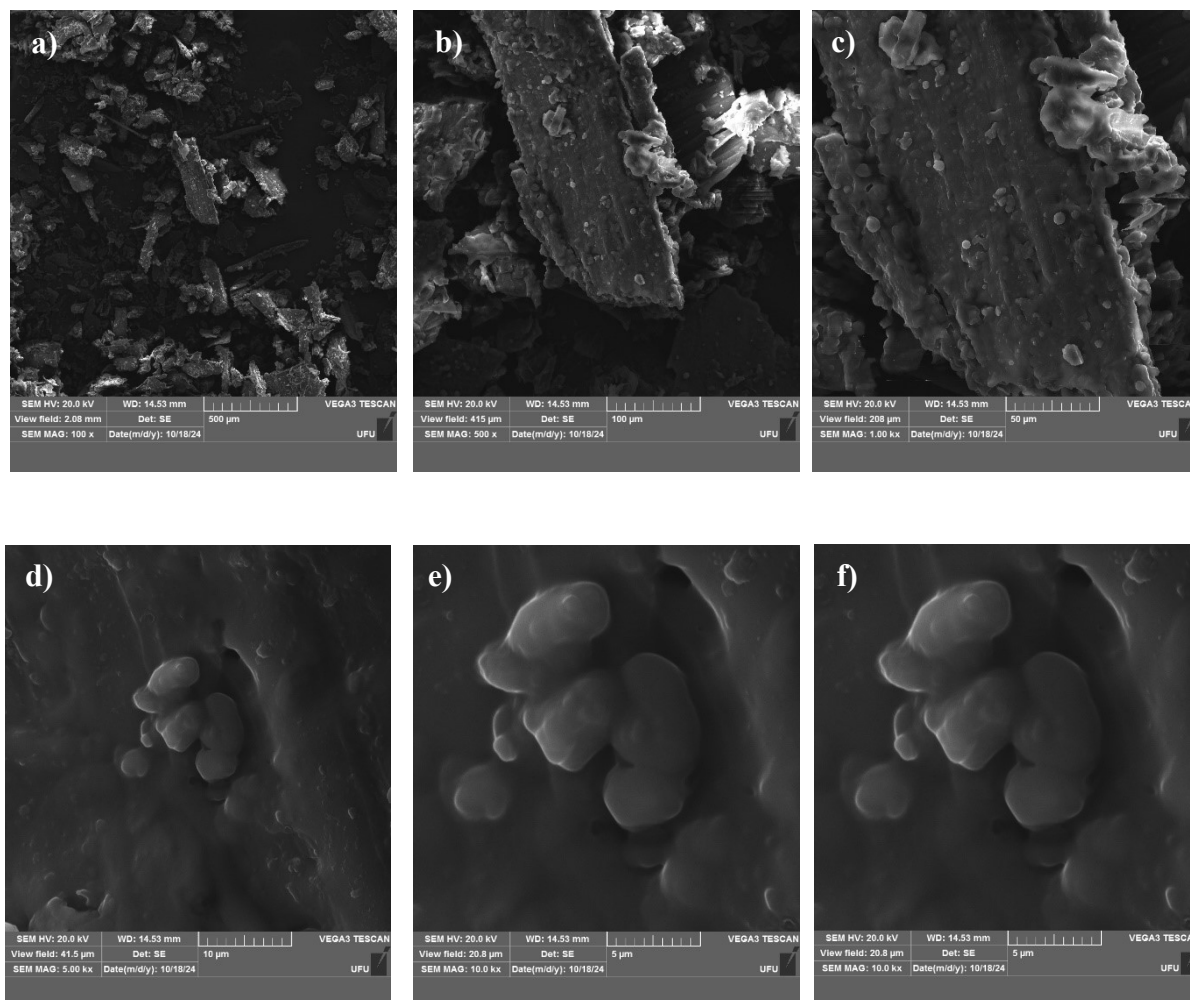
Figura 11. Micrografias referentes a amostra CACa 800°C – 1:4 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 µm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 µm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 µm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.

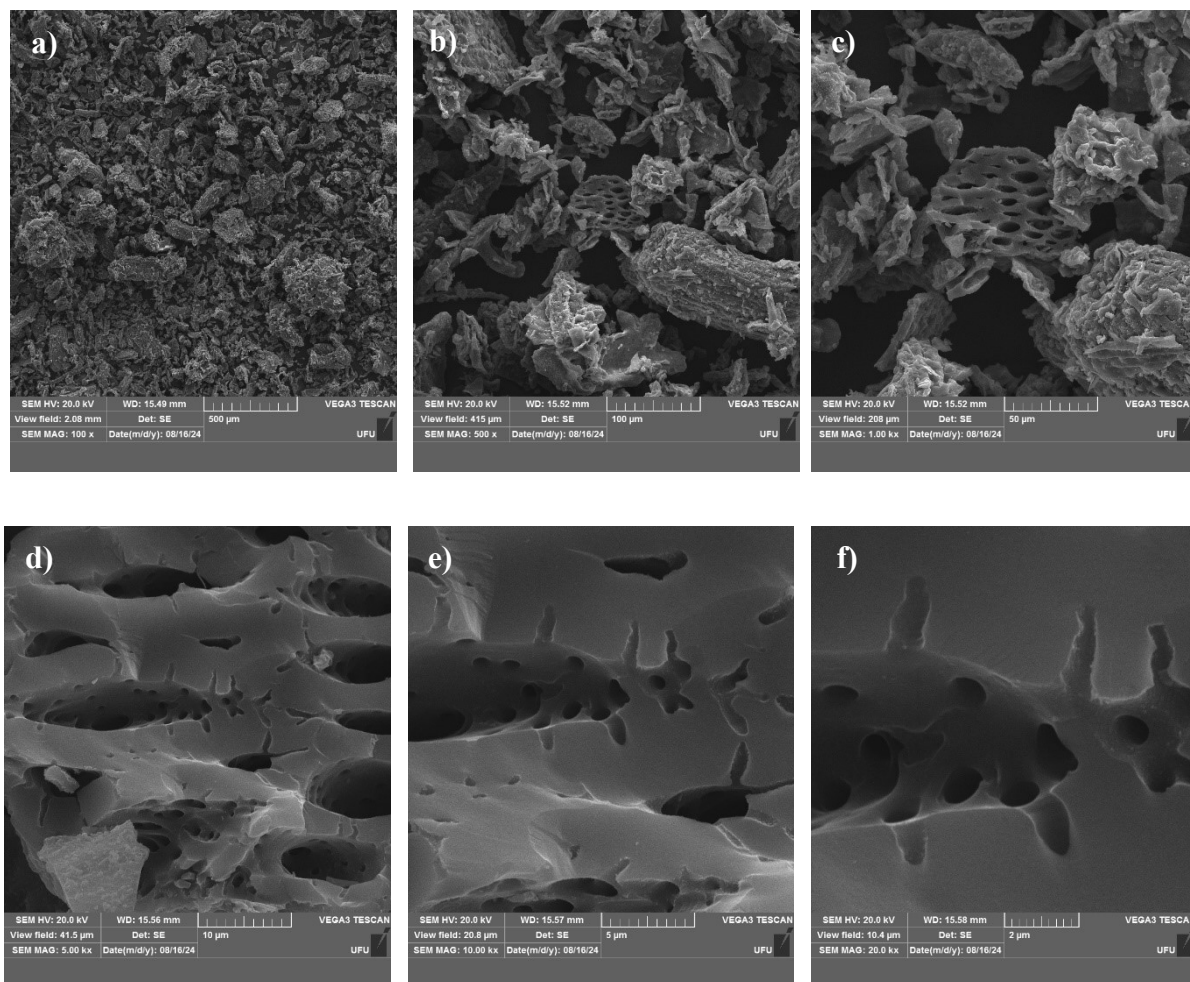
Figura 12. Micrografias referentes a amostra de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh, com diferentes ampliações.



FONTES: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm ; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm ; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm ; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm ; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm .

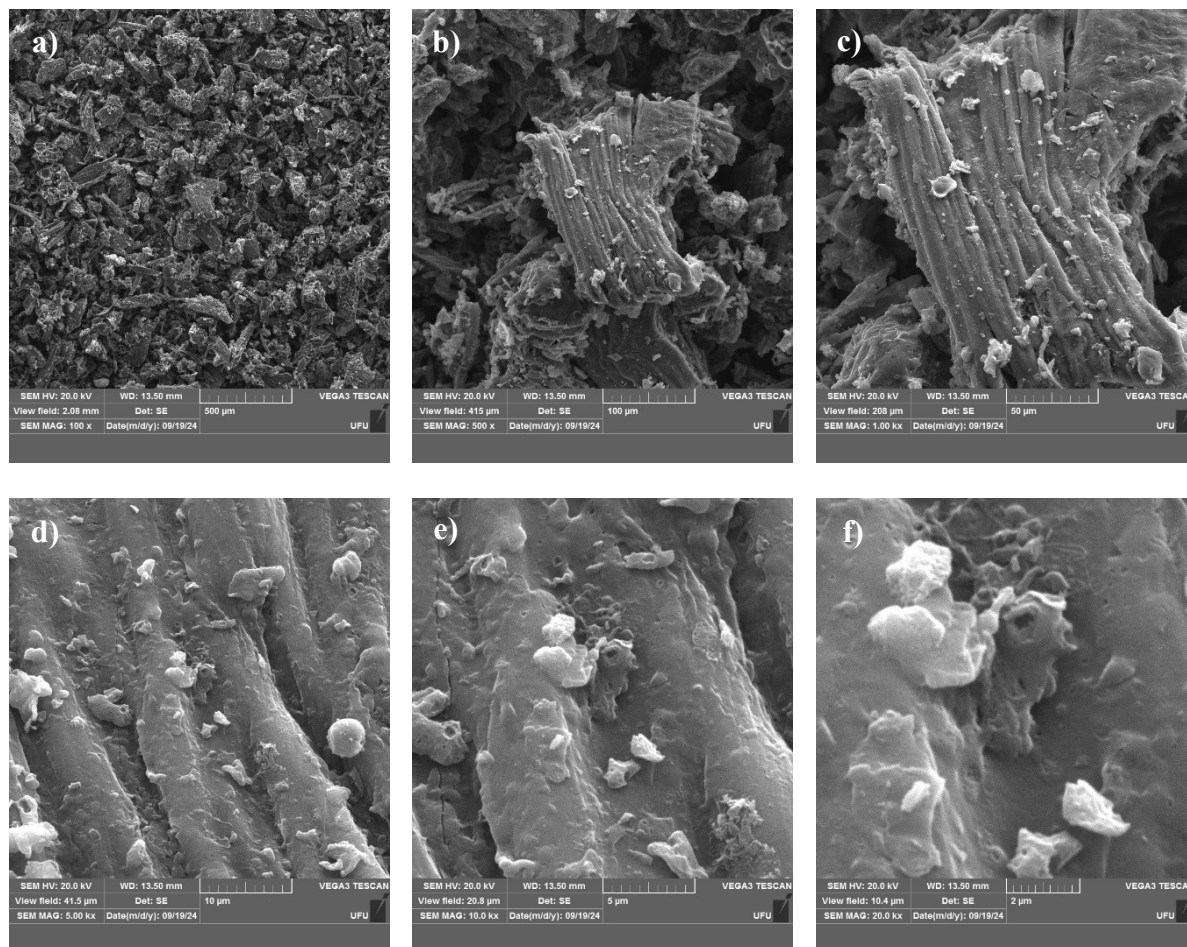
Figura 13. Micrografias referentes a amostra de carvão de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh, com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm ; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm ; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm ; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm ; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm .

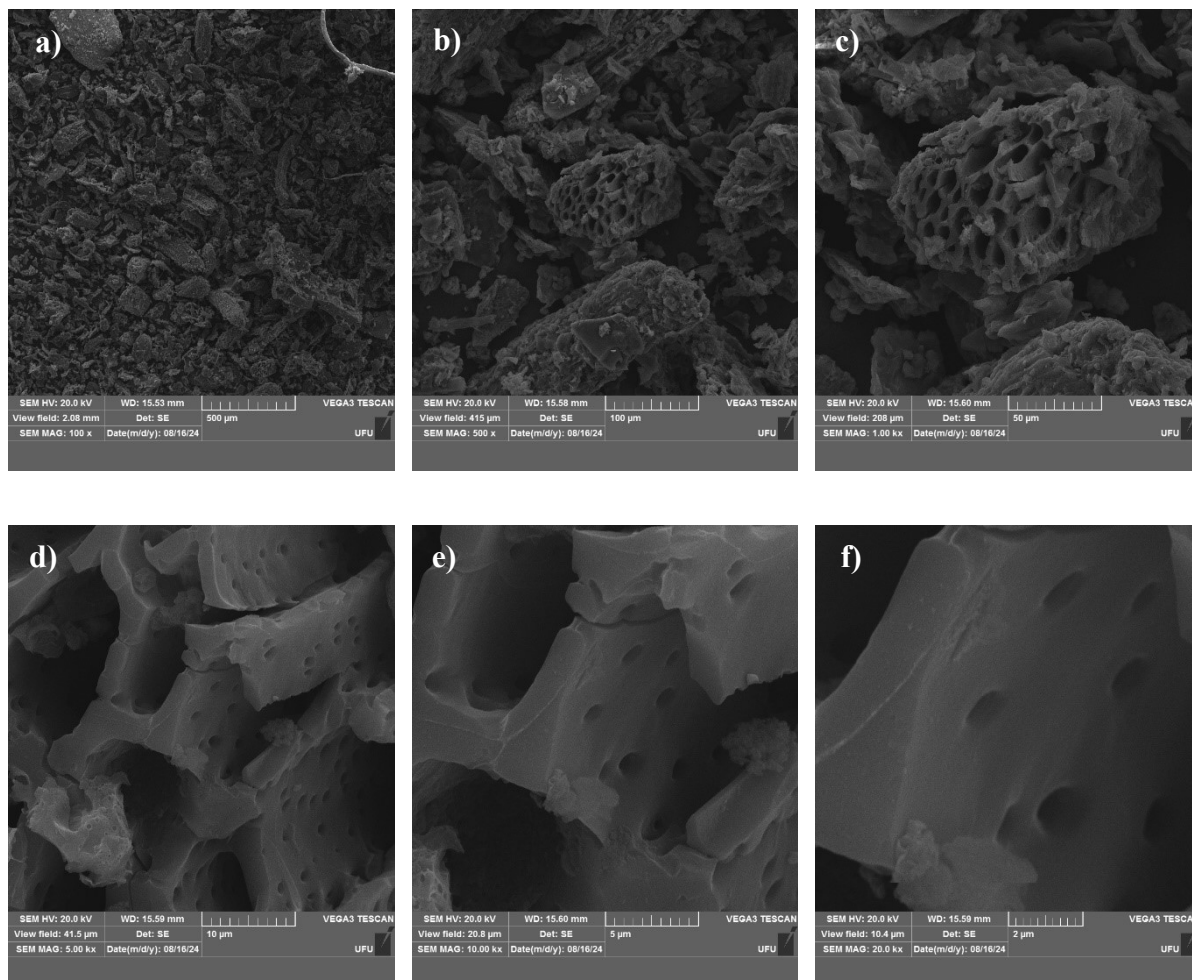
Figura 14. Micrografias referentes a amostra CAGi 600°C – 1:1 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm.

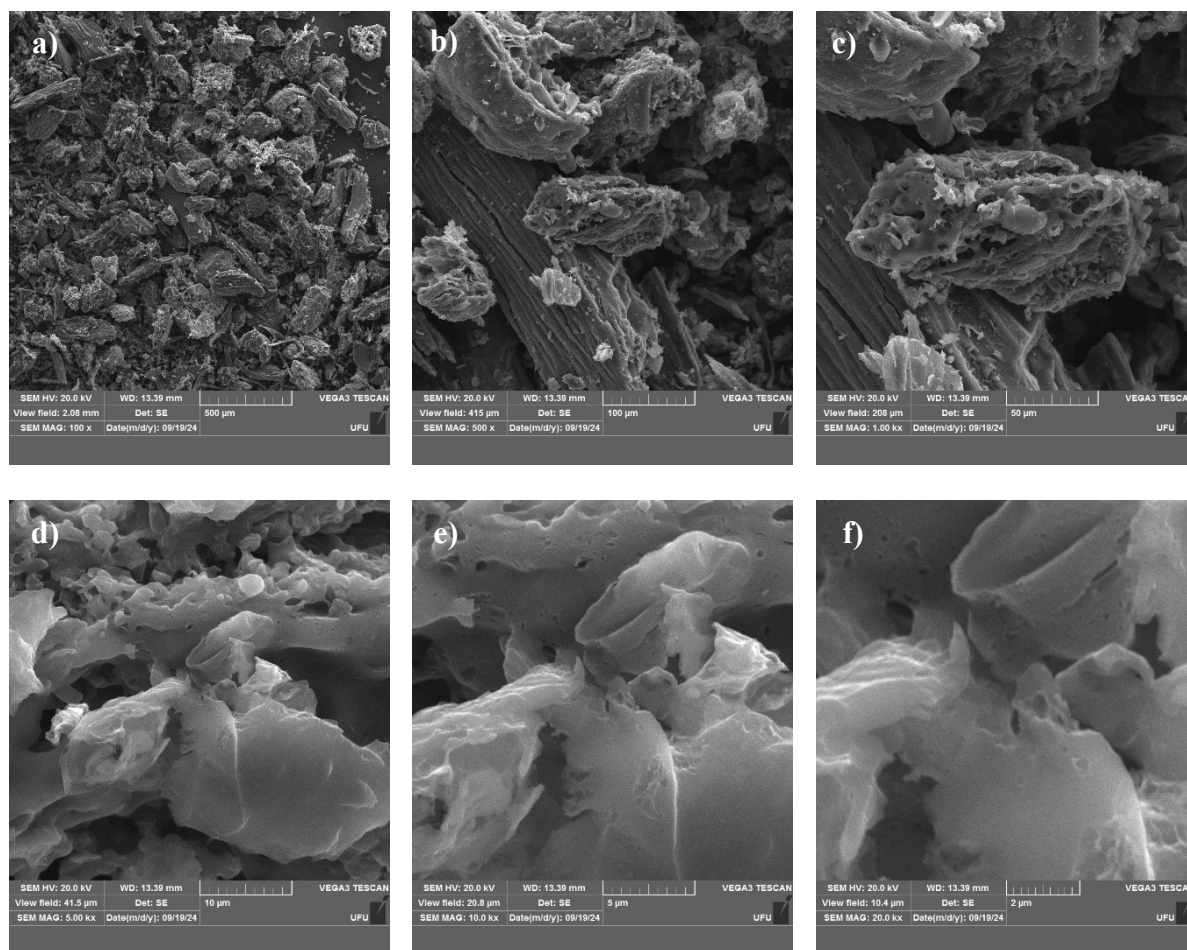
Figura 15. Micrografias referentes a amostra CAGi 600°C – 1:2 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm ; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm ; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm ; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm ; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm .

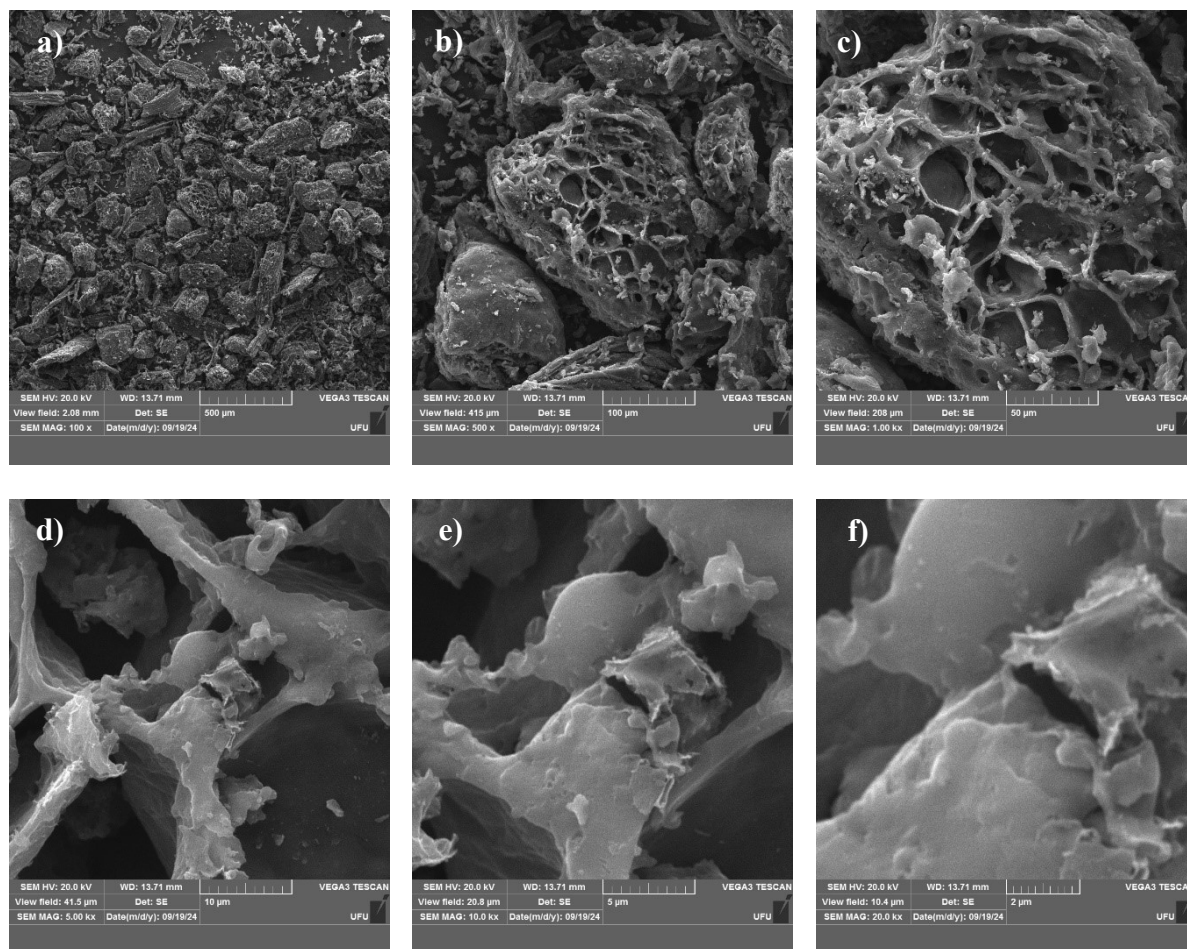
Figura 16. Micrografias referentes a amostra CAGi 600°C – 1:4 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 µm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 µm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 µm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.

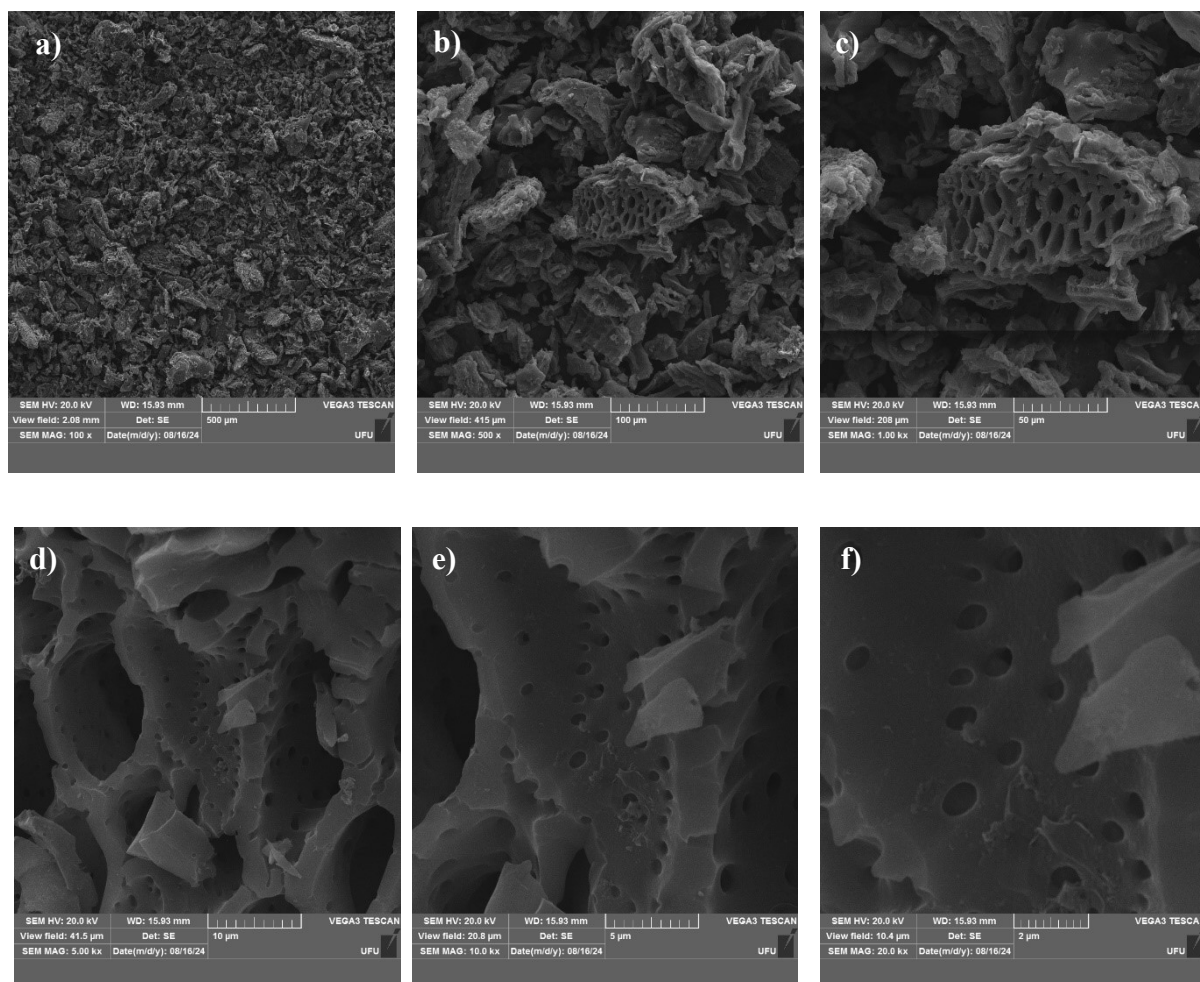
Figura 17. Micrografias referentes a amostra CAGi 700°C – 1:1 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 µm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 µm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 µm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 µm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 µm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 µm.

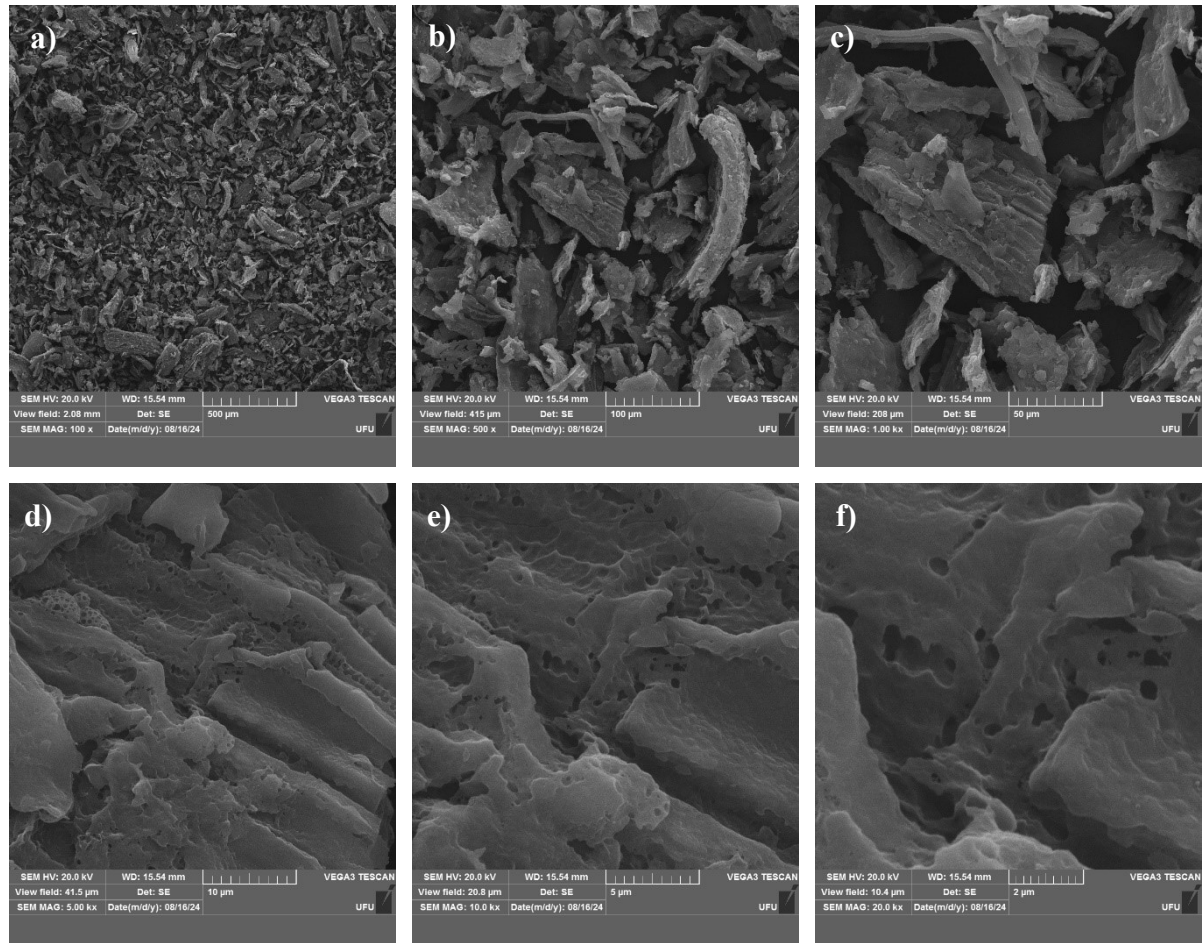
Figura 18. Micrografias referentes a amostra CAGi 700°C – 1:2 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm.

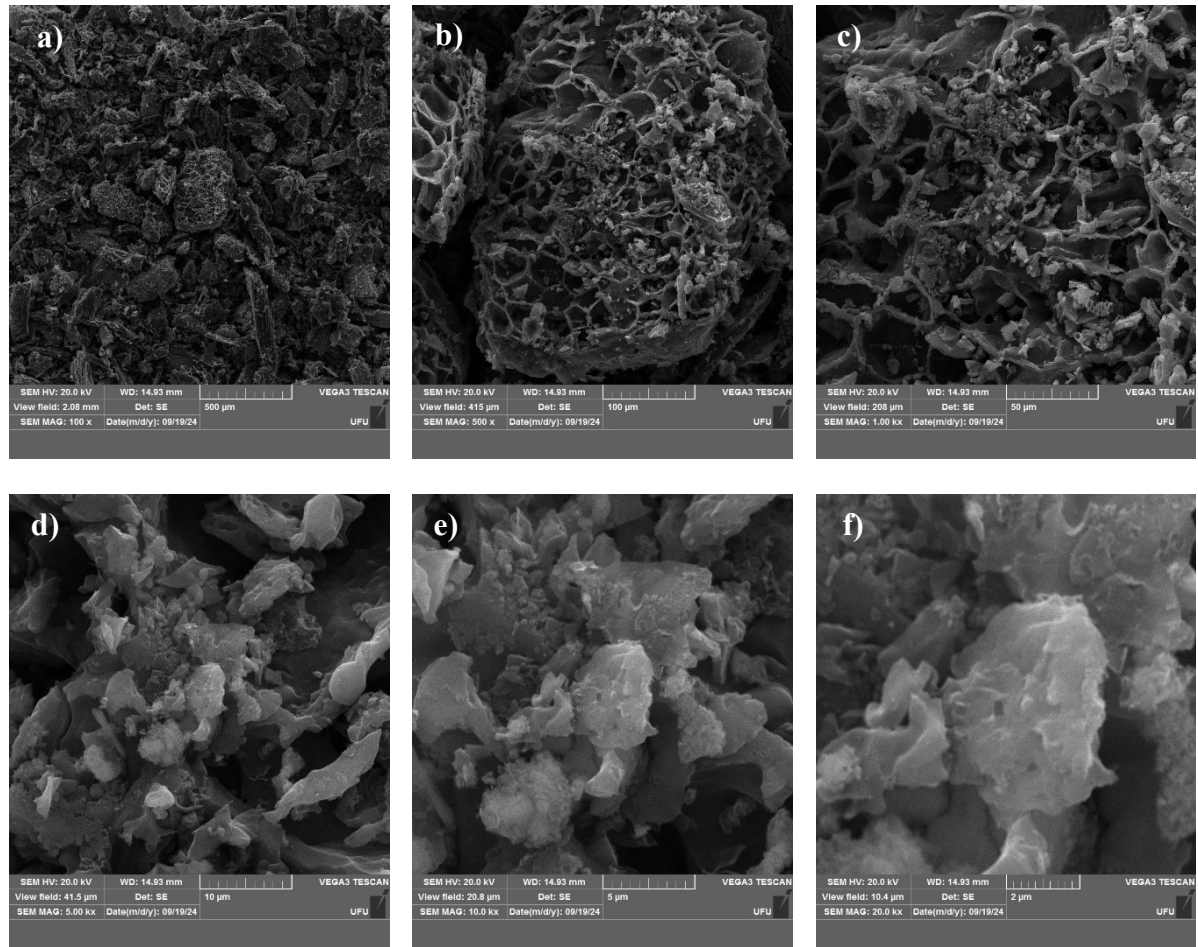
Figura 19. Micrografias referentes a amostra CAGi 700°C – 1:4 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm.

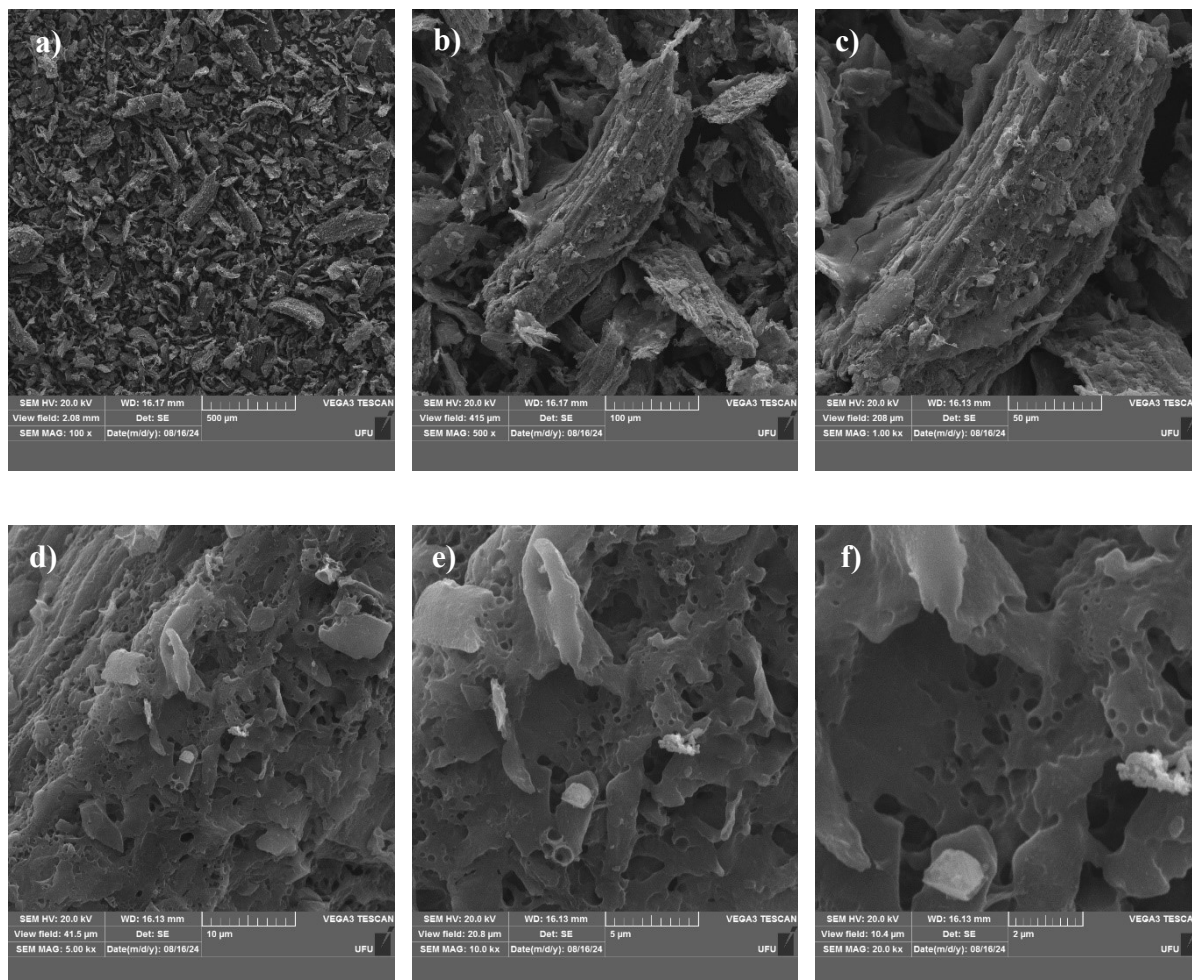
Figura 20. Micrografias referentes a amostra CAGi 800°C – 1:1 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm ; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm ; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm ; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm ; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm .

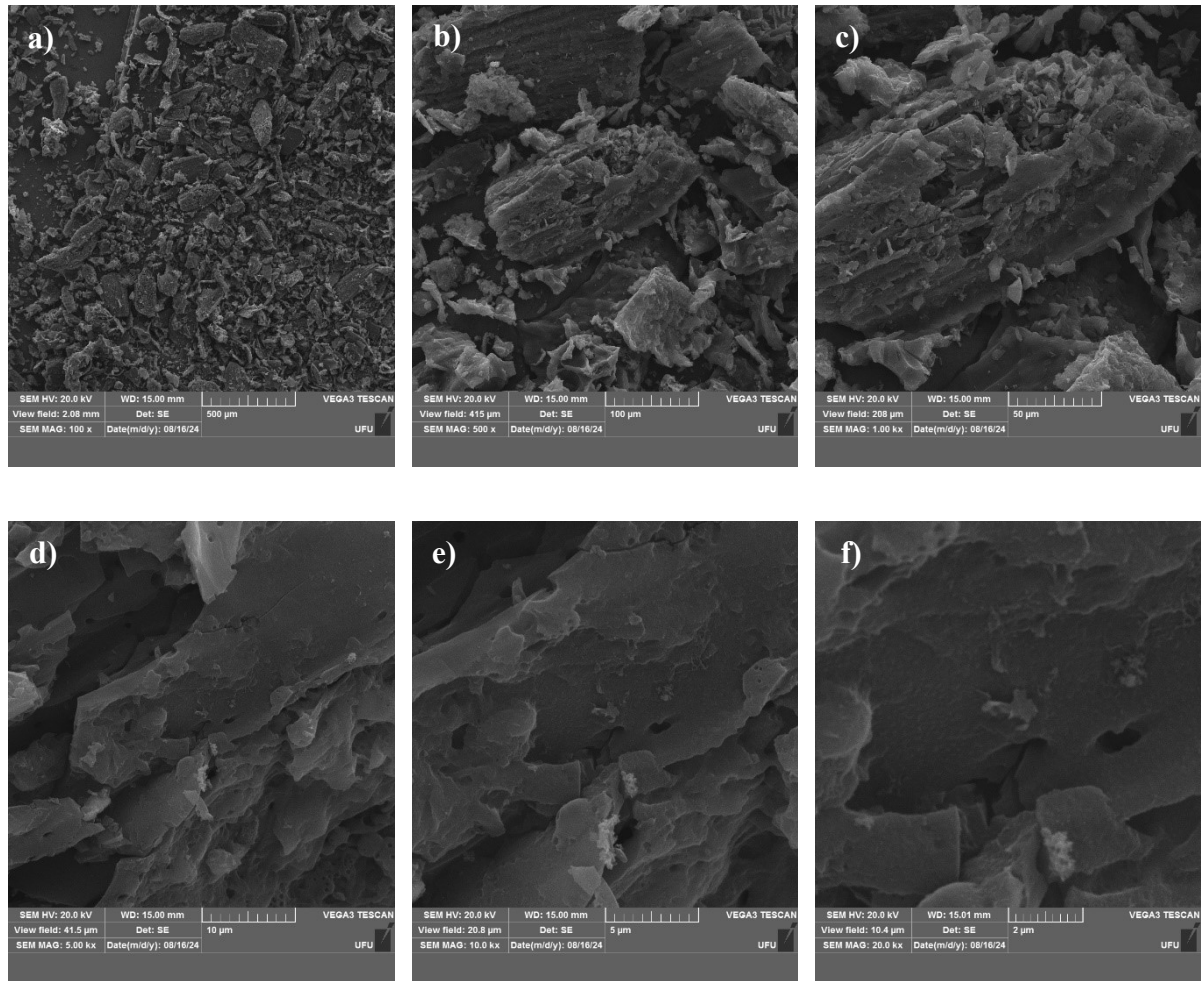
Figura 21. Micrografias referentes a amostra CAGi 800°C – 1:2 com diferentes ampliações.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μm ; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μm ; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μm ; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μm ; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μm e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μm .

Figura 22. Micrografias referentes a amostra CAGi 800°C – 1:4 com diferentes ampliações.

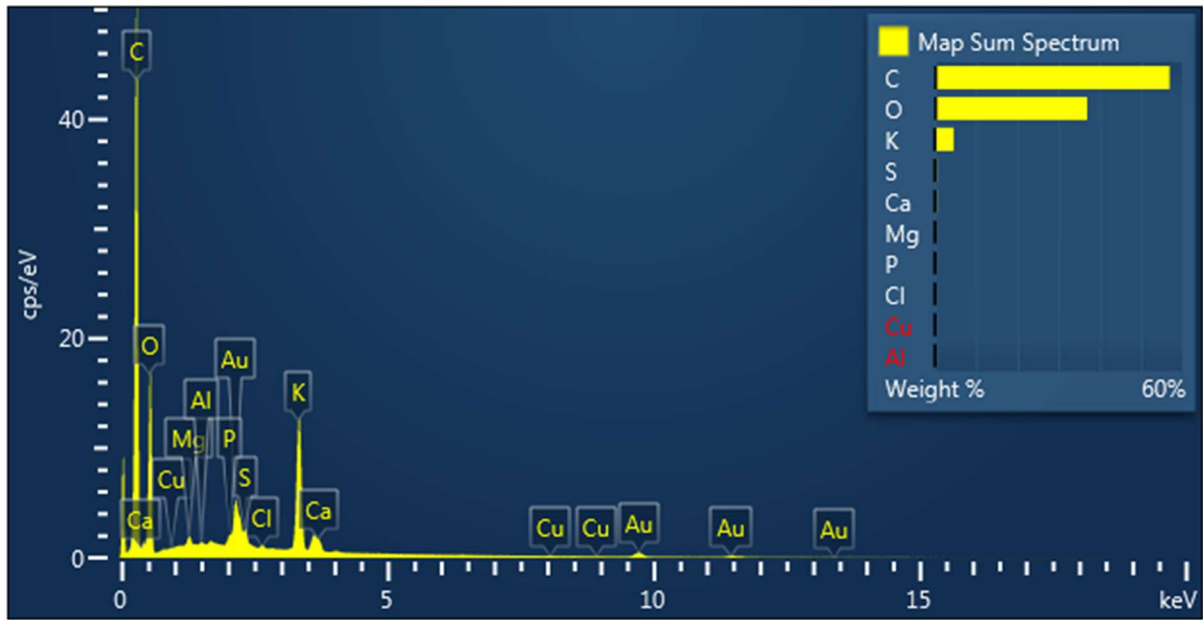


FONTE: Do autor, 2024.

Nota: a) Magnitude de 100 e ampliação de 500 μ m; b) Magnitude de 500 e ampliação de 100 μ m; c) Magnitude de 1000 e ampliação de 50 μ m; d) Magnitude de 5000 e ampliação de 10 μ m; e) Magnitude de 10000 e ampliação de 5 μ m e f) Magnitude de 20000 e ampliação de 2 μ m.

APÊNDICE C – GRÁFICOS E TABELAS ANÁLISE EDS

Gráfico 1. Gráfico de EDS para a amostra de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh.



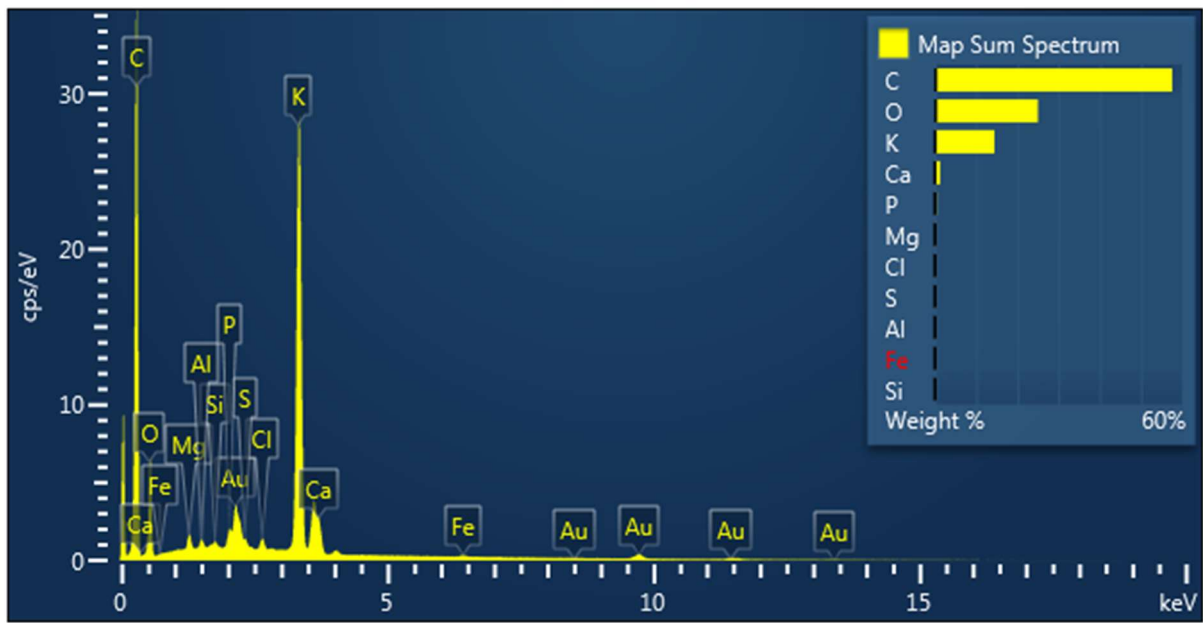
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 1. Elementos químicos presentes na amostra de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh.

Composição Química (% em massa)										
Elementos	C	O	Mg	Al	P	S	Cl	K	Ca	Cu
(%)	57,00	36,99	0,23	0,05	0,21	0,43	0,10	4,50	0,42	0,08

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 2. Gráfico de EDS para a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh.



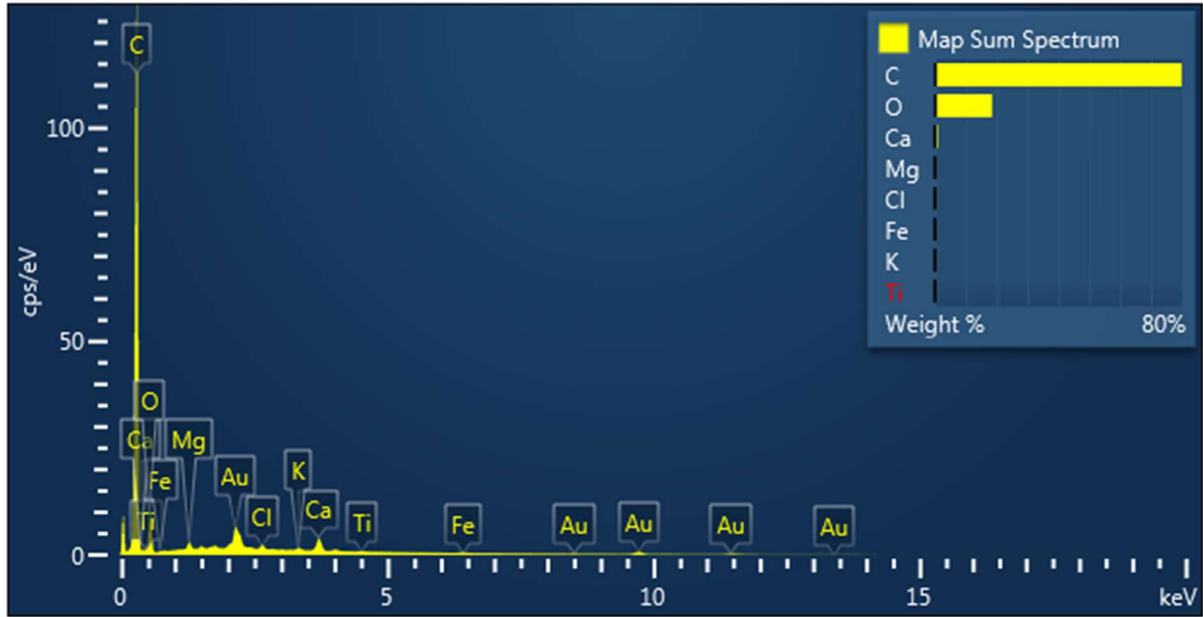
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 2. Elementos químicos presentes na amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh.

Composição Química (% em massa)											
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
(%)	57,64	24,98	0,37	0,18	0,10	0,40	0,24	0,30	14,43	1,23	0,14

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 3. Gráfico de EDS para a amostra CACa 600°C – 1:1.



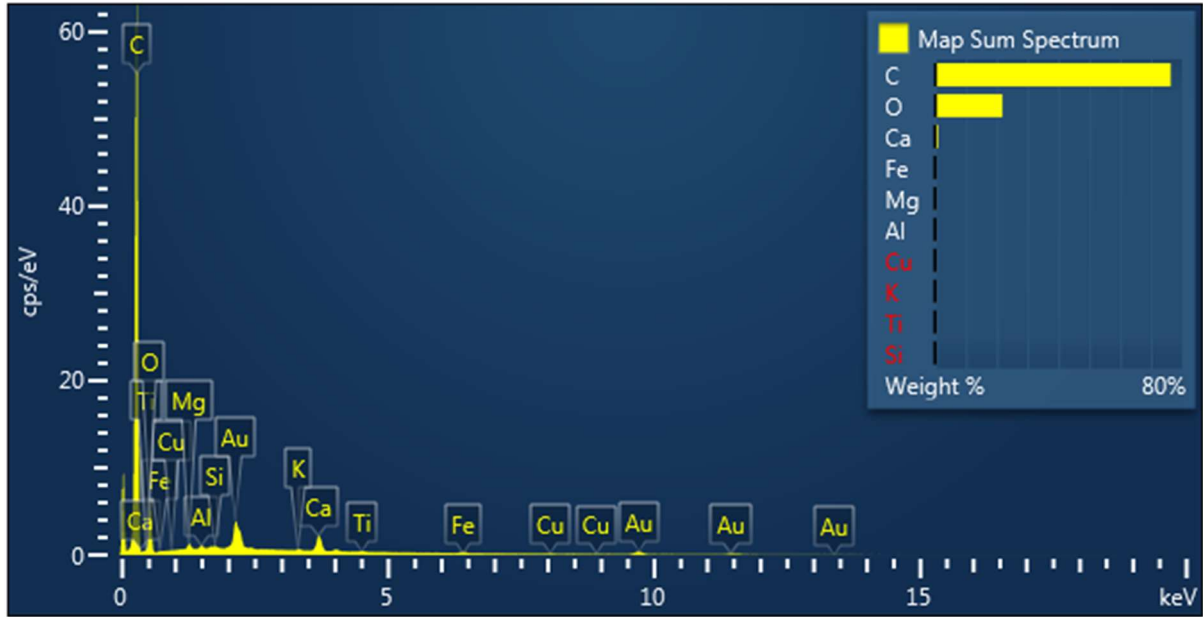
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 3. Elementos químicos presentes na amostra CACa 600°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)								
Elementos	C	O	Mg	Cl	K	Ca	Ti	Fe
(%)	79,87	18,45	0,30	0,20	0,14	0,82	0,04	0,17

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 4. Gráfico de EDS para a amostra CACa 600°C – 1:2.



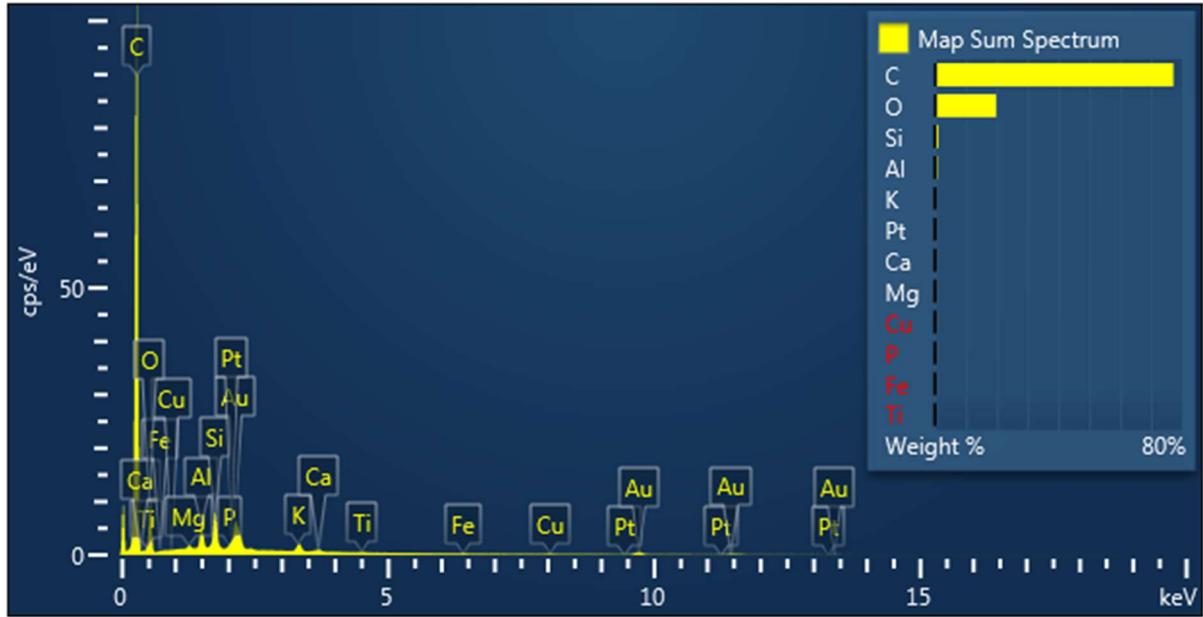
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 4. Elementos químicos presentes na amostra CACa 600°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)										
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Cu
(%)	76,37	21,85	0,21	0,11	0,06	0,07	0,95	0,06	0,22	0,11

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 5. Gráfico de EDS para a amostra CACa 600°C – 1:4.



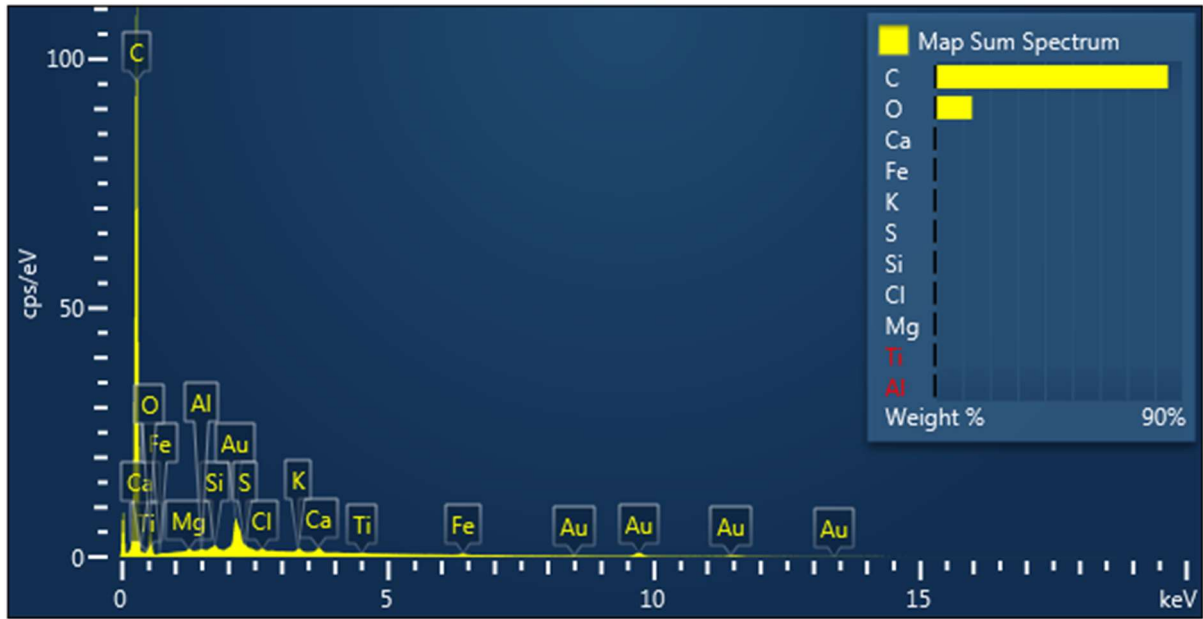
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 5. Elementos químicos presentes na amostra CACa 600°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)											
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Fe	Cu
(%)	77,28	19,78	0,11	0,71	1,00	0,07	0,38	0,12	0,04	0,06	0,10

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 6. Gráfico de EDS para a amostra CACa 700°C – 1:1.



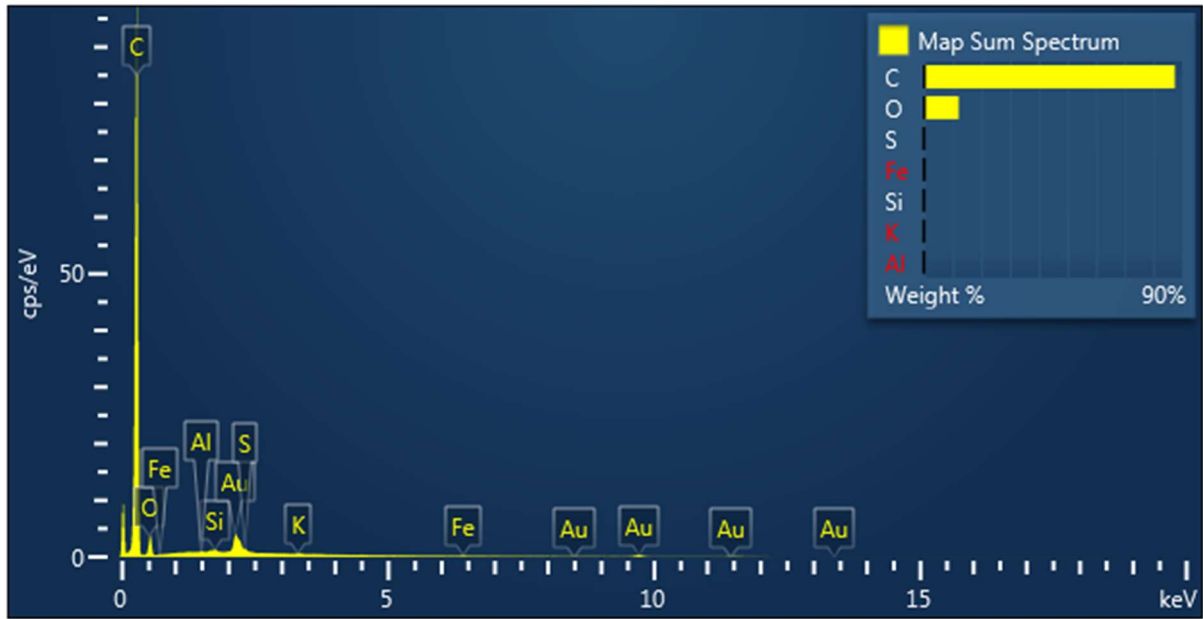
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 6. Elementos químicos presentes na amostra CACa 700°C – 1:1.

Composição Química (% em massa)											
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
(%)	84,91	13,48	0,11	0,05	0,16	0,21	0,15	0,24	0,34	0,06	0,30

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 7. Gráfico de EDS para a amostra CACa 700°C – 1:2.



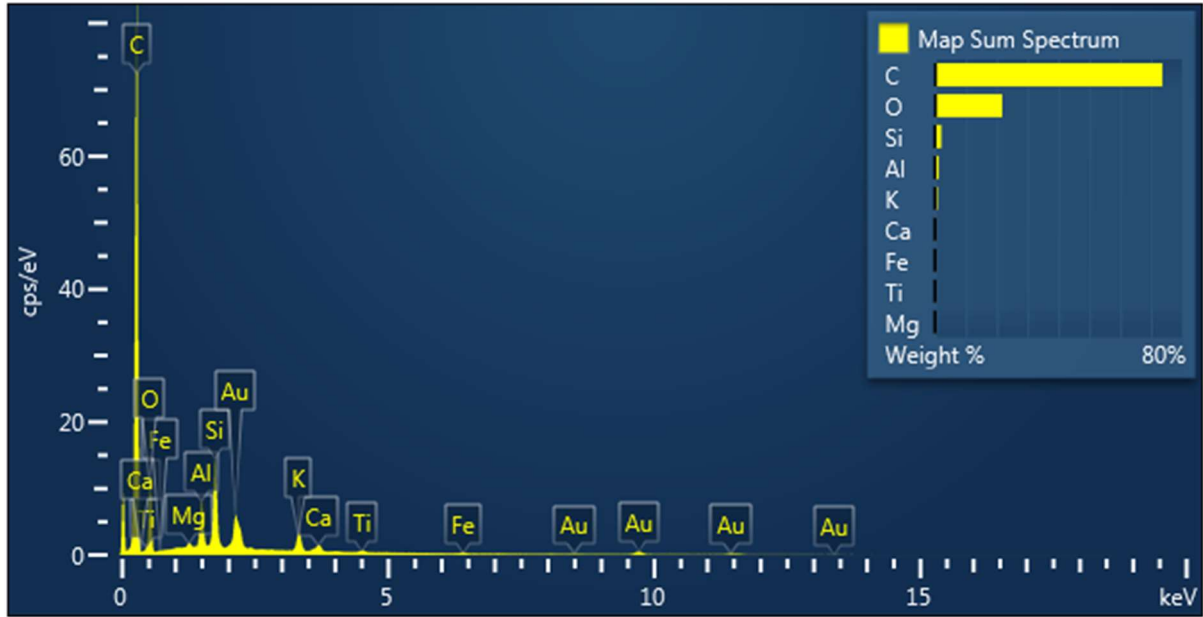
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 7. Elementos químicos presentes na amostra CACa 700°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)							
Elementos	C	O	Al	Si	S	K	Fe
(%)	87,50	12,07	0,03	0,07	0,18	0,05	0,08

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 8. Gráfico de EDS para a amostra CACa 700°C – 1:4.



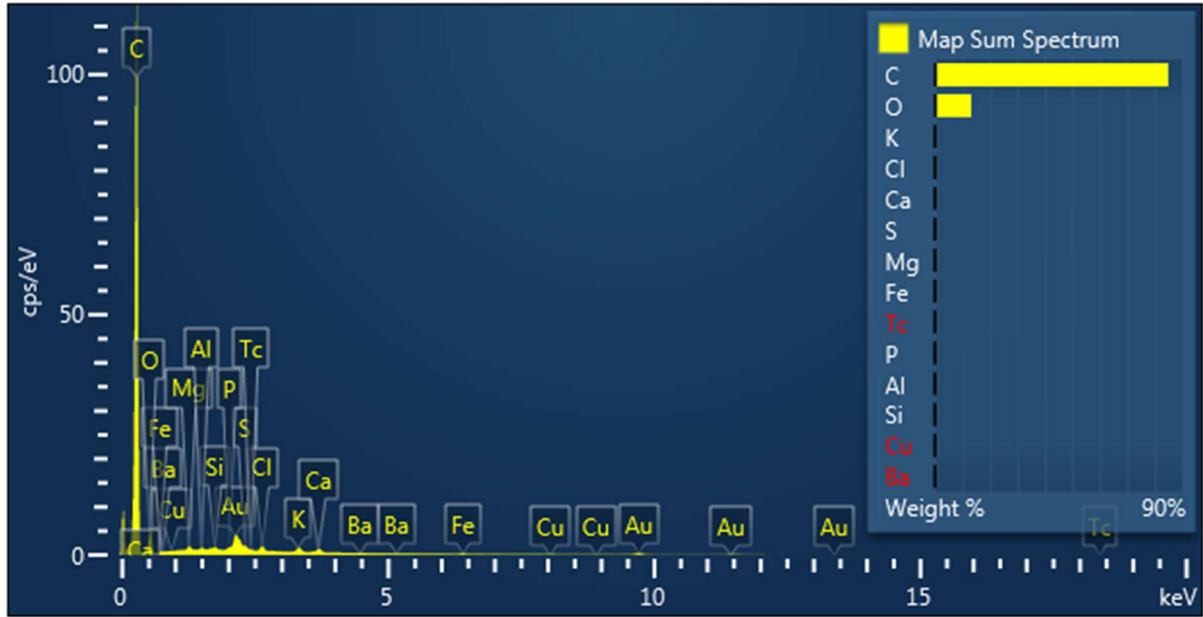
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 8. Elementos químicos presentes na amostra CACa 700°C – 1:4.

Composição Química (% em massa)									
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
(%)	73,61	21,73	0,13	1,16	2,05	0,76	0,29	0,13	0,14

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 9. Gráfico de EDS para a amostra CACa 800°C – 1:1.



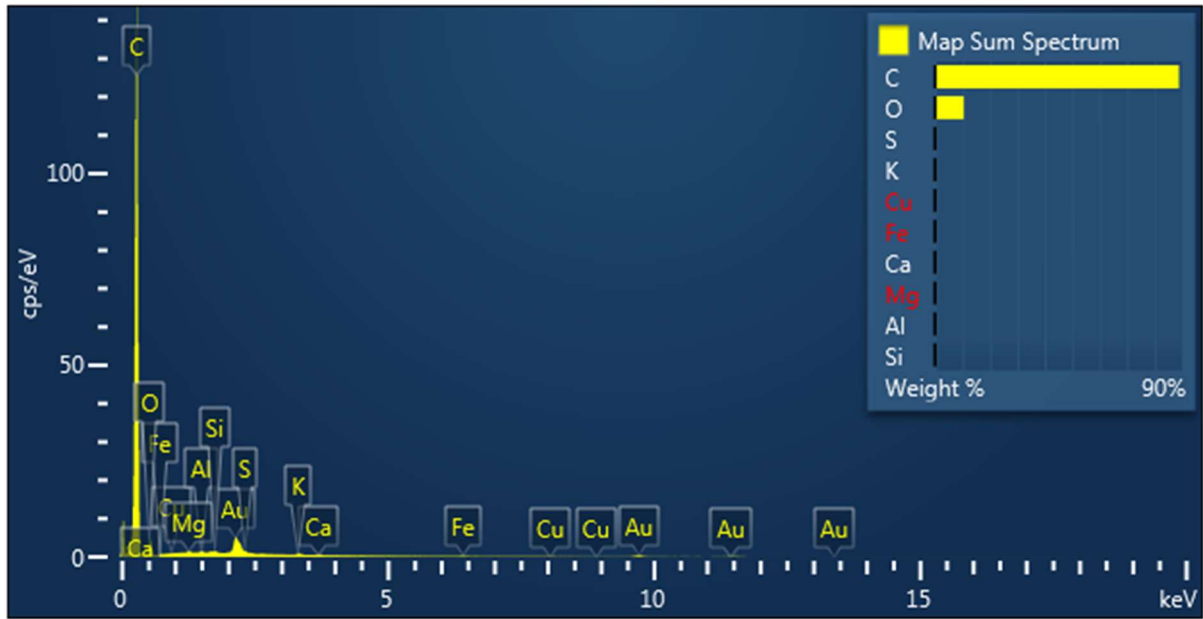
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 9. Elementos químicos presentes na amostra CACa 800°C – 1:1.

Composição Química (% em massa)											
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	P	Fe
(%)	85,03	13,18	0,15	0,08	0,07	0,24	0,25	0,28	0,25	0,11	0,01

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 10. Gráfico de EDS para a amostra CACa 800°C – 1:2.



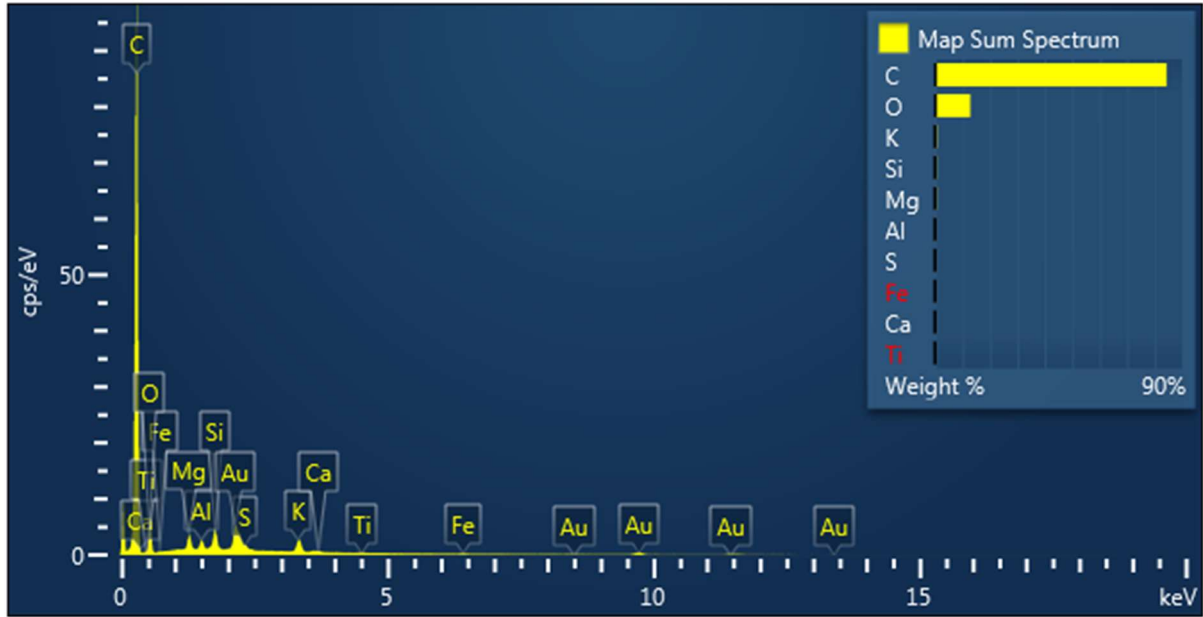
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 10. Elementos químicos presentes na amostra CACa 800°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)										
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Cu
(%)	88,92	10,47	0,06	0,06	0,05	0,11	0,10	0,06	0,08	0,09

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 11. Gráfico de EDS para a amostra CACa 800°C – 1:4.



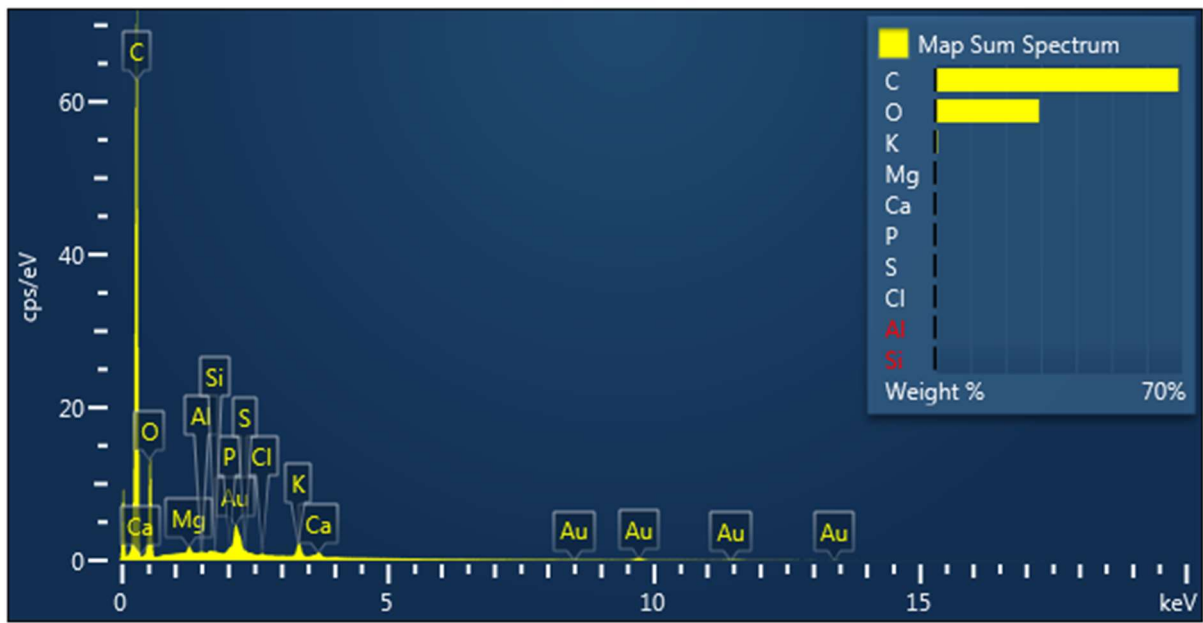
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 11. Elementos químicos presentes na amostra CACa 800°C – 1:4.

Composição Química (% em massa)										
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
(%)	84,42	12,89	0,57	0,32	0,62	0,22	0,73	0,07	0,06	0,09

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 12. Gráfico de EDS para a amostra de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh.



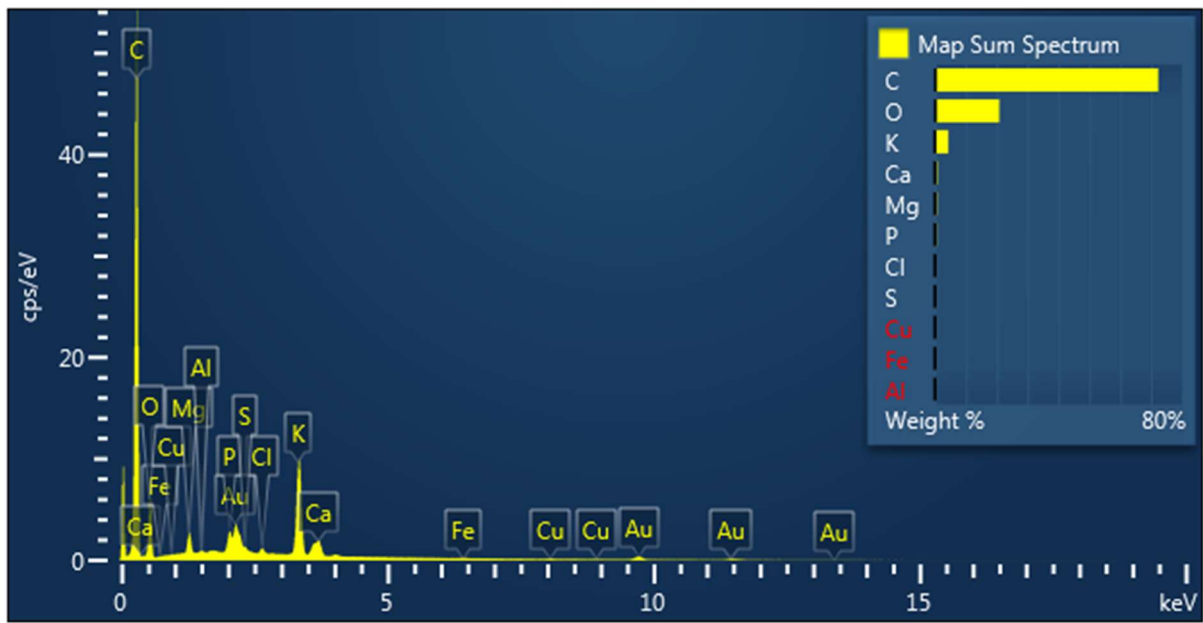
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 12. Elementos químicos presentes na amostra de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh.

Composição Química (% em massa)										
Elementos	C	O	Mg	Al	P	Si	Cl	K	Ca	S
(%)	69,04	29,51	0,22	0,04	0,15	0,03	0,06	0,61	0,22	0,01

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 13. Gráfico de EDS para a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh.



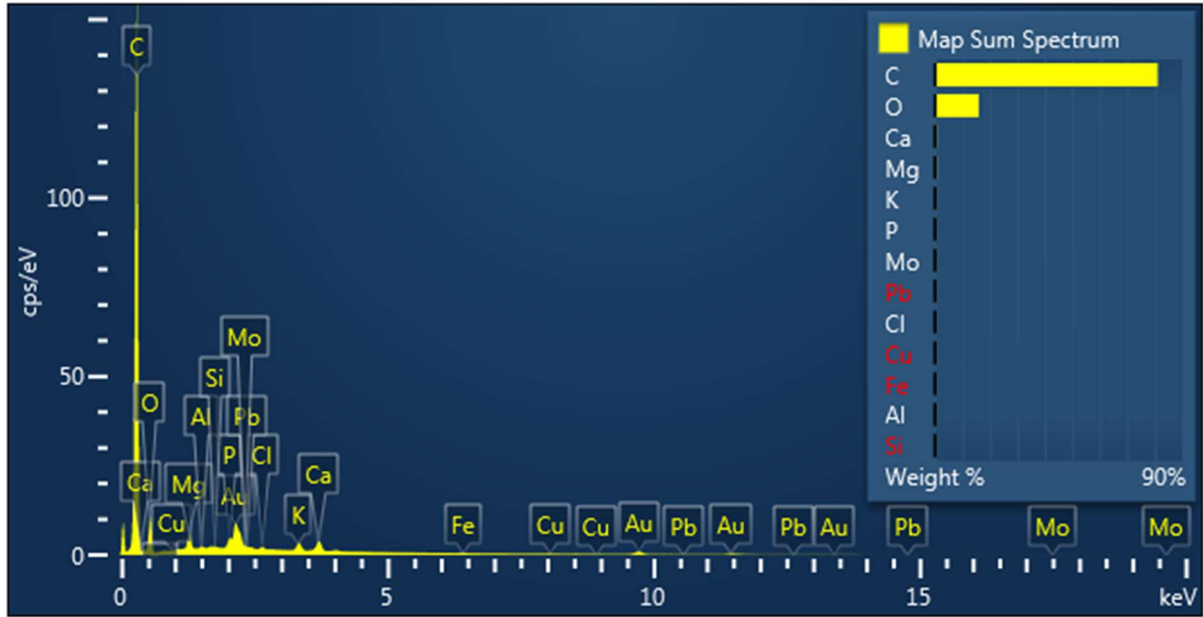
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 13. Elementos químicos presentes na amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh.

Composição Química (% em massa)											
Elementos	C	O	Mg	Al	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu
(%)	72,33	20,81	0,66	0,05	0,58	0,18	0,19	4,29	0,73	0,07	0,09

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 14. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 600°C – 1:1.



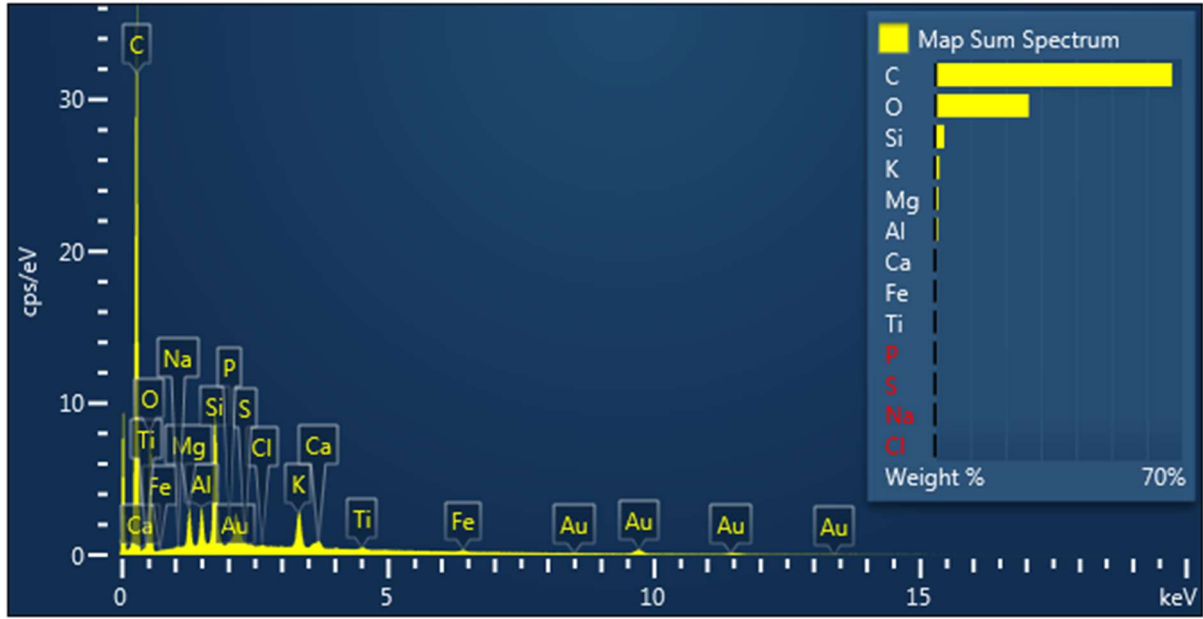
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 14. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 600°C – 1:1.

Composição Química (% em massa)											
Elementos	C	O	Mg	Al	P	Si	Cl	K	Ca	Fe	Cu
(%)	81,17	15,95	0,61	0,06	0,35	0,04	0,11	0,43	0,63	0,08	0,08

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 15. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 600°C – 1:2.



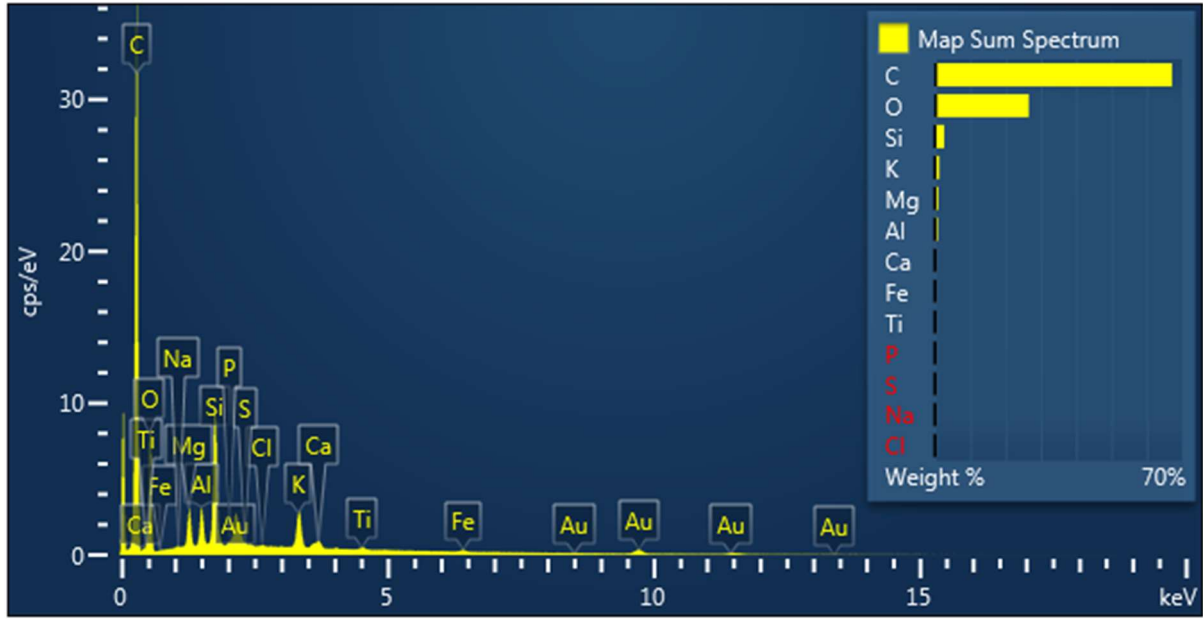
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 15. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 600°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)													
Elementos	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
(%)	67,20	26,60	0,04	0,88	0,75	2,59	0,09	0,06	0,04	1,19	0,26	0,12	0,18

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 16. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 600°C – 1:4.



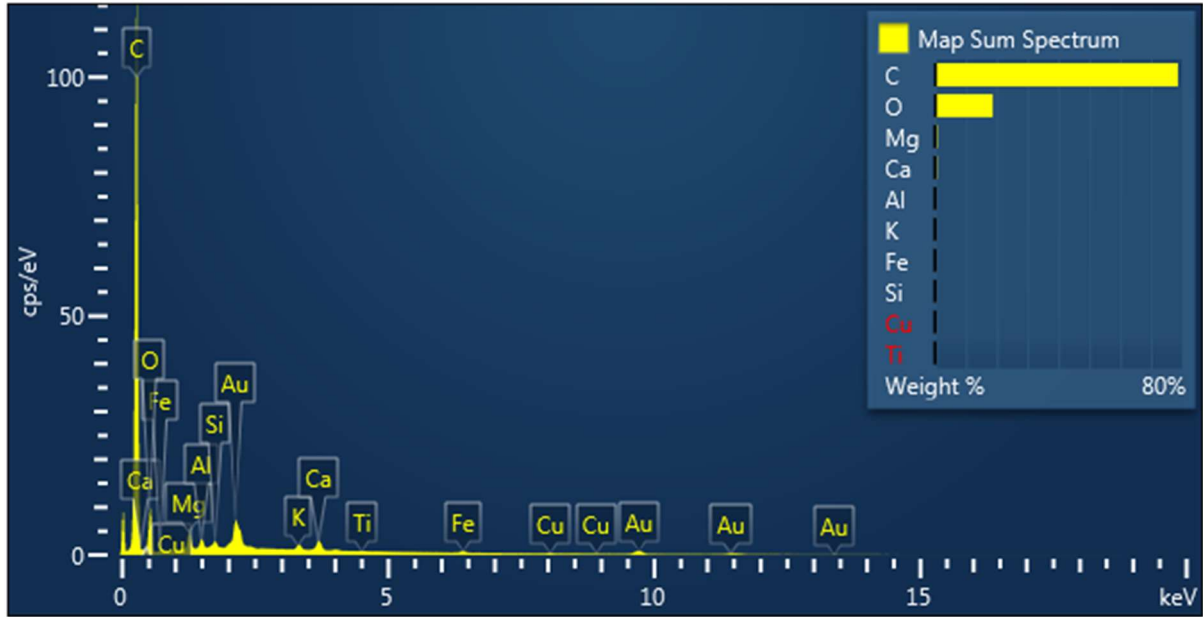
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 16. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 600°C – 1:4.

Composição Química (% em massa)								
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Cu
(%)	73,80	21,60	0,30	0,26	2,34	1,19	0,20	0,31

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 17. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 700°C – 1:1.



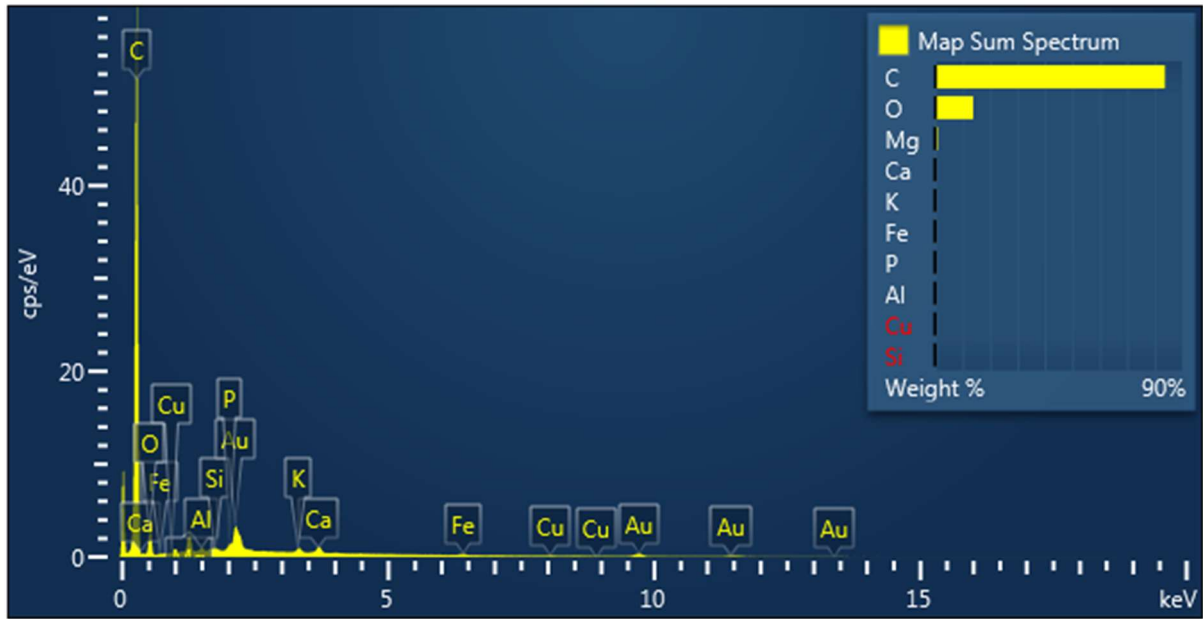
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 17. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 700°C – 1:1.

Composição Química (% em massa)										
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Cu
(%)	78,69	18,71	0,69	0,32	0,20	0,29	0,61	0,03	0,29	0,16

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 18. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 700°C – 1:2.



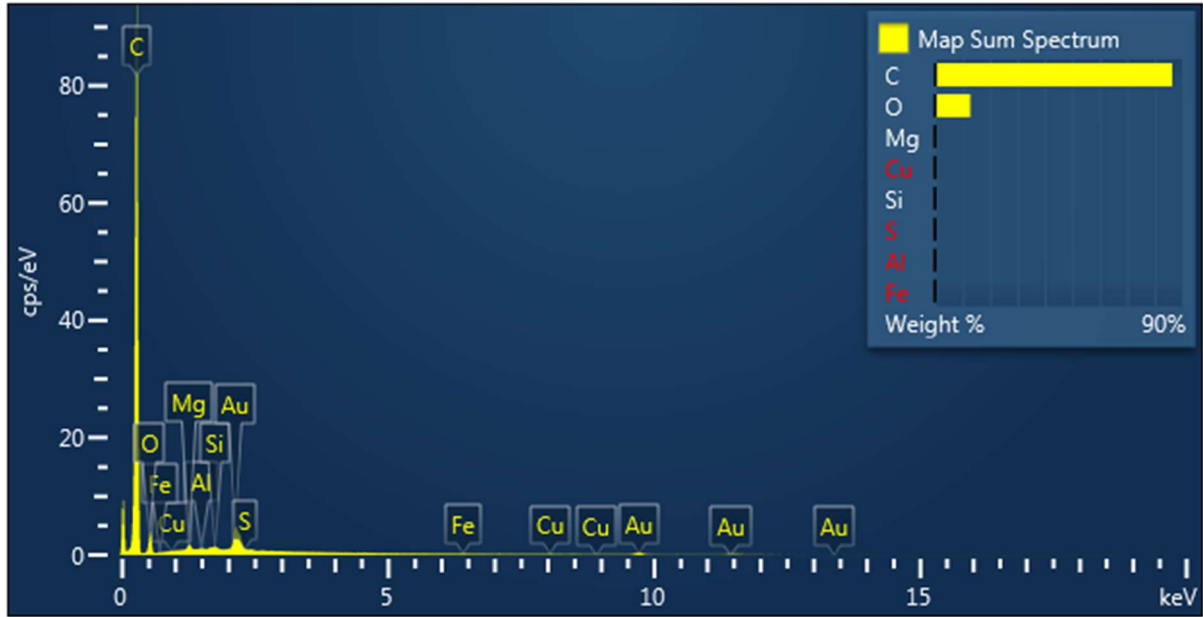
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 18. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 700°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)										
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Fe	Cu
(%)	83,82	13,90	0,86	0,13	0,07	0,19	0,28	0,42	0,23	0,11

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 19. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 700°C – 1:4.



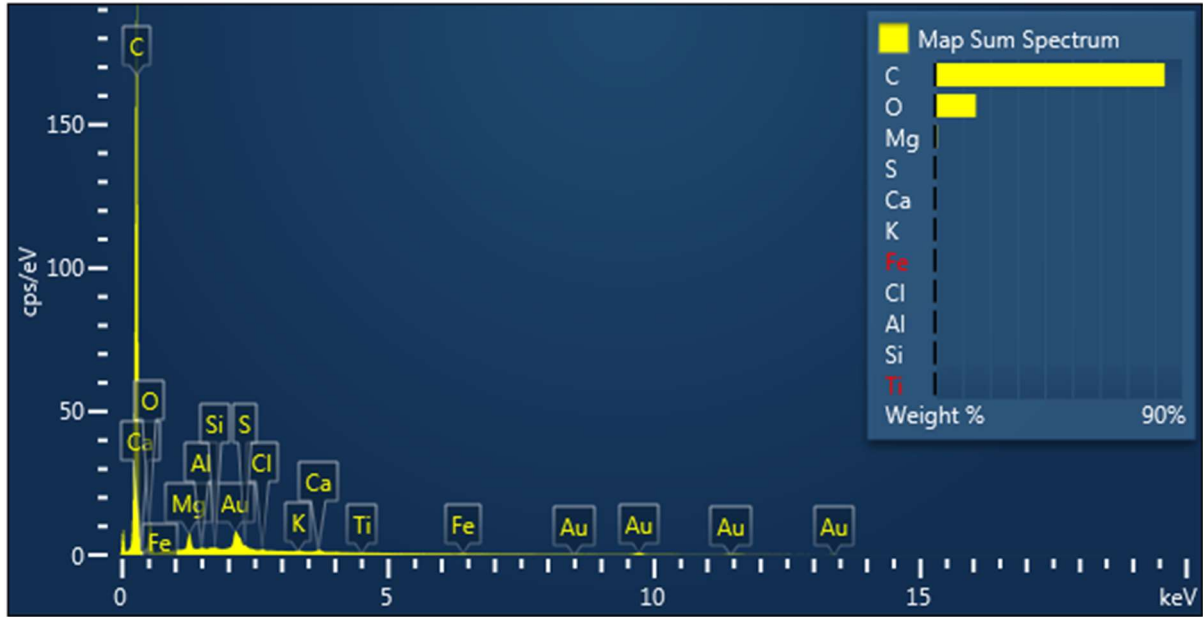
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 19. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 700°C – 1:4.

Composição Química (% em massa)								
Elementos	C	O	Mg	Al	Si	S	Fe	Cu
(%)	86,49	12,89	0,25	0,05	0,09	0,06	0,04	0,11

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 20. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 800°C – 1:1.



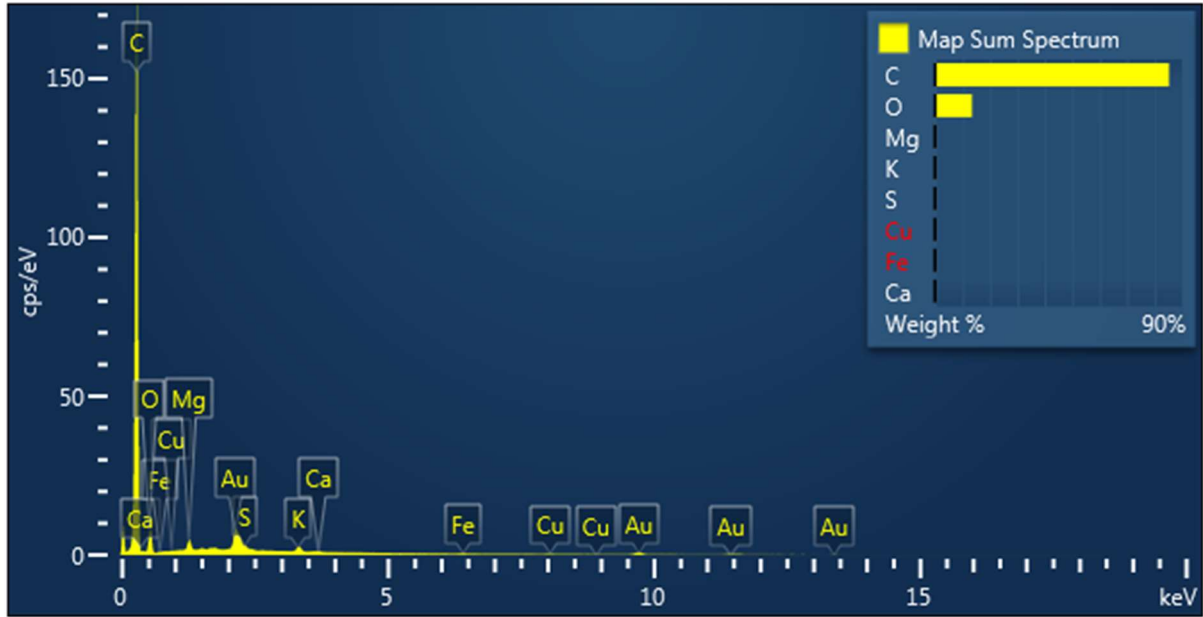
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 20. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 800°C – 1:1.

Composição Química (% em massa)											
Elementos	C	O	Mg	Al	S	Si	Cl	K	Ca	Fe	Ti
(%)	83,77	14,86	0,71	0,05	0,17	0,04	0,06	0,08	0,16	0,07	0,02

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 21. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 800°C – 1:2.



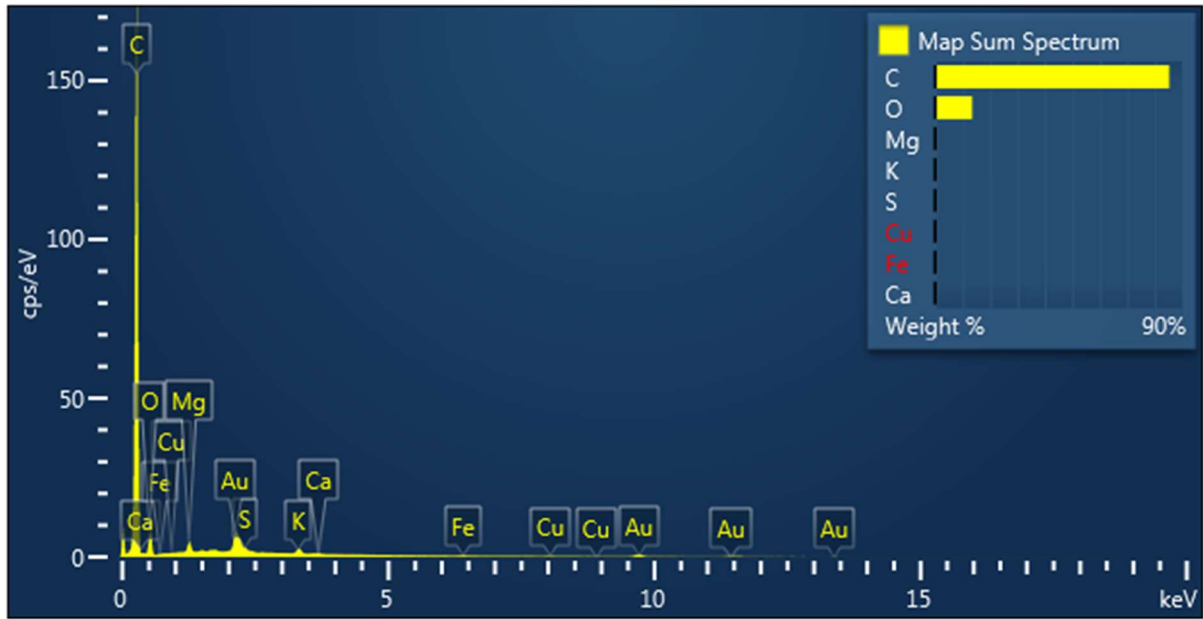
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 21. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 800°C – 1:2.

Composição Química (% em massa)								
Elementos	C	O	Mg	S	K	Ca	Fe	Cu
(%)	85,32	13,45	0,47	0,19	0,33	0,06	0,08	0,11

Fonte: Do autor, 2024.

Gráfico 22. Gráfico de EDS para a amostra CAGi 800°C – 1:4.



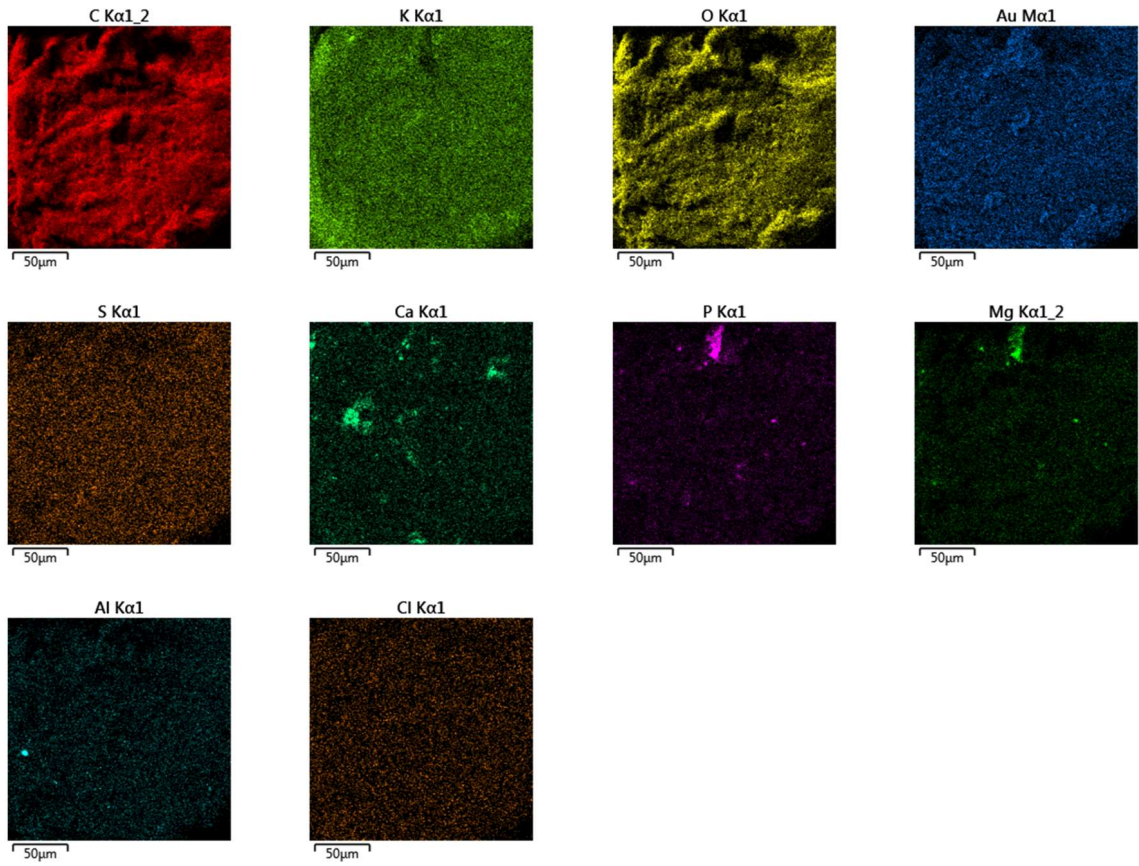
Fonte: Do autor, 2024.

Tabela 22. Elementos químicos presentes na amostra CAGi 800°C – 1:4.

Composição Química (% em massa)								
Elementos	C	O	Mg	S	K	Ca	Fe	Cu
(%)	85,32	13,45	0,47	0,19	0,33	0,06	0,08	0,11

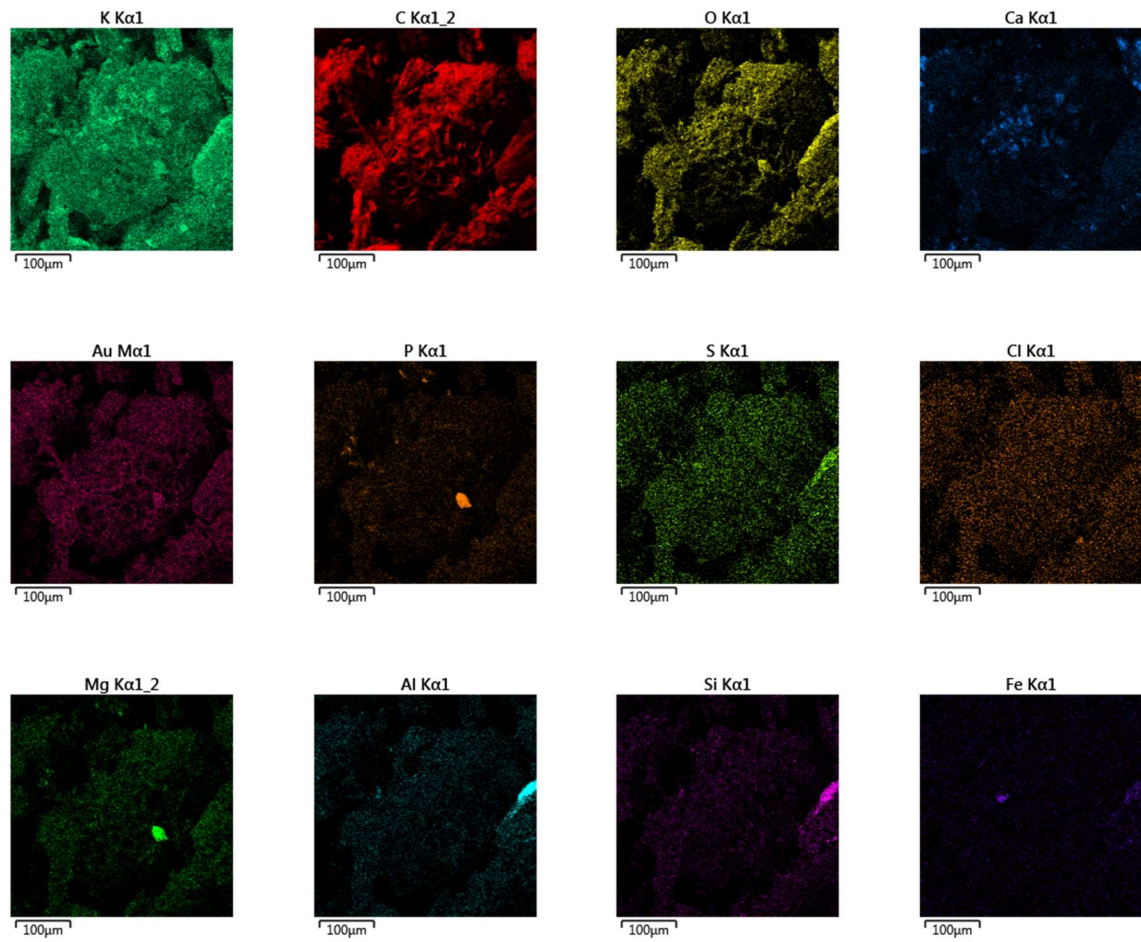
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 1. Mapeamento por EDS para a amostra de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh.



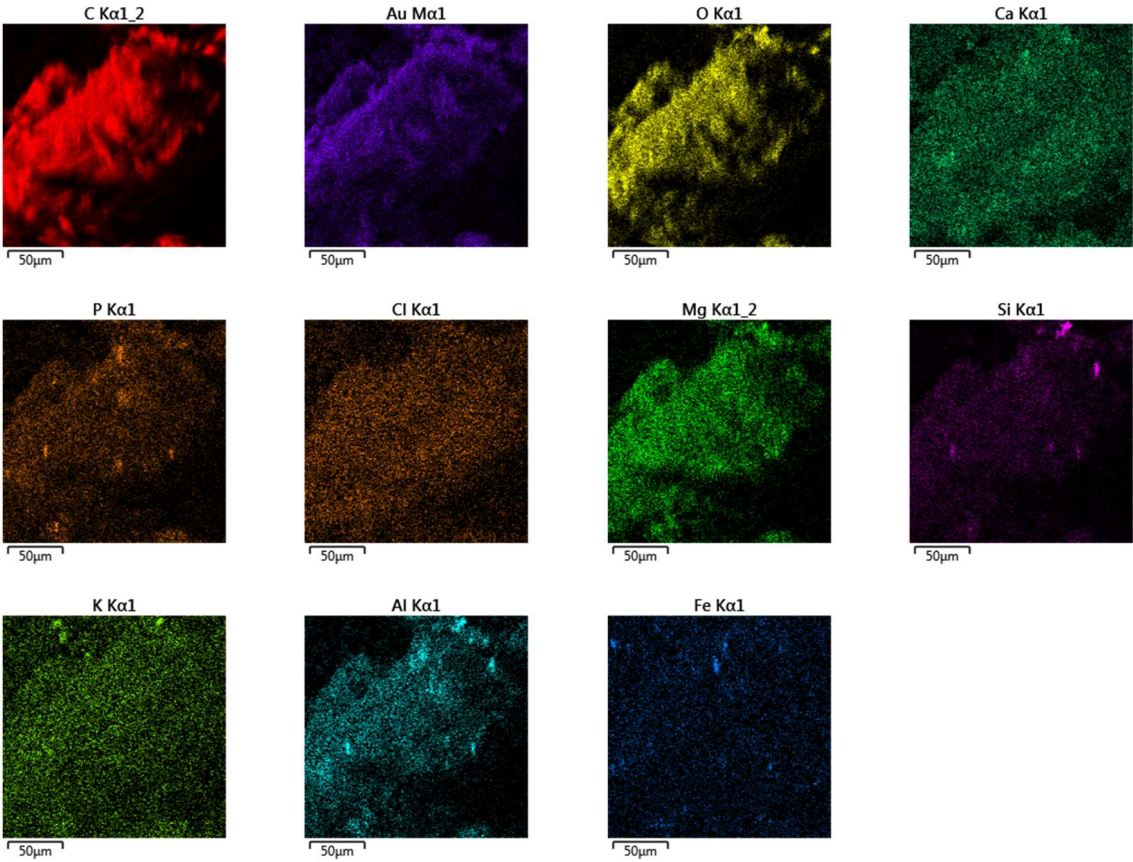
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 2. Mapeamento por EDS para a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de café com granulometria de 60 mesh.



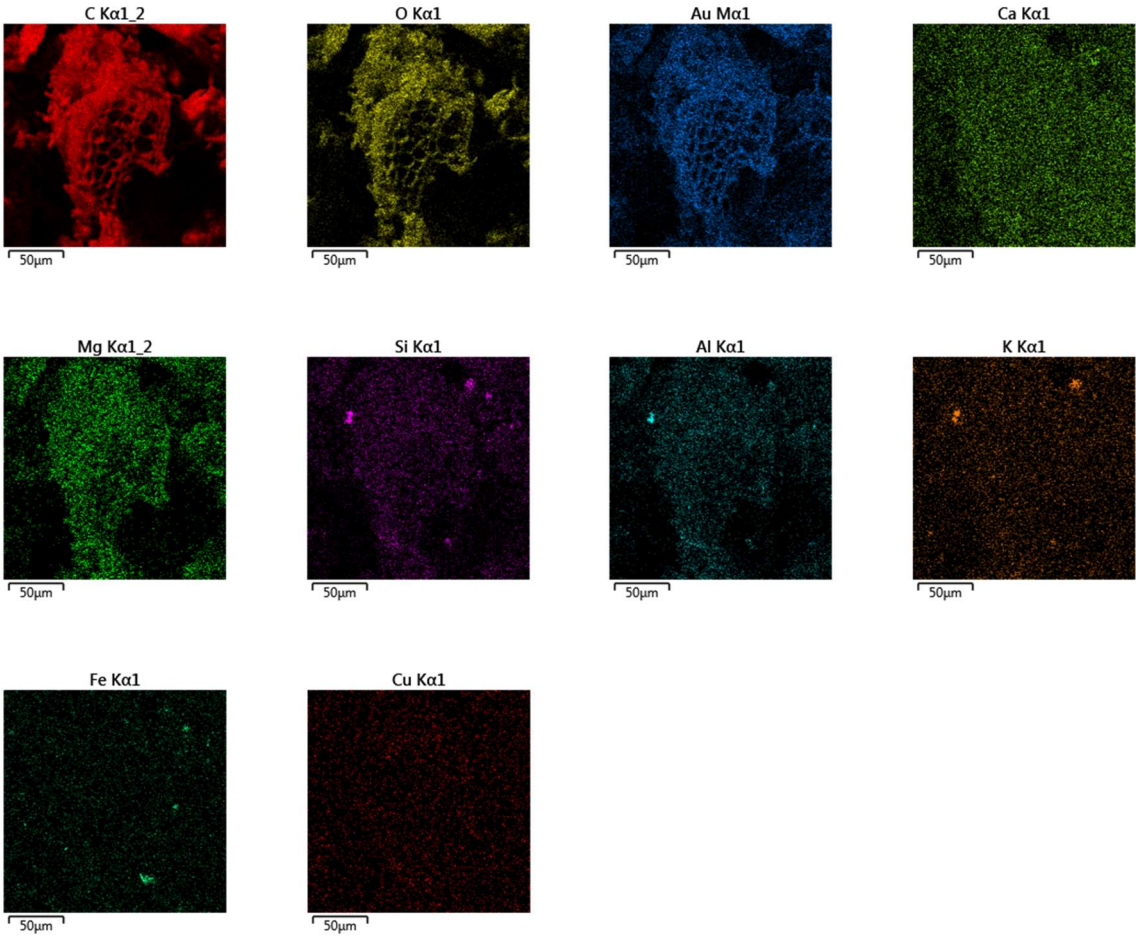
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 3. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 600°C – 1:1.



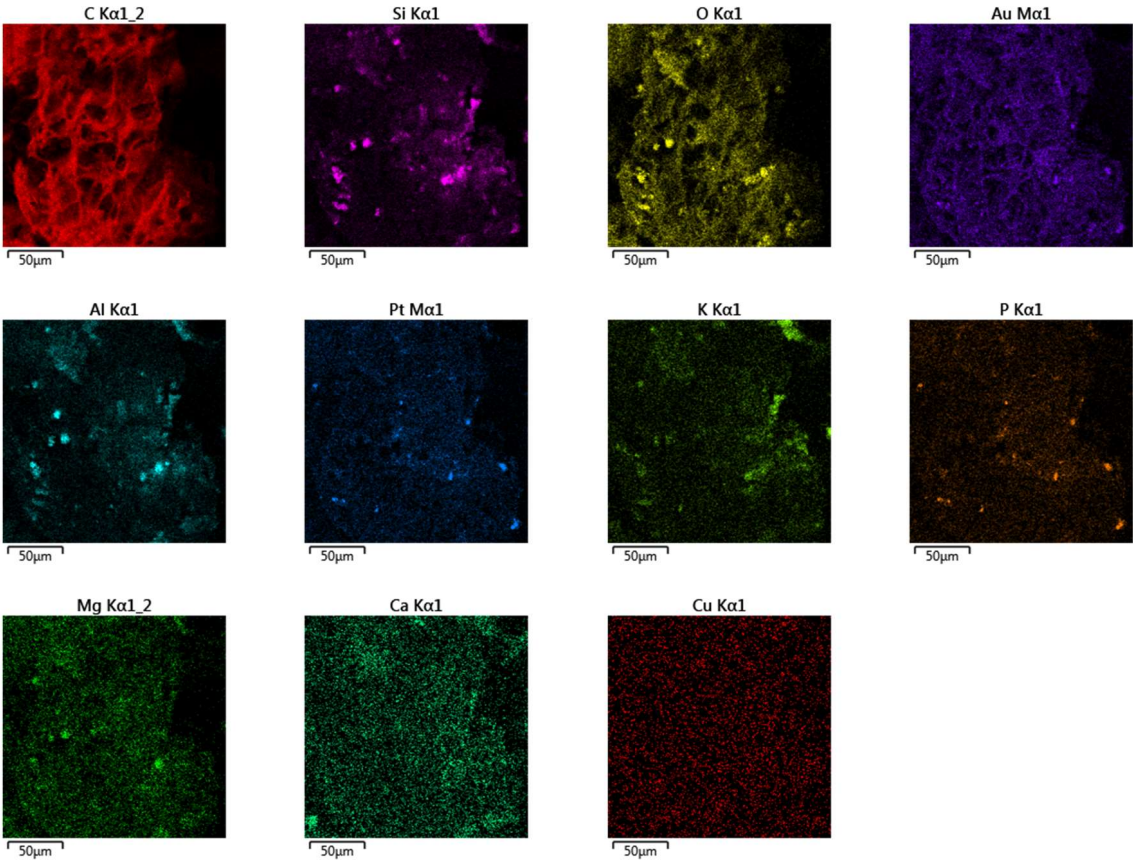
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 4. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 600°C – 1:2.



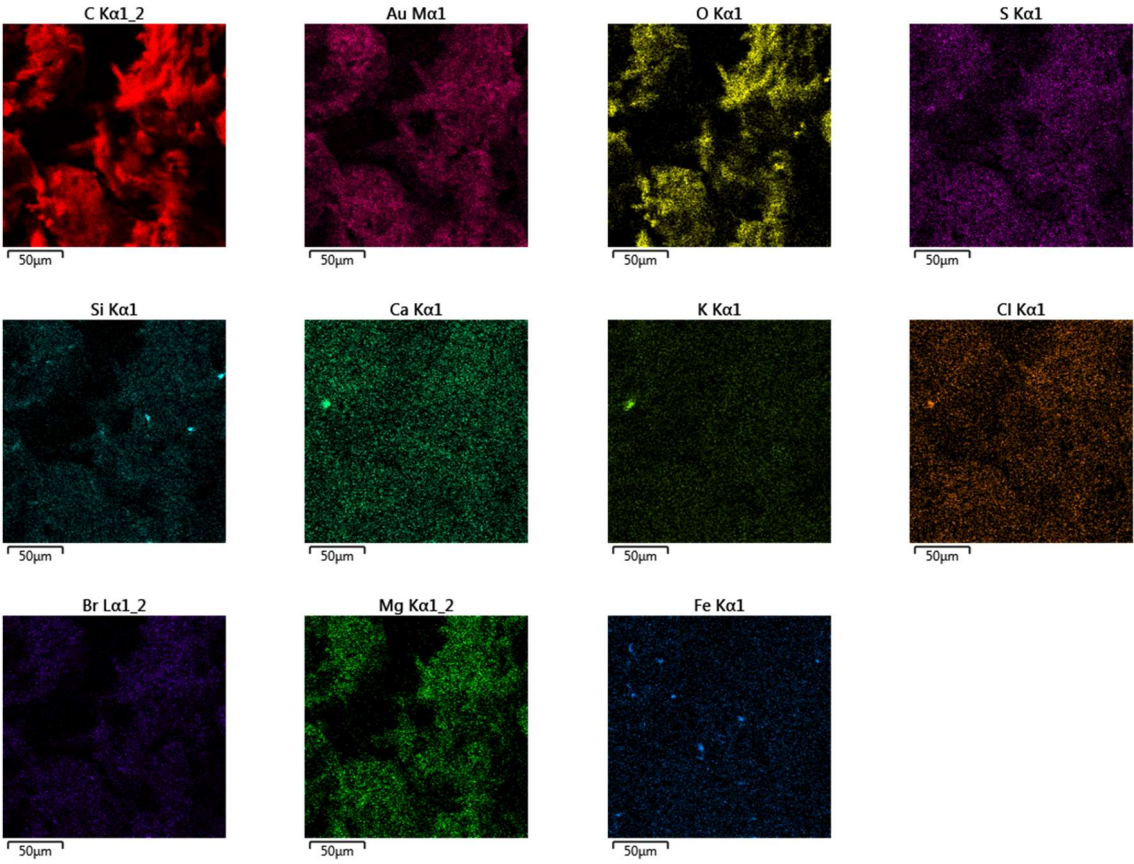
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 5. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 600°C – 1:4.



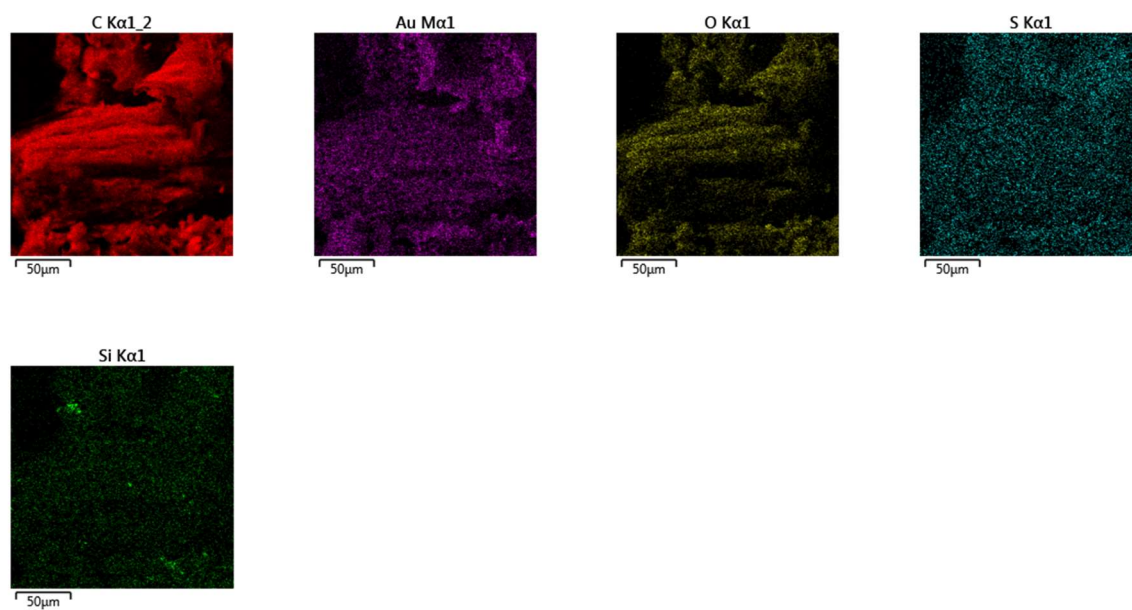
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 6. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 700°C – 1:1.



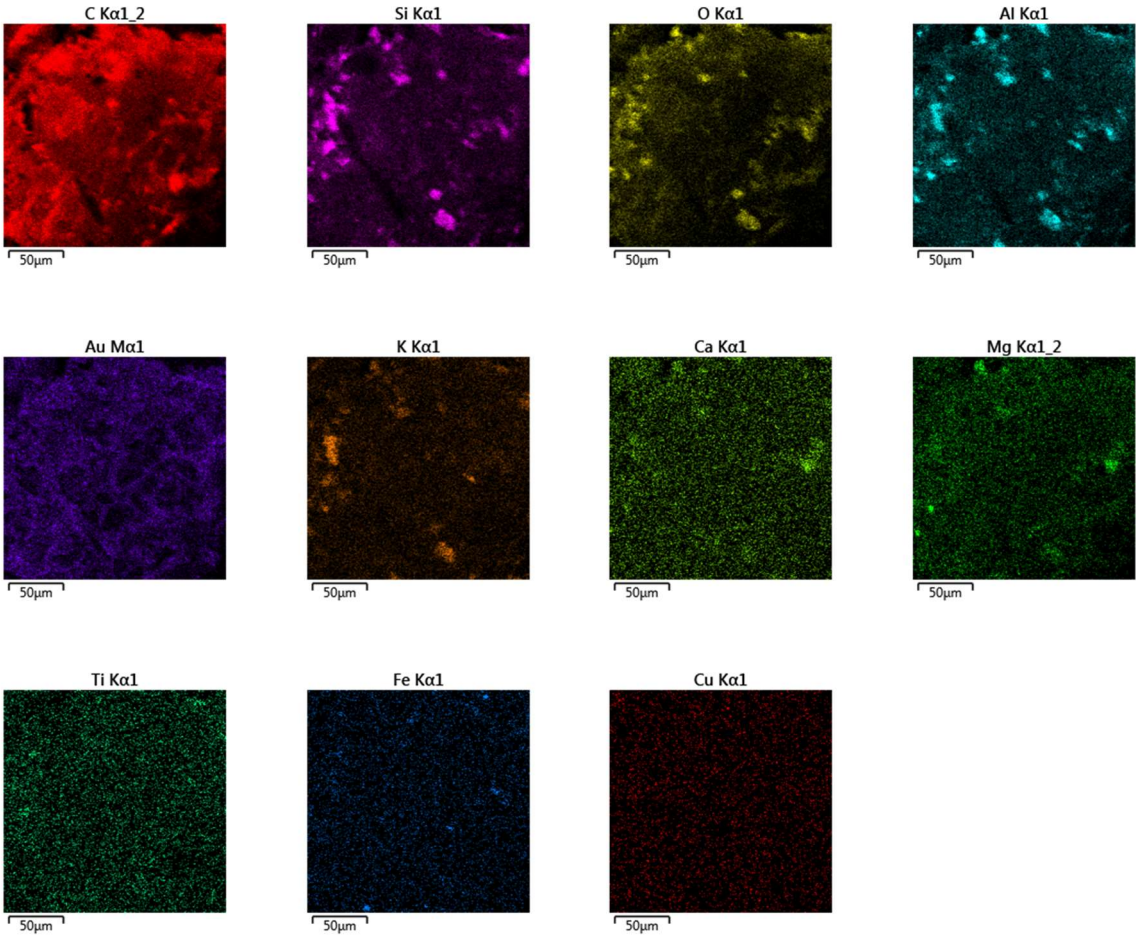
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 7. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 700°C – 1:2.



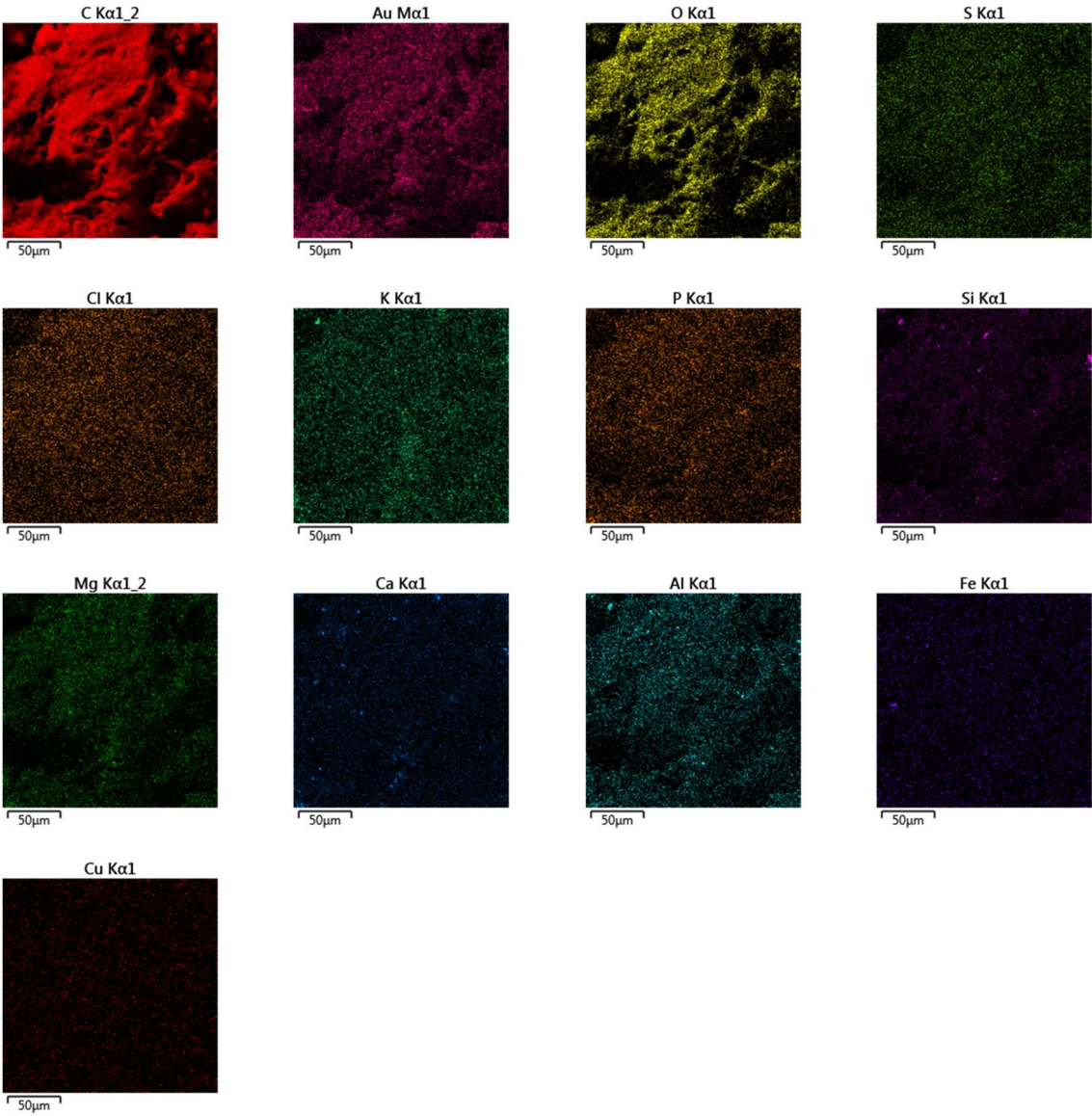
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 8. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 700°C – 1:4.



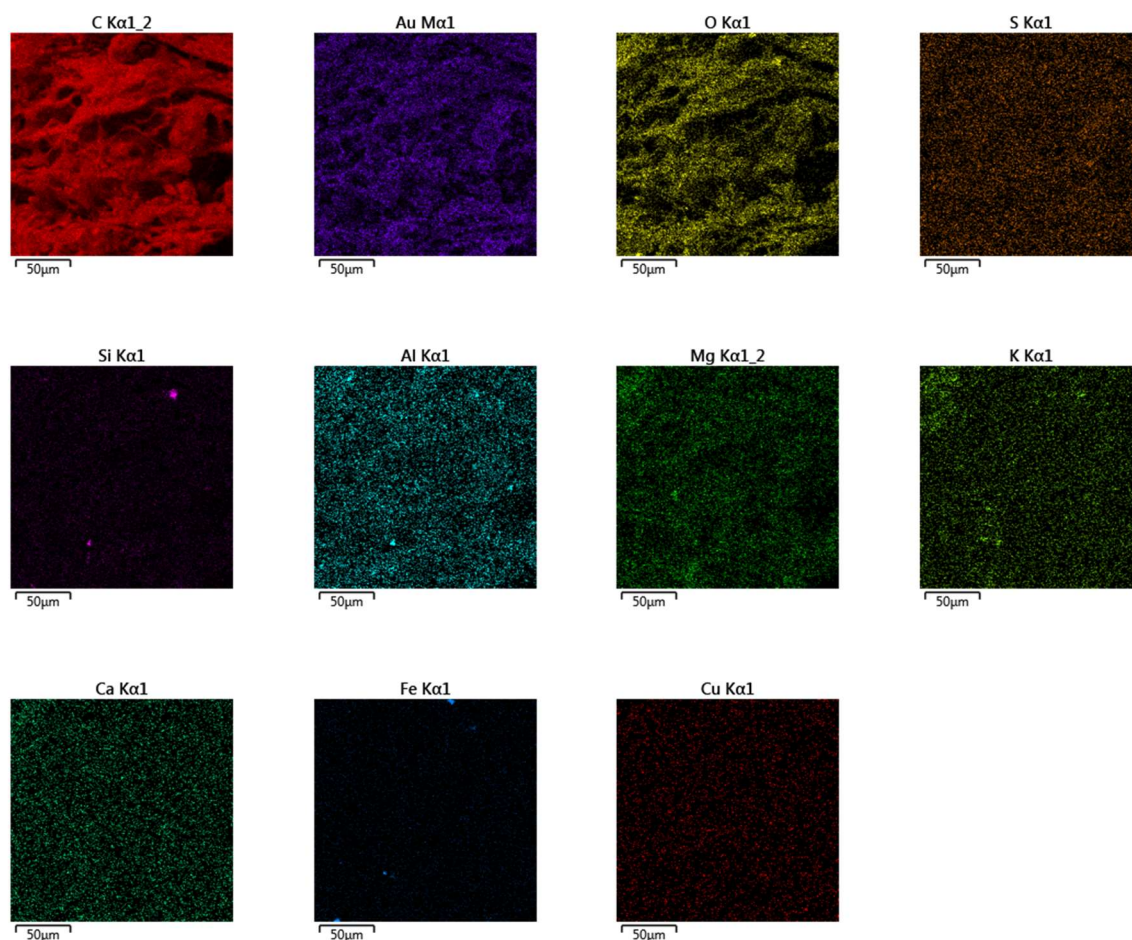
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 9. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 800°C – 1:1.



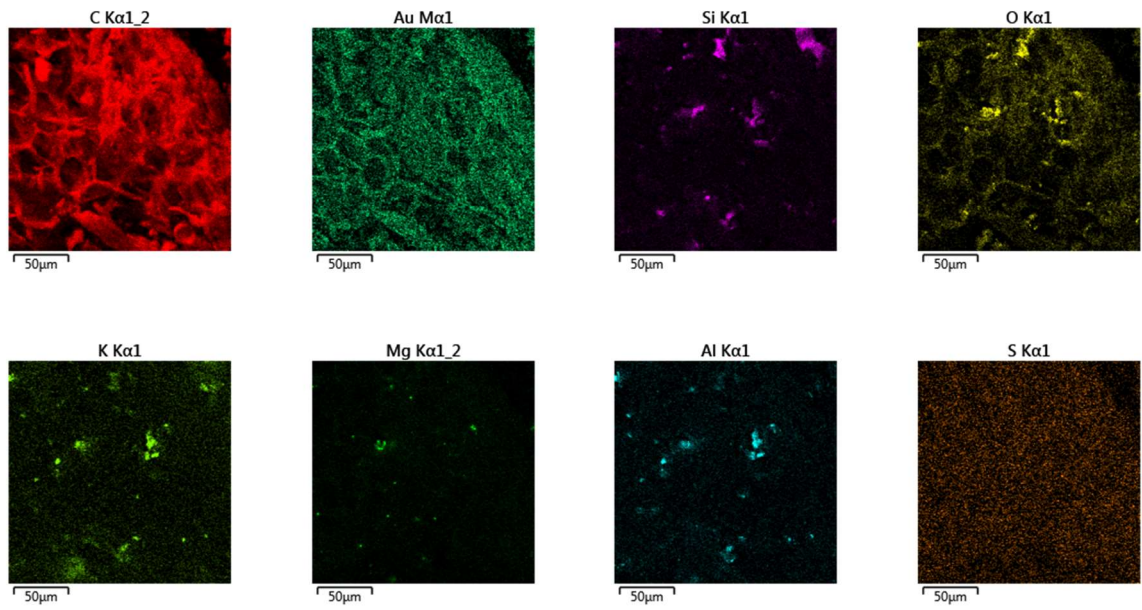
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 10. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 800°C – 1:2.



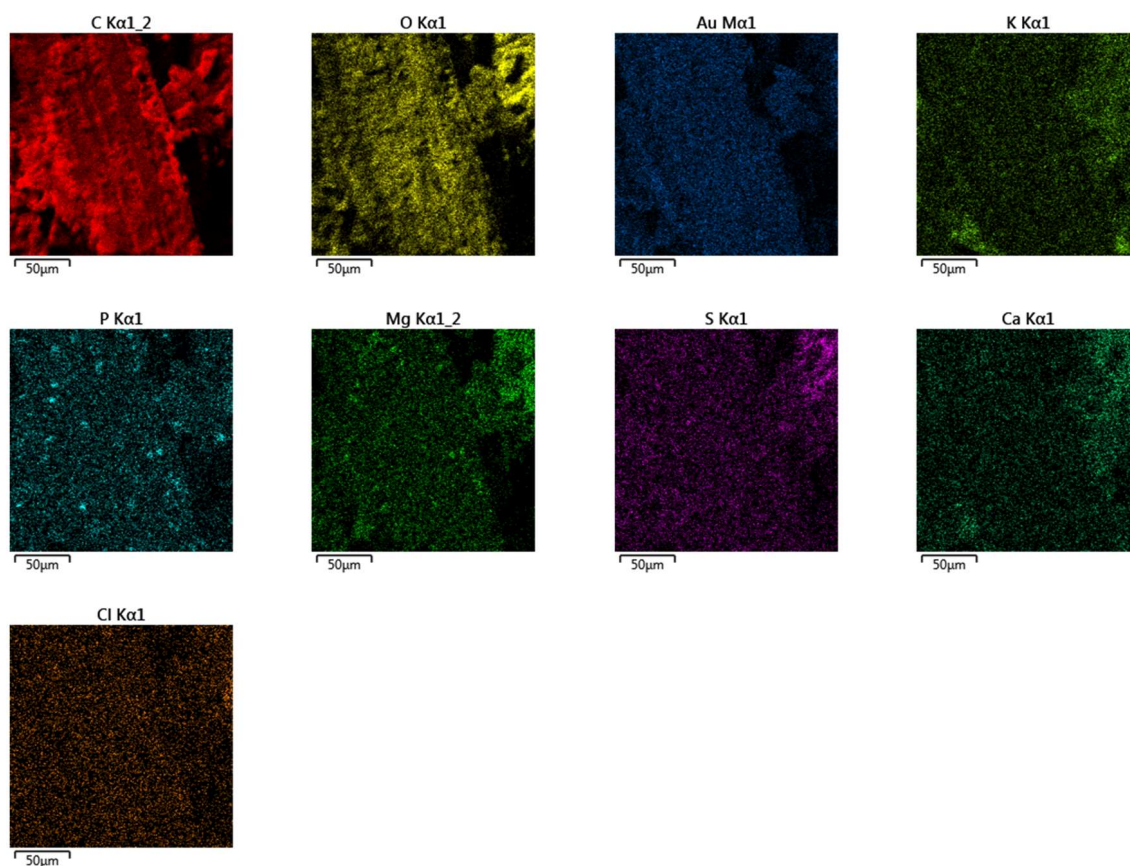
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 11. Mapeamento por EDS para a amostra de CACa 800°C – 1:4.



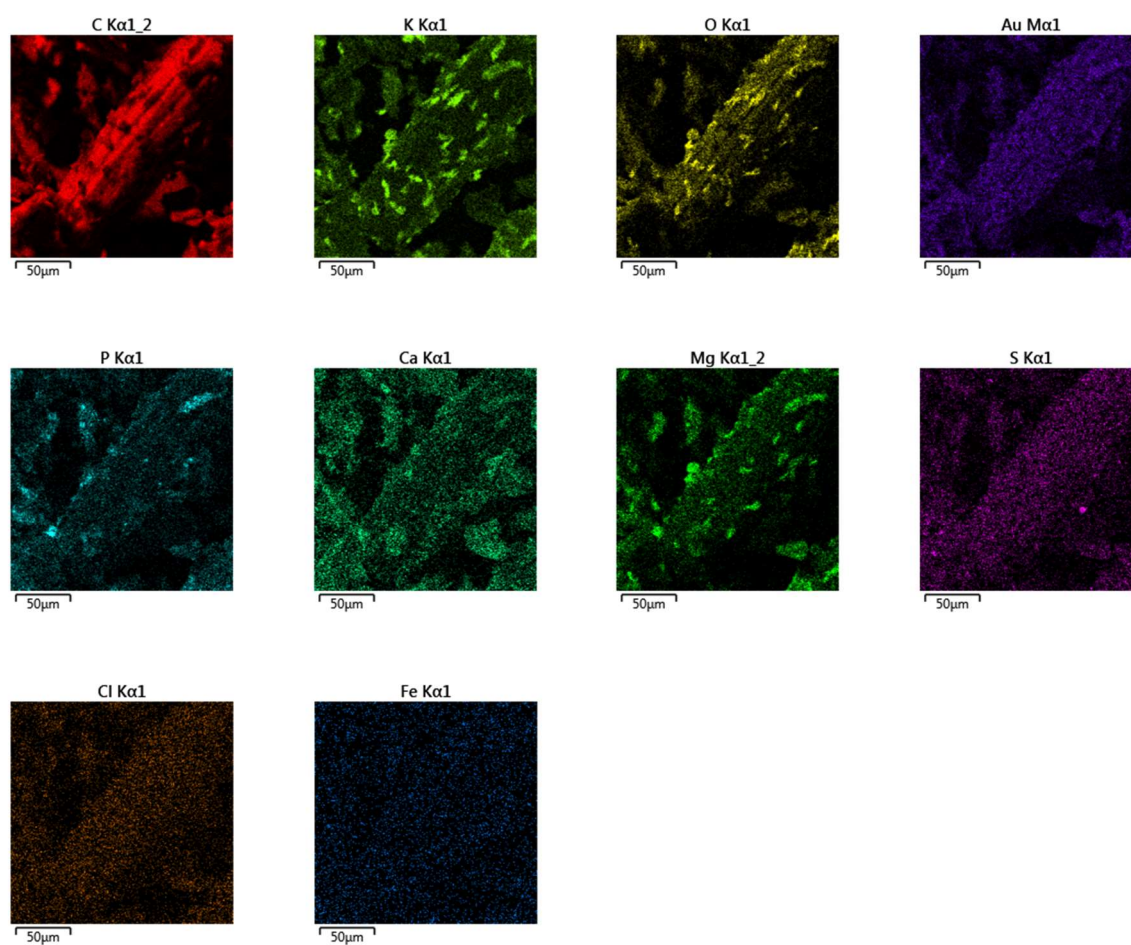
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 12. Mapeamento por EDS para a amostra de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh.



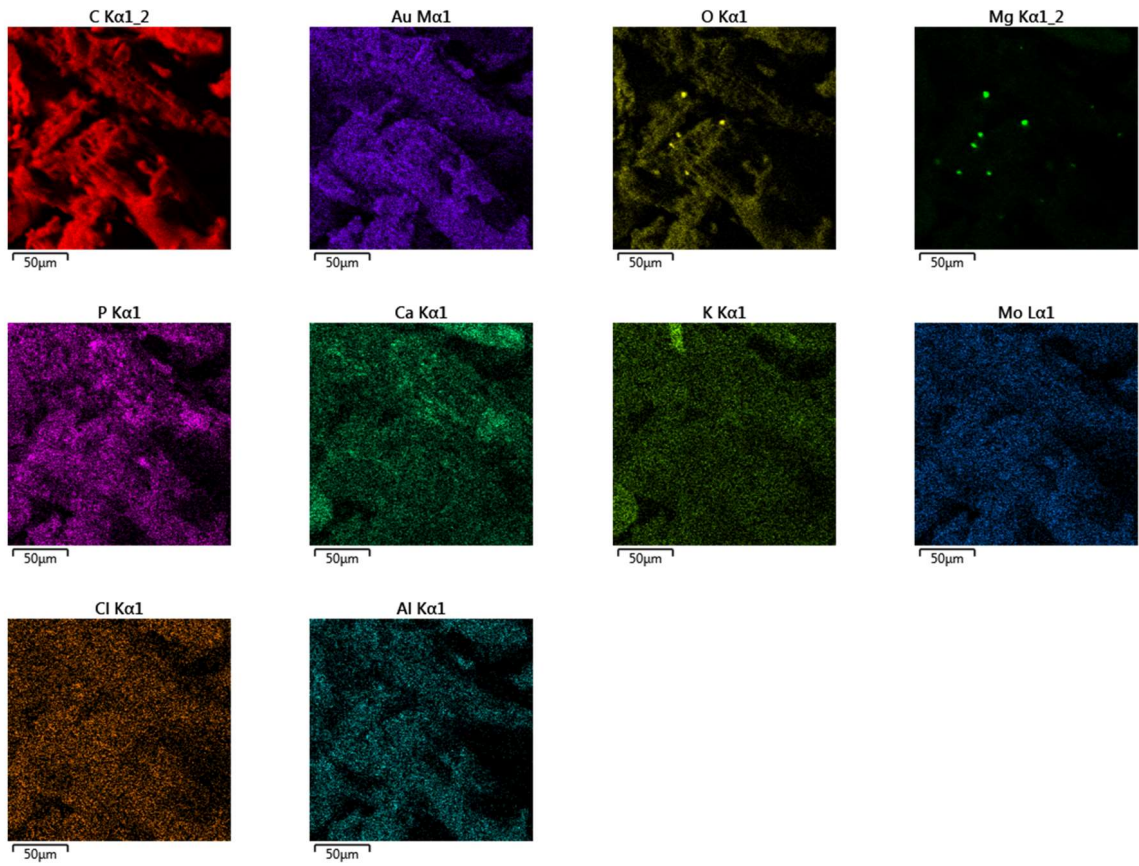
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 13. Mapeamento por EDS para a amostra de carvão proveniente de cascas de grãos de girassol com granulometria de 60 mesh.



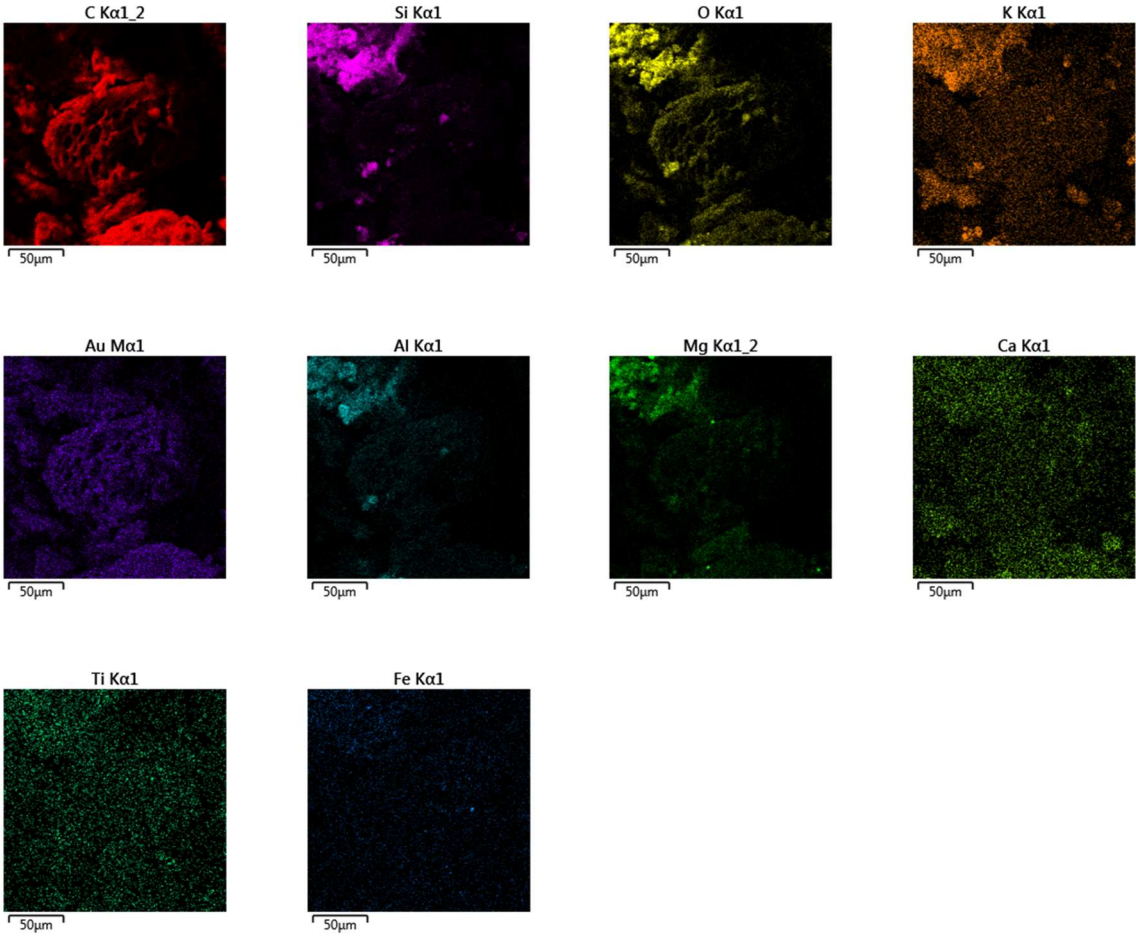
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 14. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 600°C – 1:1.



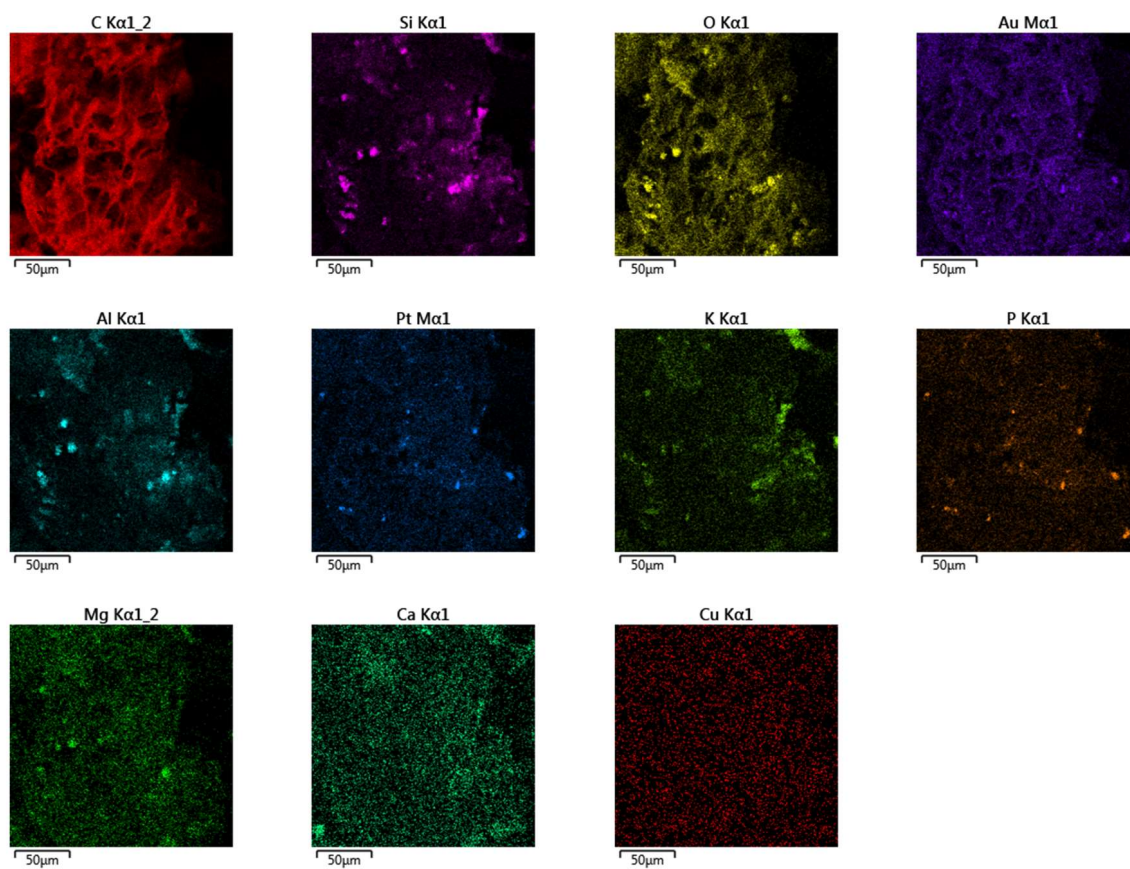
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 15. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 600°C – 1:2.



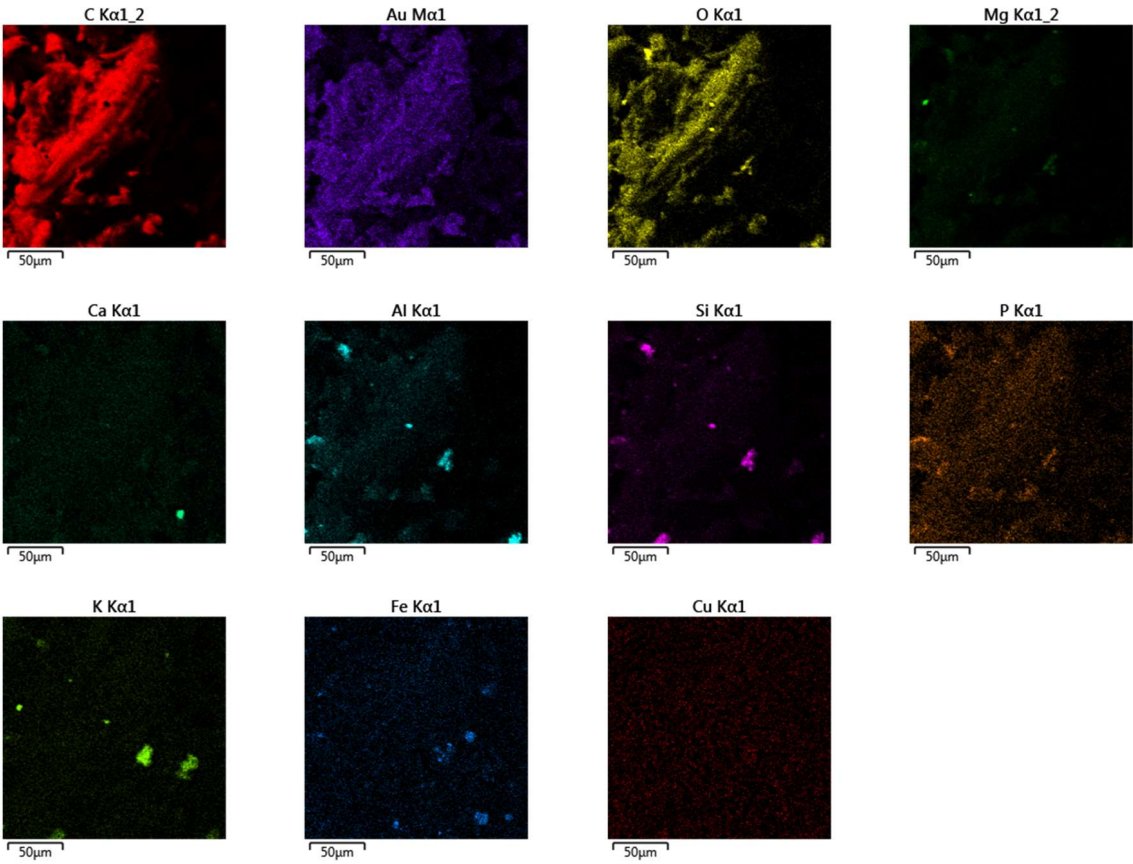
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 16. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 600°C – 1:4.



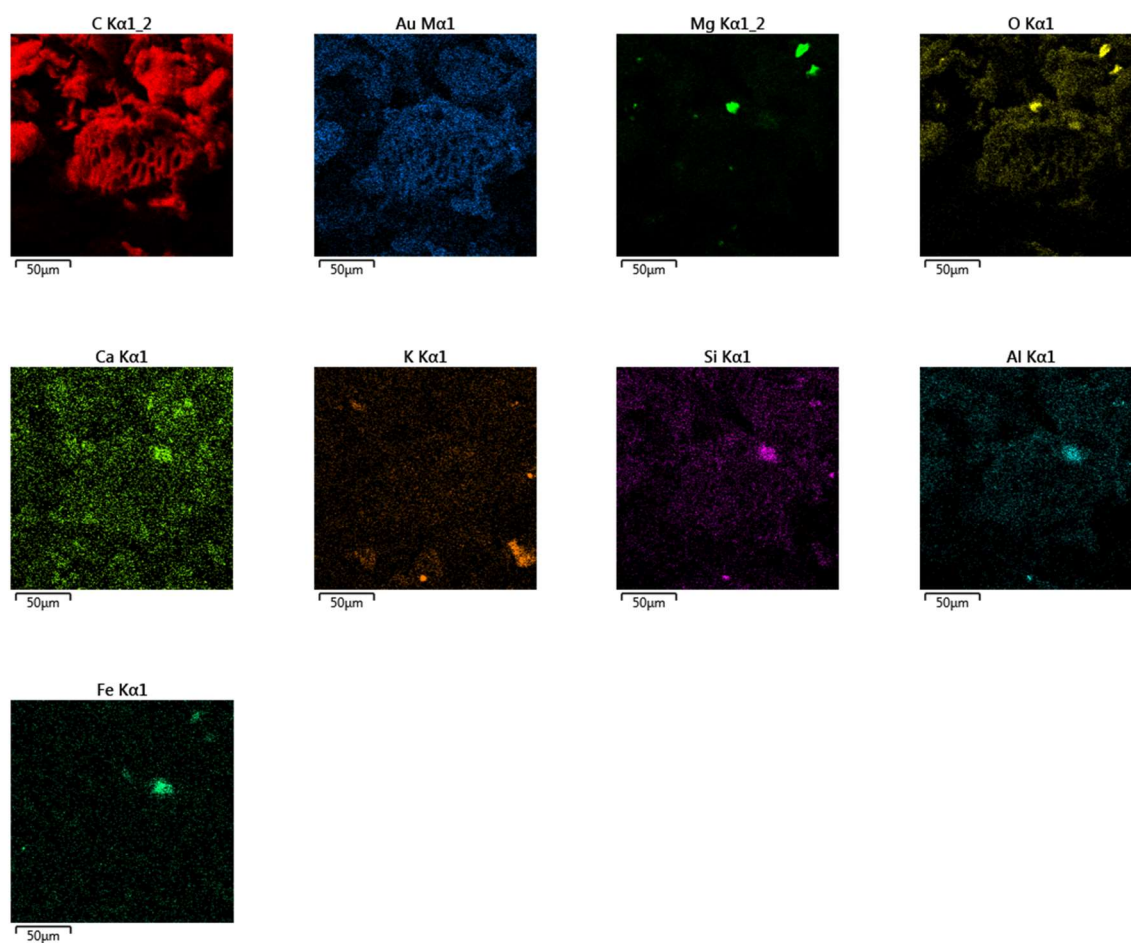
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 17. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 700°C – 1:1.



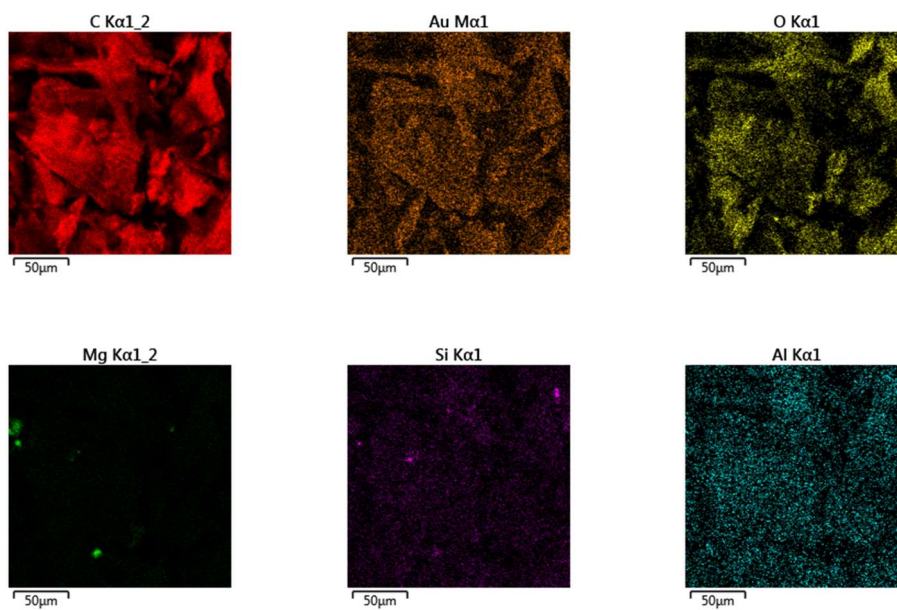
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 18. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 700°C – 1:2.



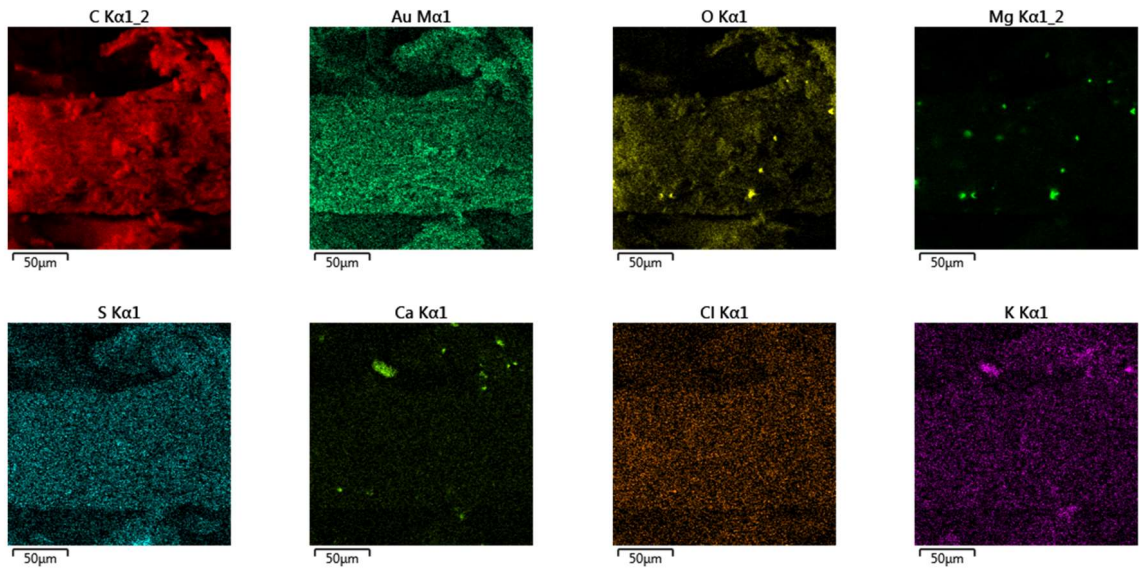
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 19. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 700°C – 1:4.



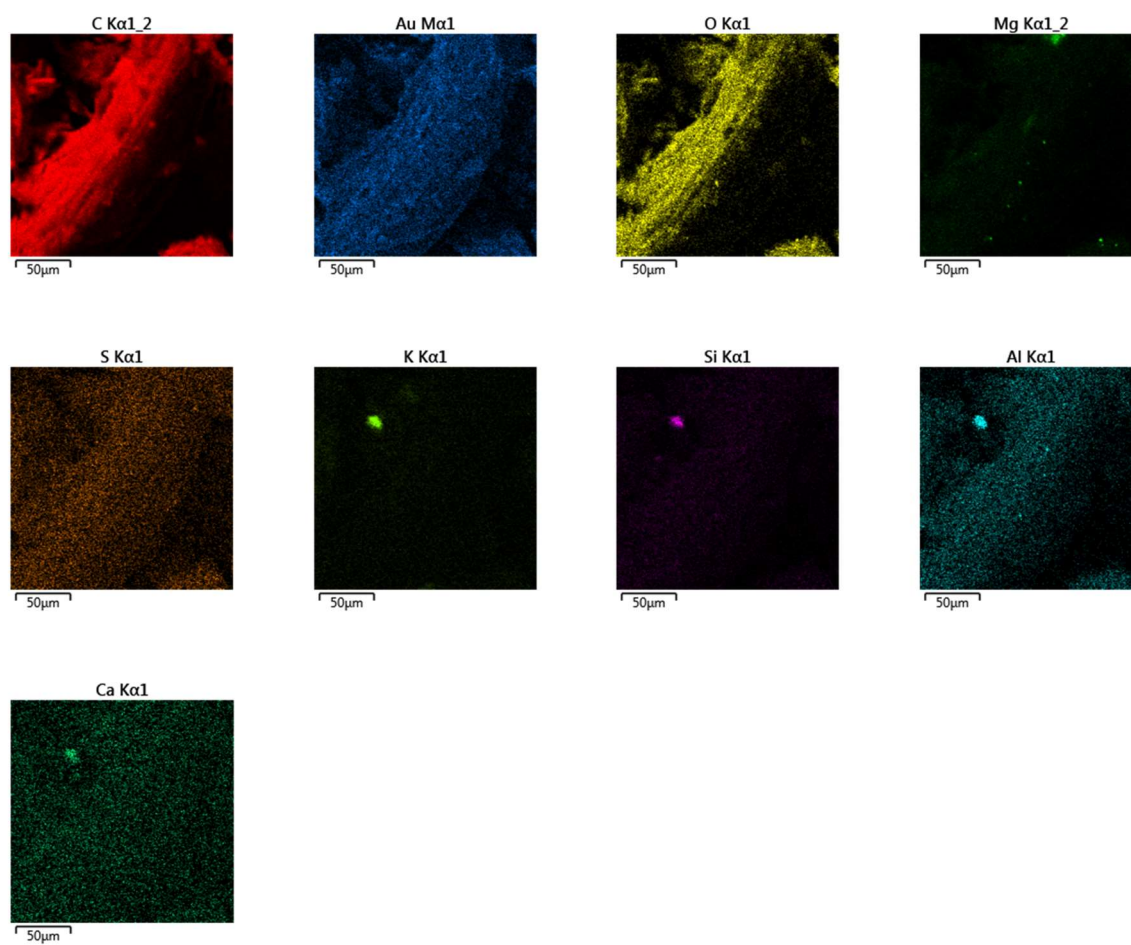
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 20. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 800°C – 1:1.



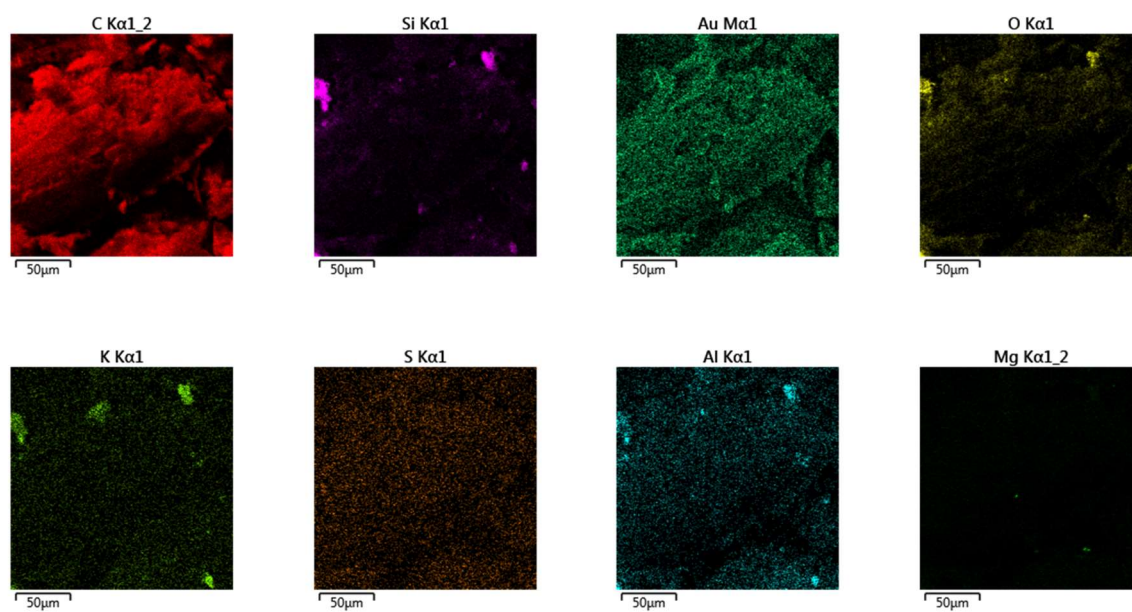
Fonte: Do autor, 2024.

Figura 21. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 800°C – 1:2.



Fonte: Do autor, 2024.

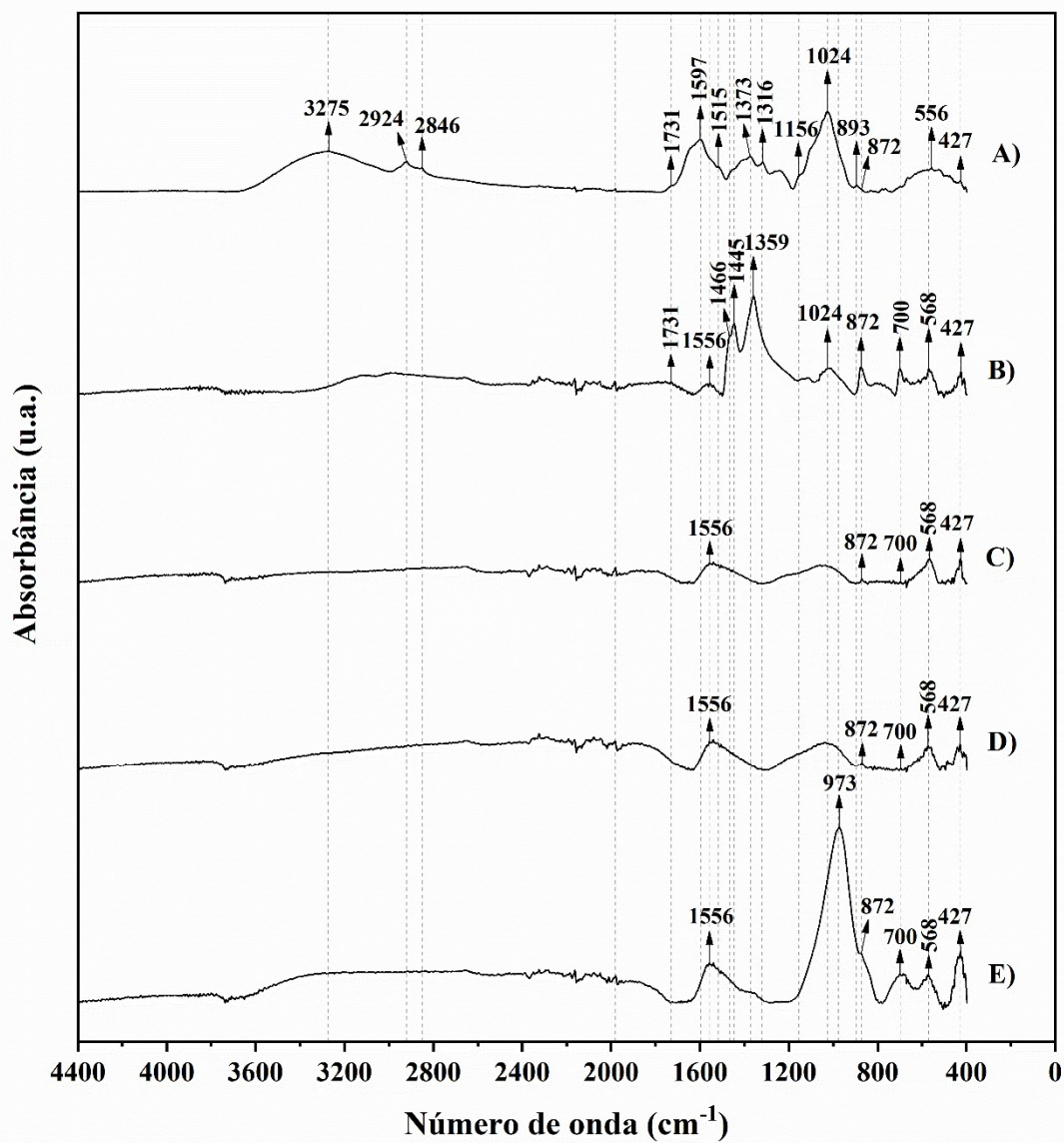
Figura 22. Mapeamento por EDS para a amostra CAGi 800°C – 1:4.



Fonte: Do autor, 2024.

APÊNDICE D – ESPECTROS DE FT-IR

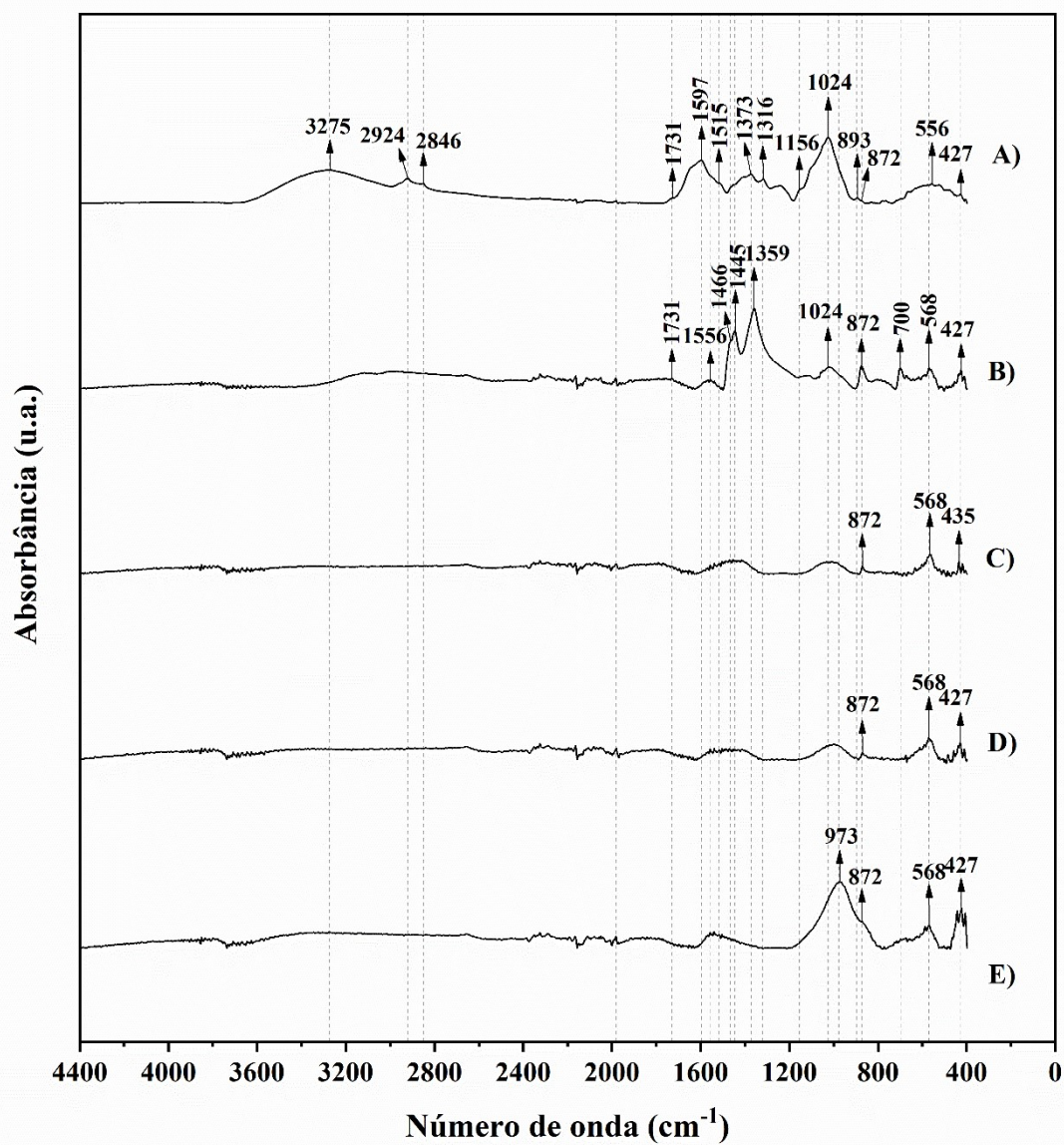
Figura 1. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 600°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de café moídas; B) Carvão cascas de grãos de café; C) CACa 600 – 1:1; D) CACa 600 – 1:2 e E) CACa 600 – 1:4.

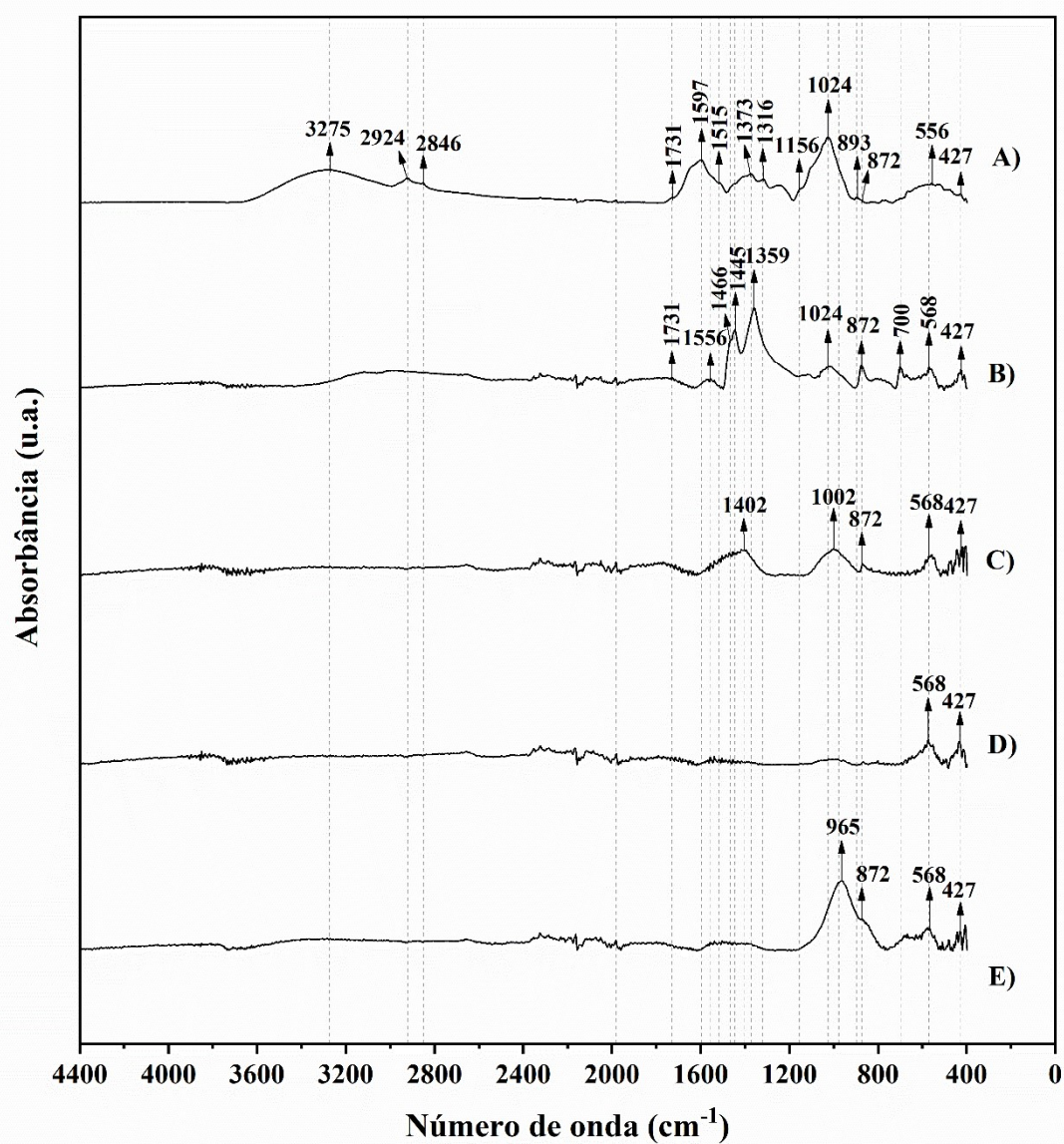
Figura 2. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 700°C.



FORTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de café moídas; B) Carvão cascas de grãos de café; C) CACa 700 – 1:1; D) CACa 700 – 1:2 e E) CACa 700 – 1:4.

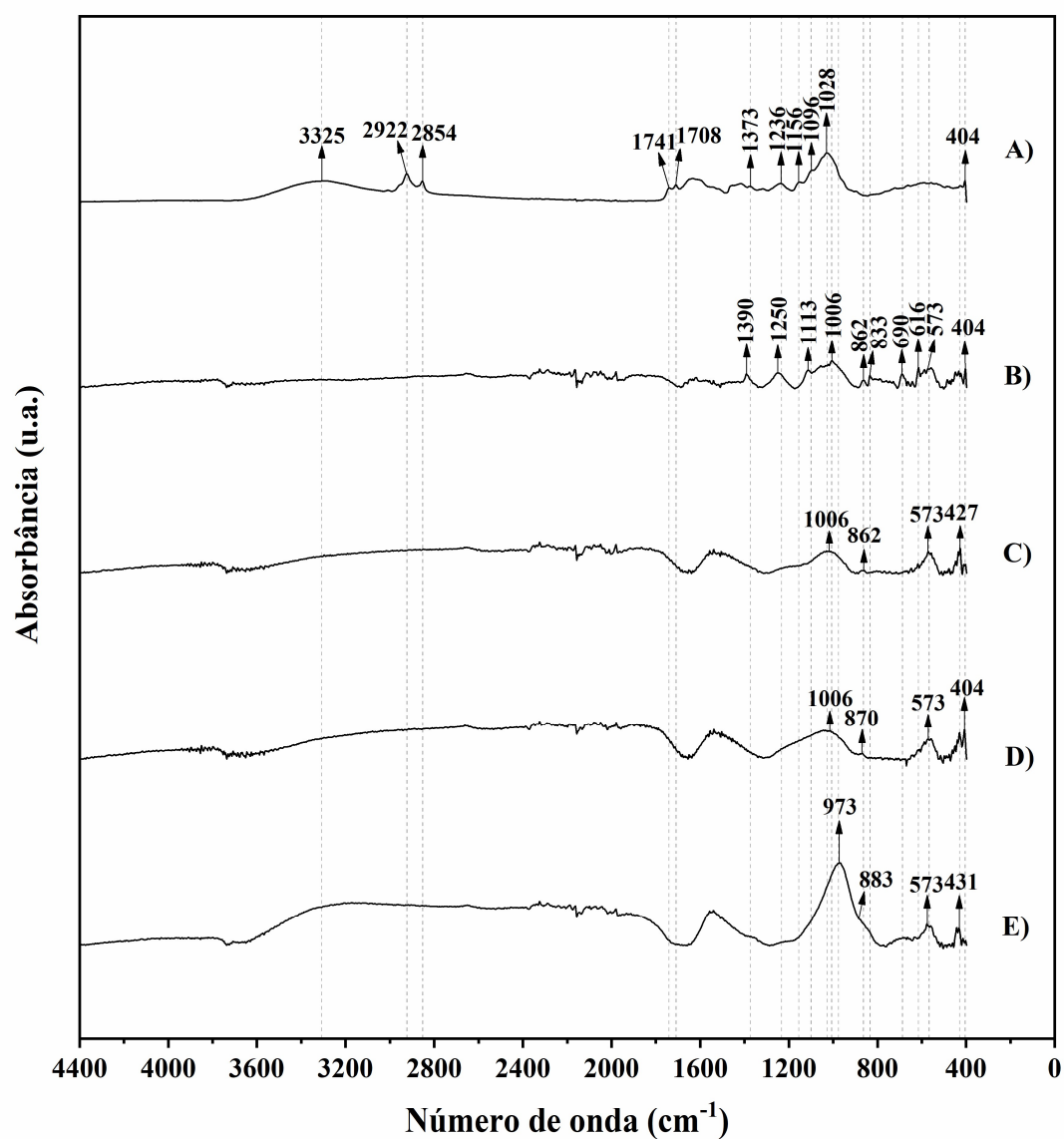
Figura 3. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de café 800°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de café moídas; B) Carvão cascas de grãos de café; C) CACa 800 – 1:1; D) CACa 800 – 1:2 e E) CACa 800 – 1:4.

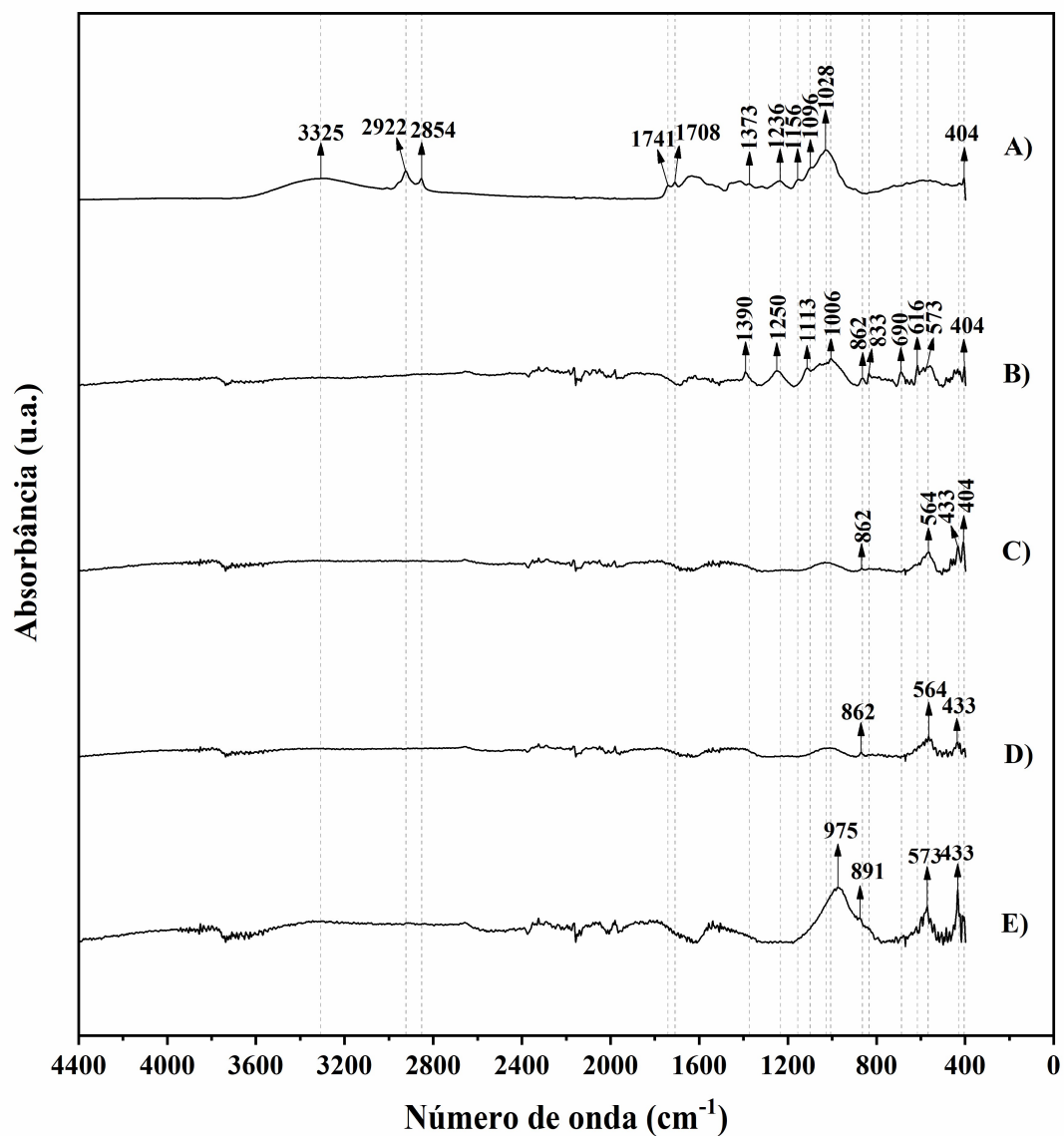
Figura 4. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 600°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de girassol moídas; B) Carvão cascas de grãos de girassol; C) CAGi 600 – 1:1; D) CAGi 600 – 1:2 e E) CAGi 600 – 1:4.

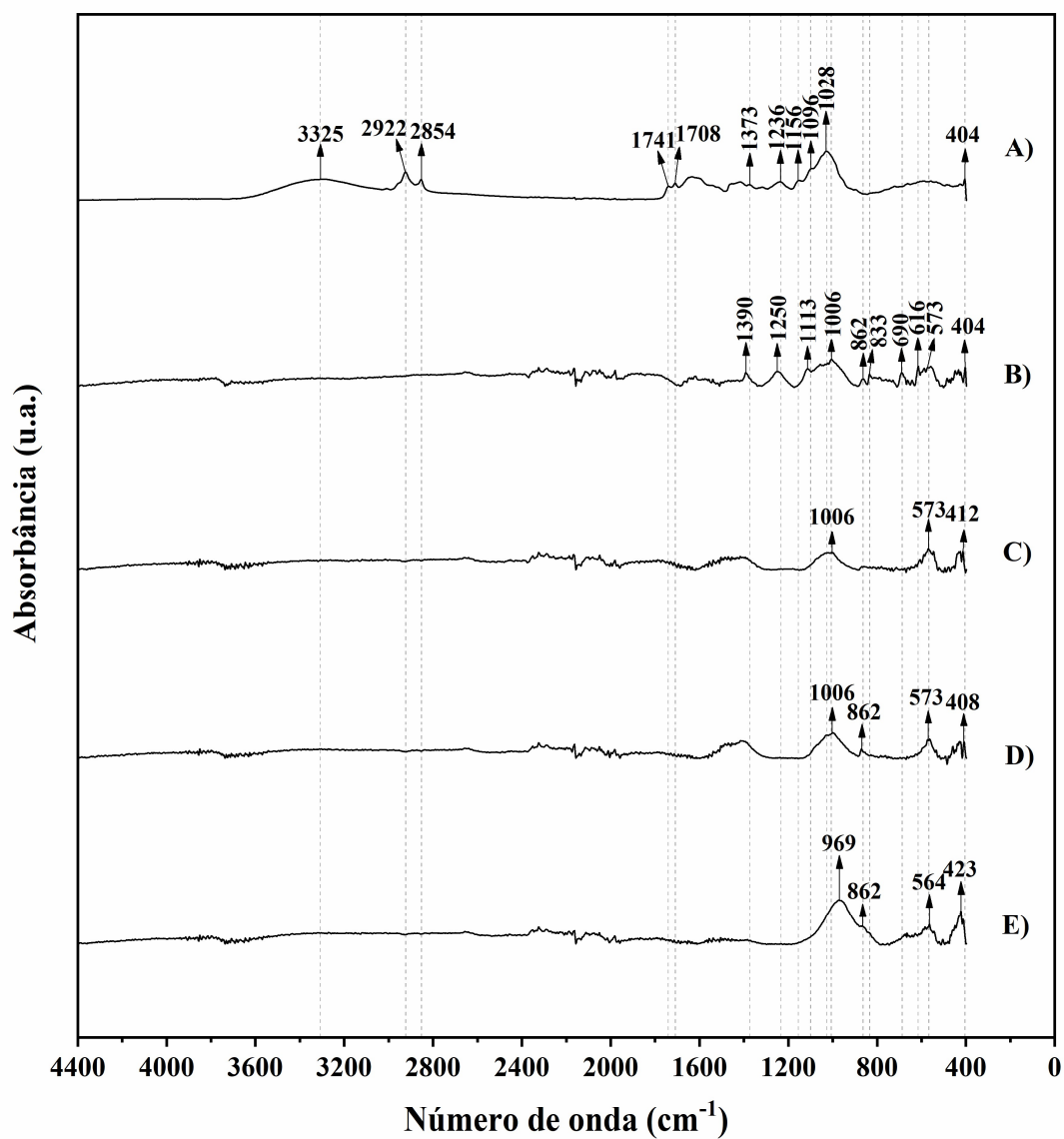
Figura 5. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 700°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de girassol moídas; B) Carvão cascas de grãos de girassol; C) CAGi 700 – 1:1; D) CAGi 700 – 1:2 e E) CAGi 700 – 1:4.

Figura 6. Espectro FT-IR carvões ativados-cascas de grãos de girassol 800°C.



FONTE: Do autor, 2024.

Nota: A) Cascas de grãos de girassol moídas; B) Carvão cascas de grãos de girassol; C) CAGi 800 – 1:1; D) CAGi 800 – 1:2 e E) CAGi 800 – 1:4.