



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA DIGITAL**

POLIANA LUCILA OLIVEIRA

**FILTRO COMPÓSITO PARA RETENÇÃO DE CO₂ A PARTIR DE RESÍDUO
AGROENERGÉTICO (ENDOCARPO DA *Acrocomia Aculeata* – MACAÚBA):
OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO**

**Palmas-TO
2024**

POLIANA LUCILA OLIVEIRA

**FILTRO COMPÓSITO PARA RETENÇÃO DE CO₂ A PARTIR DE RESÍDUO
AGROENERGÉTICO (ENDOCARPO DA *Acrocomia Aculeata* – MACAÚBA):
OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestre (a) em Agroenergia Digital.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Valdés Serra.

**Palmas-TO
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

O48f Oliveira, Poliana Lucila.

Filtro compósito para retenção de CO₂ a partir de resíduo agroenergético (endocarpo da *Acrocomia Aculeata* - Macaúba): obtenção e caracterização.. / Poliana Lucila Oliveira. – Palmas, TO, 2024.

97 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2024.

Orientador: Juan Carlos Váldez Serra

1. Filtro compósito.. 2. Adsorvente de CO₂.. 3. Carvão ativado do endocarpo da Macaúba.. 4. Membrana Orgânica.. I. Título

CDD 333.7

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e ao meu filho que sempre
idealizam, acolhem, lutam e realizam
meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que nessa longa e árdua caminhada potencializaram este projeto, contribuindo de forma direta ou indireta, em especial:

A Deus por ter sido meu guia, minha força e fortaleza. Até aqui Ele me sustentou.

Ao meu orientador, Dr. Juan Carlos Valdés Serra que me orientou academicamente como muita criatividade, comprometimento e sabedoria contribuindo significativamente para a construção desta dissertação. Além disto me acolheu como um grande mentor e me mostrou que desistir não faz parte do meu percurso.

Ao técnico de laboratório, Msc. Alexandre Albuquerque pelo auxílio nos ensaios, pelas ideias e pelas orientações extremamente relevantes ao projeto.

Aos professores Emerson e Patrícia por me permitirem usar o laboratório LAPEQ para desenvolver parte da pesquisa e aos técnicos Fabrício e Álvaro pela gentileza e paciência ao me auxiliarem nas análises químicas.

Ao meu filho, Lucca Thundella Oliveira de Almeida, por ser a minha vida e me mostrar por quem devo sempre lutar. Nossos momentos e cada sorriso seu me encorajam diariamente.

Aos meus pais, Vicente de Paula de Oliveira e Sandra Helena de Oliveira, que dão a vida por mim e me incentivam sempre a buscar o meu melhor. Obrigada pelo incentivo, apoio psicológico e financeiro, por todo amor, carinho e zelo para comigo.

A minha irmã, Amanda de Paula de Oliveira, meu cunhado, André Melo Sousa, meus sobrinhos Teodoro Thundella e Olívia Thundella, que sempre tiveram um olhar carinhoso para comigo nos dias mais difíceis.

E a você, Frederico Almeida, um colega de trabalho que se tornou um grande amigo, me incentivou a cursar esse mestrado e ao longo do percurso esteve sempre presente.

A todos, sem exceção, meu muito obrigada!

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico e o crescimento econômico estão relacionados ao consumo energético, sendo os combustíveis fósseis a principal fonte. A combustão destes produtos não renováveis gera gases poluentes como dióxido e monóxido de carbono que agravam o efeito estufa e acentuam o aquecimento global. Em contrapartida, ações mitigadoras buscam reduzir os gases de efeito estufa para estabilizar o sistema climático. O presente trabalho, a partir de uma prática ecológica, tem como objetivo produzir uma membrana compósita utilizando carvão ativado (CA) associado a uma matriz polimérica de poliuretano (PU A adicionado a PU B) visando a retenção do dióxido de carbono (CO₂). O CA foi produzido a partir do endocarpo da macaúba e caracterizado por teor de cinzas, MEV, TGA, DSC e EDX, o que permitiu concluir que o material produzido é carbonáceo e poroso com dimensões e formatos diferentes. A membrana compósita foi então confeccionada mantendo-se a massa da matriz polimérica fixa utilizando 5 gramas de PU B e 3 gramas de PU A, variando apenas a quantidade de CA. Três amostras, com 5 repetições para cada, foram produzidas, obtendo-se a amostra 1 com 0,8 gramas de CA, amostra 2 com 2,4 gramas de CA e amostra 3 com 4 gramas de carvão. O filtro foi então caracterizado por TGA, DSC, MEV e infravermelho (IRS) constatando a produção de uma membrana compósita orgânica no qual CA foi incorporado à matriz, apresentando estabilidade térmica até temperatura de 270°C e comprimentos de ondas característicos bem definidos. Para testar a funcionalidade dos filtros um coletor porta-membranas foi confeccionado. O filtro foi inserido neste coletor, acoplado ao escapamento do veículo motor a diesel, permanecendo estacionado e com o motor ligado por um intervalo de tempo de dez minutos para cada membrana teste. As membranas após o uso foram alocadas e sacos plásticos e lacradas. Com a finalidade de averiguar a adsorção do CO₂ caracterizaram-se as membranas pré e pós-uso com a técnica de infravermelho (IRS). Como resultado as imagens espectrais do IRS revelaram valores diferentes para as transmitâncias das membranas antes e depois da exposição aos gases queimados. Percentualmente diferenças de 2 a 10% foram registradas demonstrando a retenção e absorção de alguma substância gasosa presente na combustão do diesel. A análise estatística comprovou que as membranas são estatisticamente iguais quanto a transmitância e que a quantidade do reforço impregnado na matriz não influenciou na incidência de luz nas amostras.

Palavras-chaves: Adsorvente de CO₂; Filtro compósito; Membrana orgânica; Poliuretano; Endocarpo da Macaúba.

ABSTRACT

Technological development and economic growth are related to energy consumption, with fossil fuels being the main source. The combustion of these non-renewable products generates polluting gases such as carbon dioxide and monoxide, which worsen the greenhouse effect and exacerbate global warming. On the other hand, mitigation actions seek to reduce greenhouse gases to stabilize the climate system. This present work, based on an ecological practice, aims to produce a composite membrane using activated carbon (AC) associated with a polyurethane (PU A added to PU B) polymer matrix, to retain carbon dioxide (CO₂). The AC was produced from the endocarp of the macaúba fruit and characterized by ash content, SEM, TGA, DSC, and EDX, which allowed the conclusion that the produced material is carbonaceous and porous with different dimensions and shapes. The composite membrane was then made, keeping the weight of the polymer matrix fixed using 5 grams of PU B and 3 grams of PU A, varying only the amount of AC. Three samples, with 5 repetitions each, were produced, obtaining sample 1 with 0.8 grams of CA, sample 2 with 2.4 grams of CA, and sample 3 with 4 grams of charcoal. The filter was then characterized by TGA, DSC, SEM, and infrared spectroscopy (IRS), confirming the production of an organic composite membrane in which CA was incorporated into the matrix, presenting thermal stability up to 270°C and well-defined characteristic wavelengths. To test the functionality of the filters, a membrane holder was made. The filter was inserted into this holder, attached to the exhaust of a diesel engine, remaining stationary with the engine running for ten minutes for each test membrane. After use, the membranes were placed in plastic bags and sealed. In order to investigate the CO₂ adsorption, the membranes were characterized before and after use using the infrared technique (IRS). The spectral images of the IRS revealed different values for the transmittance of the membranes before and after exposure to burnt gases. Percentagewise differences of 2 to 10% were recorded, demonstrating the retention and absorption of some gaseous substances present in diesel combustion. The statistical analysis confirmed that the membranes are statistically equal in terms of transmittance and that the amount of reinforcement impregnated in the matrix did not influence the incidence of light in the samples.

Keywords: CO₂ adsorbents; Composite filter; Organic membrane; Polyurethane; Macaúba endocarp.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1:	Matriz Energética Mundial.....	21
Figura 2:	Matriz Energética Brasileira	22
Figura 3:	Tecnologias de captura de CO ₂	25
Figura 4:	Mecanismos de separação de CO ₂	27
Figura 5:	Representação esquemática da seção transversal dos diferentes tipos de morfologia de membranas sintéticas	28
Figura 6:	Quantitativos de veículos no Brasil com o passar dos anos	32
Figura 7:	Distribuição espacial da espécie <i>Acrocomia aculeata</i>	34
Figura 8:	Partes da macaúba	34
Figura 9:	Reação de policondensação de formação do poliuretano.....	36
Figura 10:	Fluxograma A – esboço geral da pesquisa	37
Figura 11:	Fluxograma B – preparo do carvão ativado	38
Figura 12:	Fluxograma C – etapas de produção e avaliação das amostras do material compósito	39
Figura 13:	Macaúba <i>in natura</i>	40
Figura 14:	Palmeiras da qual o fruto da macaúba foi coletado	40
Figura 15:	Localização das Palmeiras de Macaúba	41
Figura 16:	Prensa utilizada para quebra da casca da macaúba	42
Figura 17:	a) Conjunto: polpa, endocarpo e amêndoa; b) carbonização da polpa e amêndoa; c) endocarpo <i>in natura</i> ; d) endocarpo armazenado	42
Figura 18:	a) Moinho de facas; b) Peneira	43
Figura 19:	Incubadora: remoção de impurezas	43
Figura 20:	Processo de lavagem para obtenção de pH neutro	44
Figura 21:	Microscópio eletrônico de varredura <i>JEOL JSM7100F</i>	46
Figura 22:	Analisador térmico simultâneo <i>NETZSCH STA 449 F3 Neveio</i>	47
Figura 23:	Detector de raios-X <i>Oxford Instruments XMax-n 80</i> acoplado ao microscópio eletrônico de varredura	47
Figura 24:	Componentes da espuma poliuretano (PU A associado a PU B)	48
Figura 25:	Teste 1 – Produção da membrana compósita e expansão do polímero.....	49
Figura 26:	Teste 2 - Ensaio de mistura dos componentes	50
Figura 27:	Membranas desenformadas	50
Figura 28:	Representação da espessura e diâmetro de cada amostra	51
Figura 29:	Coletor porta-membrana	53

Figura 30:	Esquema do experimento de verificação da funcionalidade	53
Figura 31:	Infravermelho <i>Agilent Technologies Cary 630 FTIR</i>	54
Figura 32:	Carvão ativado obtido	56
Figura 33:	a) MEV – carvão ativado, comprimento 100 μm , ampliado 50 vezes; b) MEV - carvão ativado, comprimento 100 μm , ampliado 110 vezes	57
Figura 34:	a) MEV – carvão ativado, comprimento 100 μm , ampliado 250 vezes; b) MEV – carvão ativado, comprimento 100 μm , ampliado 270 vezes.....	58
Figura 35:	Curvas de análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria exploratória individual (DSC) em atmosfera de ar sintético do carvão ativado.....	59
Figura 36:	Espectro de energia dispersiva de raios X (EDS) do carvão ativado produzido a partir do endocarpo da Macaúba.....	60
Figura 37	Altura da membrana compósita (5mm)	61
:		
Figura 38:	Diâmetro da membrana compósita (5 cm)	61
Figura 39:	Repetições para cada amostra	62
Figura 40:	MEV da superfície da AM1 – 10% de carvão ativado, ampliada 50 vezes	63
Figura 41:	MEV da superfície da AM2 – 30% de carvão ativado, ampliada 50 vezes	64
Figura 42:	MEV da superfície da AM3 – 50% de carvão ativado, ampliada 50 vezes	65
Figura 43:	Lacunaz vazias visíveis na MEV da superfície da amostra.....	66
Figura 44:	Curvas de TGA e DSC da membrana compósita – amostra 1.....	67
Figura 45:	Curvas de TGA e DSC da membrana compósita – amostra 2.....	67
Figura 46:	Curvas de TGA e DSC da membrana compósita – amostra 3.....	68
Figura 47:	Espectro de energia dispersiva de raios X (EDX) da membrana compósita – amostra 1.....	69
Figura 48:	Espectro de energia dispersiva de raios X (EDX) da membrana compósita – amostra 2.....	70
Figura 49:	Espectro de energia dispersiva de raios X (EDX) da membrana compósita – amostra 3.....	71
Figura 50:	Coletor porta-membrana acoplado ao veículo Frontier S 4x4.....	72
Figura 51:	Demonstrativo da quantidade de combustível consumido.....	73
Figura 52:	Velocidade e temperatura da vazão da mistura gasosa pré-uso das membranas compósitas.....	74
Figura 53:	Membranas em uso.....	74
Figura 54:	Espectro de FTIR para a membrana de poliuretano.....	75
Figura 55:	Espectro (pré-uso) de FTIR para a AM1.....	76
Figura 56:	Espectro (pré-uso) de FTIR para a AM2.....	77

Figura 57:	Espectro (pré-uso) de FTIR para a AM3.....	78
Figura 58:	Espectros (pré-uso) de FTIR sobrepostos.....	79
Figura 59:	Espectros pré e pós-uso de FTIR AM1 sobrepostos.....	80
Figura 60:	Espectros pré e pós-uso de FTIR AM2 sobrepostos.....	81
Figura 61:	Espectros pré e pós-uso de FTIR AM3 sobrepostos.....	82
Quadro 1:	Composição e características das membranas inorgânicas, orgânicas e de matriz mista	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Teste da proporção ideal para a produção da membrana.....	49
Tabela 2:	Composição das mostras.....	51
Tabela 3:	Transmitâncias pré e pós – uso para as ligações N-H, C-H, C=O livre, C=O ligado e C-O para a AM1.....	80
Tabela 4:	Transmitâncias pré e pós – uso para as ligações N-H, C-H, C=O livre, C=O ligado e C-O para a AM2	81
Tabela 5:	Transmitâncias pré e pós – uso para as ligações N-H, C-H, C=O livre, C=O ligado e C-O para a AM3	82
Tabela 6:	Transmitâncias pré e pós – uso para o comprimento de onda de 669 cm^{-1} para AM1, AM2 e AM3	83
Tabela 7:	ANOVA dos tratamentos de transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 650 cm^{-1}	83
Tabela 8:	Média de transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 650 cm^{-1}	84
Tabela 9:	ANOVA dos tratamentos de transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 2400 cm^{-1}	84
Tabela 10:	Média de transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 2400 cm^{-1}	85
Tabela 11:	ANOVA dos tratamentos de transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 4000 cm^{-1}	85
Tabela 12:	Média de transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 4000 cm^{-1}	86

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1:	Fórmula para o cálculo do teor de cinzas.....	45
------------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA – Carvão Ativado

GEE – Gases de Efeito Estufa

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

HC – Hidrocarbonetos

SO_x – Óxidos de Enxofre

MP10 – Partículas Inaláveis

MtCO_{2e} – Milhões de toneladas de CO₂ equivalentes

COP-21 – Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

TGA – Análise Termogravimétrica

DSC – Análise Térmica Diferencial

EDX – Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia

IRS – Espectroscopia de Infravermelho

PU – Poliuretano

CFC's – Clorofluorcarbonos

N₂ – Gás Nitrogênio

O₂ – Gás Oxigênio

Ar – Gás Argônio

H₂O – Água

CH₄ – Metano

N₂O – Óxido Nitroso

CCS – Carbon Capture and Storage

SENATRAN – Secretaria Nacional de Trânsito

MMMs – Membranas de Matriz Mista

MOF's – Metal-Organic Frameworks

LMC – Laboratório de Materiais Compósitos

CRTI – Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação

UFG – Universidade Federal de Goiás

UFT – Universidade Federal do Tocantins

MR – Massa do Recipiente

MCS – Massa do Carvão Seco

MCR – Massa do Recipiente contendo Cinzas calcinadas

DTA – Análise Térmica Diferencial

TMA – Análise Termomecânica

DIL – Análise Dilatométrica

DMA – Análise Dinamomecânica

TPP – Laser Light Flash Analysis

AM – Amostra

AM1 – Amostra 1

AM2 – Amostra 2

AM3 – Amostra 3

LAPEQ – Laboratório de Química Ambiental e Biocombustível

ANOVA – Análise de Variância

DIC – Delineamento Experimental Inteiramente Casualizado

LISTA DE SÍMBOLOS

tC/TJ – toneladas de Carbono por Terajoule

% cinza – porcentagem em cinzas

g – gramas

mm – milímetros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	Potencial dos rejeitos agroenergéticos	21
3.2	O CO₂ como agente poluidor	23
3.3	Tecnologias de captura de CO₂	25
3.4	Métodos de separação de CO₂	26
3.4.1	Filtros e membranas de separação	27
3.4.2	Separação criogênica	30
3.4.3	Absorção	30
3.4.4	Adsorção	31
3.5	Membranas de captura de CO₂: desafios e perspectivas futuras	32
3.6	Membranas compósita produzida – caracterização dos constituintes.	33
3.6.1	Macaúba	33
3.6.2	Matriz polimérica: poliuretano	35
4	METODOLOGIA	37
4.1	Produção de carvão ativado a partir do endocarpo da macaúba	40
4.2	Caracterização física e química do carvão ativado da macaúba	44
4.2.1	Teor de Cinzas	45
4.2.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	46
4.2.3	Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Térmica Diferencial (DSC).	46
4.2.4	Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia (EDX)	47

4.3	Obtenção do material compósito	48
4.4	Caracterização física do material compósito obtido pela combinação do carvão ativado e o poliuretano	51
4.4.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	51
4.5	Caracterização química do material compósito obtido pela combinação do carvão ativado e o poliuretano	52
4.5.1	Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	52
4.5.2	Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia (EDX)	52
4.6	Verificação da funcionalidade do filtro compósito confeccionado	52
4.7	Avaliação de retenção do dióxido de carbono (CO₂) no material compósito produzido	54
4.7.1	Espectroscopia do Infravermelho (IRS)	54
4.8	Análise estatística	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	Carvão ativado obtido	56
5.2	Caracterização física e química do carvão ativado da macaúba	56
5.2.1	Teor de Cinzas	56
5.2.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	56
5.2.3	Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Térmica Diferencial (DSC)	58
5.2.4	Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia (EDX)	59
5.3	Material Compósito obtido	60
5.4	Caracterização física do material compósito obtido pelo carvão ativado do resíduo e o poliuretano	62
5.4.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	62
5.5	Caracterização química do material compósito obtido pela combinação do carvão ativado e o poliuretano	66
5.5.1	Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	66
5.5.2	Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia (EDX)	68

5.6	Verificação da funcionalidade do filtro compósito confeccionado	72
5.7	Avaliação da taxa de retenção do dióxido de carbono (CO₂) no material compósito produzido	72
5.7.1	Espectroscopia do Infravermelho (IRS)	75
5.8	Análise estatística	83
6	CONCLUSÃO	87
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
8	REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e o crescimento econômico da sociedade estão intrinsecamente relacionados ao consumo energético. Por anos, a energia canalizada para trabalhos árduos era realizada pela força muscular e o progresso associado a utilização de recursos energéticos como água, vento, sol, combustíveis fósseis e urânio libertou o homem deste ofício (OSHITA, 2019).

Atualmente a matriz energética mundial é subordinada a combustão dos combustíveis fósseis. Dados do Balanço Energético Nacional mostram que em 2021 o Brasil produziu diariamente a média de 2,9 milhões de barris de petróleo e em relação ao consumo o setor de transporte foi responsável pelo uso de 71% do total da demanda energética provinda do óleo diesel fóssil (EPE, 2022).

A reação de queima, completa ou incompleta, dos combustíveis fósseis gera como produto gases de efeito estufa (GEE), que ficam retidos na atmosfera, destacando-se: óxidos de carbono (CO e CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), dentre os quais estão alguns considerados cancerígenos, óxidos de enxofre (SO_x), partículas inaláveis (MP10), entre outras substâncias (DRUMM *et al*, 2014).

O efeito estufa é um fenômeno natural que consiste em uma camada de gases que permitem a passagem de 50% dos raios solares que incidem no planeta aquecendo-o durante o dia e retendo o calor durante a noite (DOS SANTOS *et al*, 2021), controlando assim a temperatura global em níveis aceitáveis garantindo o desenvolvimento da vida na Terra. Contudo nas últimas décadas o aumento considerável de emissões dos GEE, devido as ações antropológicas, tem provocado consideráveis alterações ambientais e desencadeado um cenário de extrema preocupação nos setores sociais.

O CO₂ se qualifica como protagonista causador do aquecimento global pois representa 60% dessas emissões e permanece por mais de 100 anos na atmosfera (SILVA *et al*, 2019). Segundo Lan *et al*. (2023) em dezembro do ano de 2022 a concentração média mensal global de CO₂ foi de 418,82 partes por milhão (ppm) registrando um aumento de 2,2 ppm comparado ao mesmo mês do ano anterior.

A China, os Estados Unidos e a União Europeia configuram as três maiores nações emissoras de CO₂ do mundo contribuindo com 42,6% dos desprendimentos. O Brasil emitiu no último ano 1057,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalentes (MtCO_{2e}), este índice figura-o no ranking dos dez maiores emissores que juntos são responsáveis por dois terços das emissões mundiais de GEE (FRIEDRICH, 2023).

Como o objetivo de estabilizar o sistema climático global e conter o aquecimento da temperatura do planeta o regime internacional de mudanças climáticas foi criado há 24 anos para promover a compreensão e a cooperação entre os 195 países signatários (REI *et al*, 2017). Em dezembro de 2015, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP-21), o Acordo de Paris foi aprovado e no ano seguinte após a adesão de grande parte das nações incluindo o Brasil, entrou em vigor.

Substituto do Protocolo de Kyoto, o acordo tem a meta de conter o aumento da temperatura global média do planeta abaixo de 2°C e empenhar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos da mudança climática (SOUZA, 2017).

Segundo Peixer *et al.* (2019) o Brasil tem como foco reduzir até 2025 as emissões dos GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005 com contribuição indicativa subsequente de reduzir em 43% abaixo dos níveis de 2005 em 2030. Para tal fim espera-se que até 2030 a matriz energética do país seja reestruturada, aumentando a participação das energias renováveis para um percentual de 45% evidenciando investimentos em bioenergia sustentável, restabelecendo e reflorestando 12 milhões de hectares de florestas.

Entende-se que as condições econômicas atuais viabilizam a bioenergia como elemento significativo frente ao desenvolvimento do agronegócio. Destaca-se então a preocupação constante do reaproveitamento dos resíduos agroenergéticos, intensificando os estudos e as pesquisas para o uso deles na produção e comercialização de materiais baseados em constituintes de origem natural (TAKADA, 2014).

Neste sentido, materiais compósitos constituídos por resíduos ecológicos e renováveis estão atraindo cada vez mais interesse considerando suas perspectivas econômicas e ambientais, já que eles buscam substituir materiais convencionais sintéticos cuja produção libera GEE (FIGUEIREDO, 2020).

Diante do exposto o presente trabalho tem como objetivo produzir uma membrana compósita utilizando o carvão ativado proveniente do endocarpo da macaúba associado a uma matriz polimérica de poliuretano (PU) visando a confecção de um filtro capaz de reter o dióxido de carbono.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Obter e caracterizar um material compósito poroso a partir de resíduos agroenergéticos do endocarpo da Macaúba com a finalidade de reter o dióxido de carbono das emissões resultantes da queima de combustíveis fósseis.

2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar física e quimicamente a matéria prima proveniente dos resíduos do endocarpo da macaúba;
- b) Produzir a partir dos resíduos da macaúba (endocarpo) um carvão ativado e caracterizá-lo microestruturalmente pelos métodos de: teor de cinzas, microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise termogravimétrica (TGA), análise térmica diferencial (DSC) e espectroscopia de raio X por dispersão de energia (EDX).
- c) Obter o material compósito utilizando Poliuretano com concentração fixa;
- d) Caracterizar física e quimicamente o material compósito obtido pela junção do carvão ativo do endocarpo da macaúba e poliuretano, pelos métodos de: MEV, TGA, DSC e EDX.
- e) Avaliar a taxa de retenção do dióxido de carbono (CO₂) a partir do material compósito produzido por espectroscopia de infravermelho (IRS).

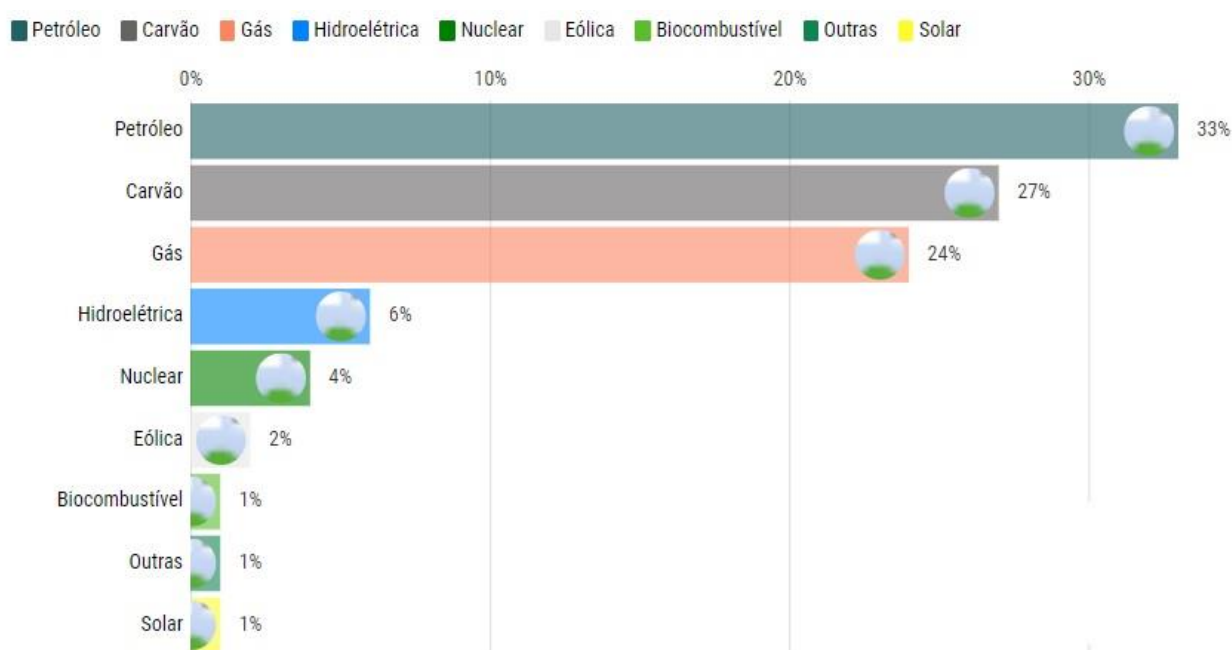
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Potencial dos resíduos Agroenergéticos

A história de evolução da humanidade está atrelada ao uso da energia. Para o homem primitivo as fontes energéticas estavam ligadas a força humana e aos nutrientes consumidos diariamente por meio da alimentação. Já para o homem moderno a dependência energética tornou-se essencial para sua sobrevivência permeando atividades como transporte, iluminação, aquecimento, comunicação e resfriamento.

Para suprir toda essa demanda energética cada país dispõe de uma matriz, isto é, recursos energéticos quantitativos utilizados nos diversos setores produtivos. Mundialmente a matriz energética, em termos percentuais, é composta basicamente por 84% de fontes não-renováveis, sendo o petróleo, carvão-mineral e gás natural grandes produtores de gases de efeito estufa (GEE) (figura 1).

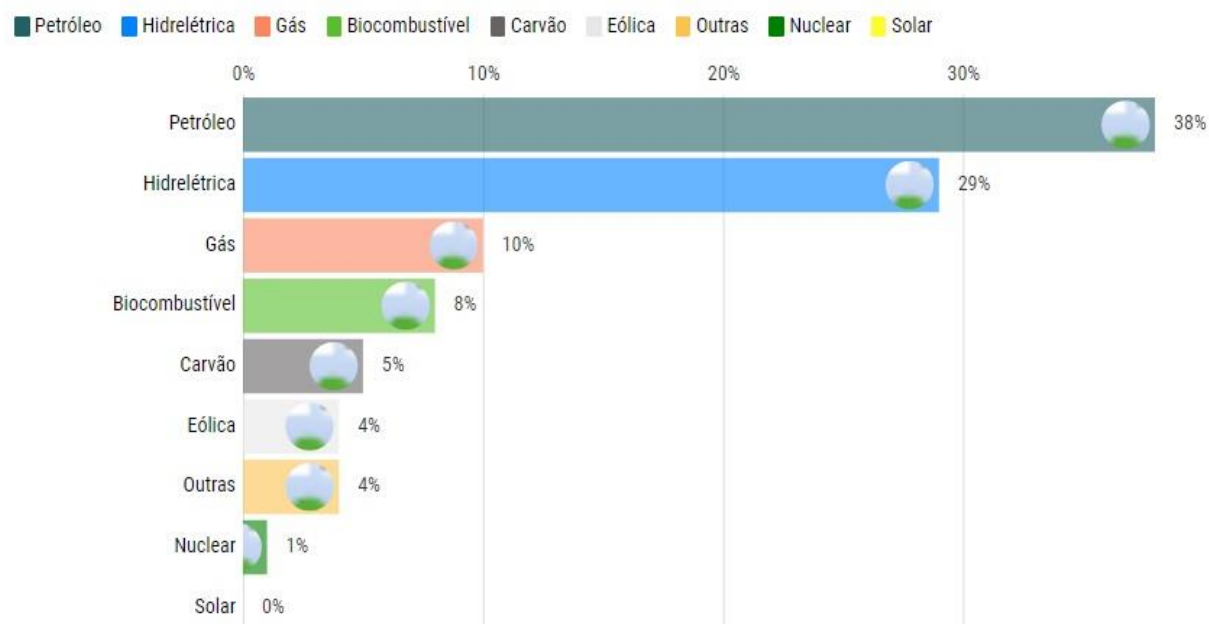
Figura 1: Matriz Energética Mundial. Participação por fonte (%)



Fonte: FGV ENERGIA, 2020.

No caso do Brasil sua matriz, segundo a FGV ENERGIA (2020), é uma das matrizes energéticas mais limpas do planeta pois desde a década de 70 investe em energia renovável o que resulta em aproximadamente 43% de energia produzida por fontes limpas (figura 2).

Figura 2: Matriz Energética Brasileira. Participação por fonte (%)



Fonte: FGV ENERGIA, 2020.

A demanda energética provinda de combustíveis fósseis em conjunto com as alterações ambientais e climáticas ocasionam grandes preocupações sobre o futuro energético da humanidade. A solução para estes problemas se encontra nas energias renováveis e a biomassa tem despertado interesse para fins energéticos, em virtude de seu grande potencial de aproveitamento (EVARISTO *et al*, 2019).

A biomassa, vista como uma fonte de energia primária, consiste em matéria orgânica de origem animal e vegetal que contém energia armazenada na forma de energia química (EPE, 2022). Dentre suas vantagens destaca-se o fato de ser uma fonte sustentável, devido ao baixo nível de emissões de CO₂ na atmosfera, contribui para a geração de empregos e influência na redução do êxodo rural (DE MIRANDA, 2019).

Levando em consideração a origem, os resíduos da biomassa podem ser classificados em urbanos, florestais e agrícolas, sendo o último o de maior potencial energético. Resíduos de origem agrícolas provêm de culturas e do beneficiamento de cultivos como soja, milho, arroz, cana de açúcar, destacando-se as palhas, cascas de frutos, bagaço, sabugo, ramas, podas de árvores, entre outros, podendo estes serem encaminhados para locais que recebem resíduos comuns ou serem reaproveitados para cogeração de energia (ALMEIDA, 2017).

A soja, por exemplo, no seu processo de pré-limpeza gera a casca que é utilizada como ingrediente nutricional agregando valor energético a dieta alimentar animal. A queima direta

da casca de arroz produz energia elétrica em termelétricas. O bagaço da cana pode ser utilizado na produção de ração animal, na fabricação de papel e quando queimado nas caldeiras, gera vapor d'água, energia que pode ser convertida para a própria usina.

Diante de todos os benefícios evidenciados as projeções futuras indicam que a biomassa até o final do século XXI será responsável pela produção de 10 a 20% de toda a energia (GOLDEMBERG, 2009) utilizada no planeta, tornando-se uma alternativa viável para a diversificação da matriz energética mundial e consequentemente contribui para a redução do uso de combustíveis fósseis (CARDOSO, 2012).

3.2 O CO₂ como agente poluidor

O desenvolvimento da nossa sociedade está atrelado a mudanças abruptas e radicais caracterizando uma “revolução”. Cronologicamente, a primeira revolução com impacto significativo nas estruturas sociais foi a revolução agrícola no qual a domesticação dos animais associada a força humana aumentou a produção e a distribuição dos alimentos o que permitiu o crescimento da população e desencadeou a urbanização e a formação das cidades.

Em meados do século XVIII a primeira revolução industrial foi marcada pela construção das ferrovias e pela invenção da máquina a vapor dando início à produção mecânica. No final do século XIX e início do século XX a segunda revolução industrial possibilitou a produção em massa, facilitada pelo surgimento da eletricidade e da linha de montagem. A invenção dos computadores e da internet, com início em 1960, caracterizou a revolução digital (terceira revolução industrial) e com a virada do século tem-se a quarta revolução industrial com uma internet ubíqua e móvel, sensores menores e mais poderosos, inteligência artificial e aprendizagem automática (SCHWAB, 2019).

Tais revoluções aliadas ao aumento do poder aquisitivo da população implicaram no aumento do consumo de energia e consequentemente na emissão de poluentes na atmosfera. Estes agentes alteram a composição e o equilíbrio do meio, podendo causar impactos graves a saúde humana, a vida vegetal e animal, assim como a degradação de bens culturais de lazer e de recursos naturais (TORRES, 2020).

Dentre os bens e serviços que contribuem para a liberação de contaminantes na atmosfera podemos citar o setor de transporte e o industrial que ao iniciarem o processo de queima dos combustíveis fósseis, seja para a produção de eletricidade, locomoção ou aquecimento, contribuem para o aumento significativo de emissões de dióxido de carbono

(CO₂), monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), óxido de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e hidrocarbonetos (LEITE, 2020).

Estes gases associados ao metano, óxido nitroso, vapor de água e clorofluorcarbonos (CFC's) constituem os gases de efeito estufa (GEE). Retidos na atmosfera tais gases absorvem parte da radiação infravermelha, que deveria ser refletida para o espaço, resultando no aumento da temperatura do planeta ocasionando impactos climáticos de longo prazo afetando consequentemente os sistemas naturais.

Dentre todos os GEE o gás carbônico apesar de não ser o mais nocivo e ser caracterizado como incolor e inodoro é visto como um dos vilões pois representa 81% das emissões gasosas (Leite,2020) e permanece por centenas de anos na atmosfera evidenciando sua capacidade de absorver e emitir a energia solar (DIOGENES, 2016).

O ano de 2020, marcado pela pandemia de Covid-19, resultou numa paralização da economia mundial e consequentemente houve uma redução de quase 7% das emissões globais de GEE. Na contramão deste índice o Brasil apresentou um aumento de 9,5% de gases emitidos, dos quais 2,16 bilhões de toneladas eram de CO₂ equivalente (GtCO_{2e}) destacando-se a mudança do uso da terra (desmatamento de biomas) como principal agente emissor sendo responsável por 998 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO_{2e}) do total bruto . O setor de energia apresentou uma redução de 4,6% totalizando aproximadamente 394 MtCO_{2e} regredindo o desprendimento gasoso as taxas evidenciadas em 2011 (POTENZA, 2021).

A quantidade de CO₂ emitido pelos automóveis é proporcional a quantidade de combustível utilizada (BARROSO, 2014). São Paulo, considerado o estado brasileiro com a maior população, desenvolvimento econômico e industrial, no último ano atingiu 45,14 milhões de residentes (FUNDAÇÃO SEADE, 2022) o que nos leva a concluir que sua frota veicular é a maior do país. Assim sendo, apresenta elevadas taxas de CO₂ como agente poluidor degradando o ar e submetendo o meio ambiente a mudanças climáticas e efeitos prejudiciais à saúde humana, animal, vegetal, corpos d'água, solos e diversos materiais (SAN MARTIN, 2020).

Ações de mitigação que buscam a redução das emissões de CO₂ se fazem necessárias. Os dados apresentados mostram que mesmo com o isolamento social e com as restrições impostas pela pandemia o Brasil ficou mais pobre e poluiu mais (POTENZA, 2021).

3.3 Tecnologias de captura de CO₂

A temperatura de um planeta é definida pela sua distância em relação ao Sol, sua atmosfera e sua composição, e no caso da Terra considera-se a biosfera, pois esta é responsável por regular a composição química do ar.

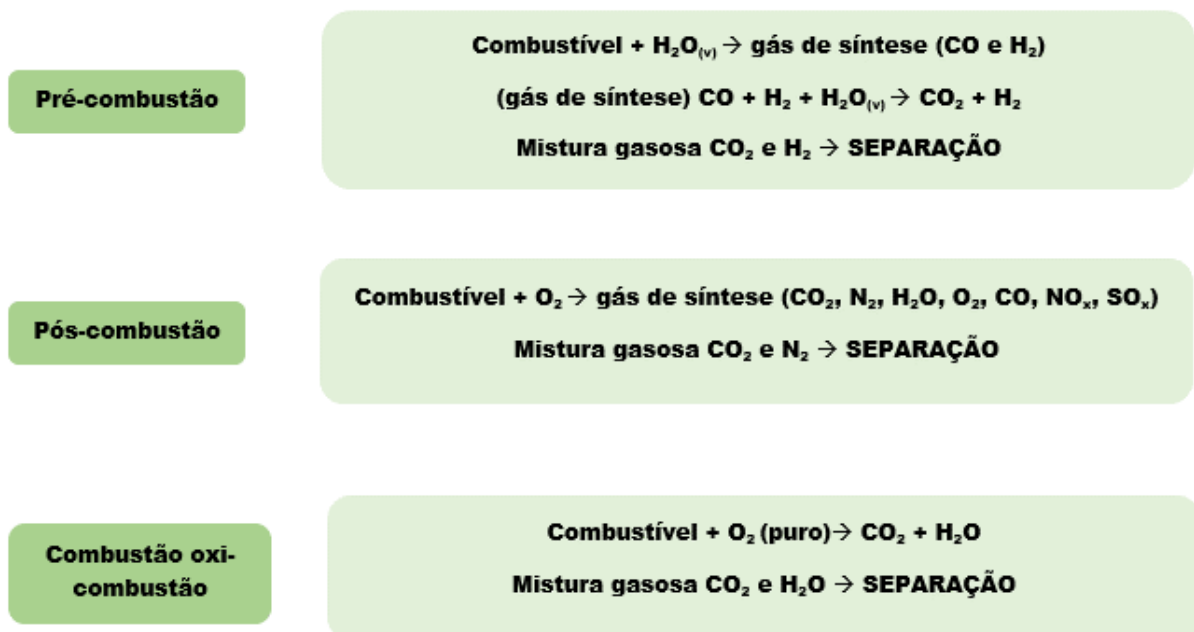
Quimicamente a atmosfera terrestre é constituída por 78% de gás nitrogênio (N₂), 21% de gás oxigênio (O₂), 0,9% de gás argônio (Ar) e gases de efeito estufa (Junges, 2018) como vapor d'água (H₂O), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e com 0,037% tem-se o dióxido de carbono (CO₂).

Ainda que em baixa concentração o CO₂ associado aos demais GEE elevam a temperatura do planeta ocasionando o temível aquecimento global. Diante disto há um consenso mundial em reduzir as emissões do GEE em especial o CO₂. Dantas (2009) sugere dentre as diversas ações mitigadoras já existentes reduzir o consumo de energia, substituir os combustíveis fósseis pelos de menor teor de carbono (gás natural, biodiesel), ampliar o uso de fontes renováveis ou nuclear e remover o gás carbônico da atmosfera.

Dentre as sugestões a que tem apresentado um aumento progressivo e considerável é o desenvolvimento de novas tecnologias destinadas a captura, separação e armazenamento do dióxido de carbono (Carbon Capture and Storage - CCS) na qual o CO₂ é sequestrado por meios onerosos e com resultados efetivos.

Atualmente a captura de CO₂ pode ser realizada por meio de três tecnologias diferentes conhecidas por pré-combustão, pós-combustão e combustão oxi-combustão (figura 3):

Figura 3: Tecnologias de captura de CO₂



Fonte: autor.

- i. Pré-combustão: processo que ocorre antes da queima do combustível e consiste na formação de um gás de síntese pela reação do combustível com vapor d'água ou oxigênio. Este gás de síntese, formado por uma mistura de CO (monóxido de carbono) e H₂ (gás hidrogênio), é submetido a um tratamento com vapor d'água resultando em CO₂ e H₂. O gás hidrogênio pode ser utilizado como combustível para produzir energia e o CO₂, após ser separado da mistura, pode ser enviado para unidades de compressão (FRAGÃO, 2015).
- ii. Pós-combustão: sistemas de captura aplicados em gases provindos da combustão de um combustível. Neste tipo de processo o gás de exaustão é formado por uma mistura gasosa constituída por N₂ (78%), CO₂ (15%) e H₂O, O₂, CO, NO_x e SO_x em quantidades irrisórias. A separação entre os gases é basicamente feita entre o gás nitrogênio e o gás carbônico e para isto deve-se utilizar materiais altamente seletivos ao CO₂ e baixas pressões (RONCONI, 2014).
- iii. Combustão oxí-combustão: nesta técnica o combustível é queimado na presença de gás oxigênio (O₂) praticamente puro e não utilizando como comburente o ar atmosférico. Desta transformação química obtêm-se uma mistura gasosa de basicamente água e CO₂ com alto grau de pureza facilitando seu sequestro (CASTANHO, 2019).

A definição da tecnologia de captura a ser utilizada está condicionada a fatores como: natureza do processo industrial, a composição química da mistura gasosa, a quantidade de CO₂ presentes na mistura e as condições físicas do meio à qual se encontra.

3.4 Métodos de separação de CO₂

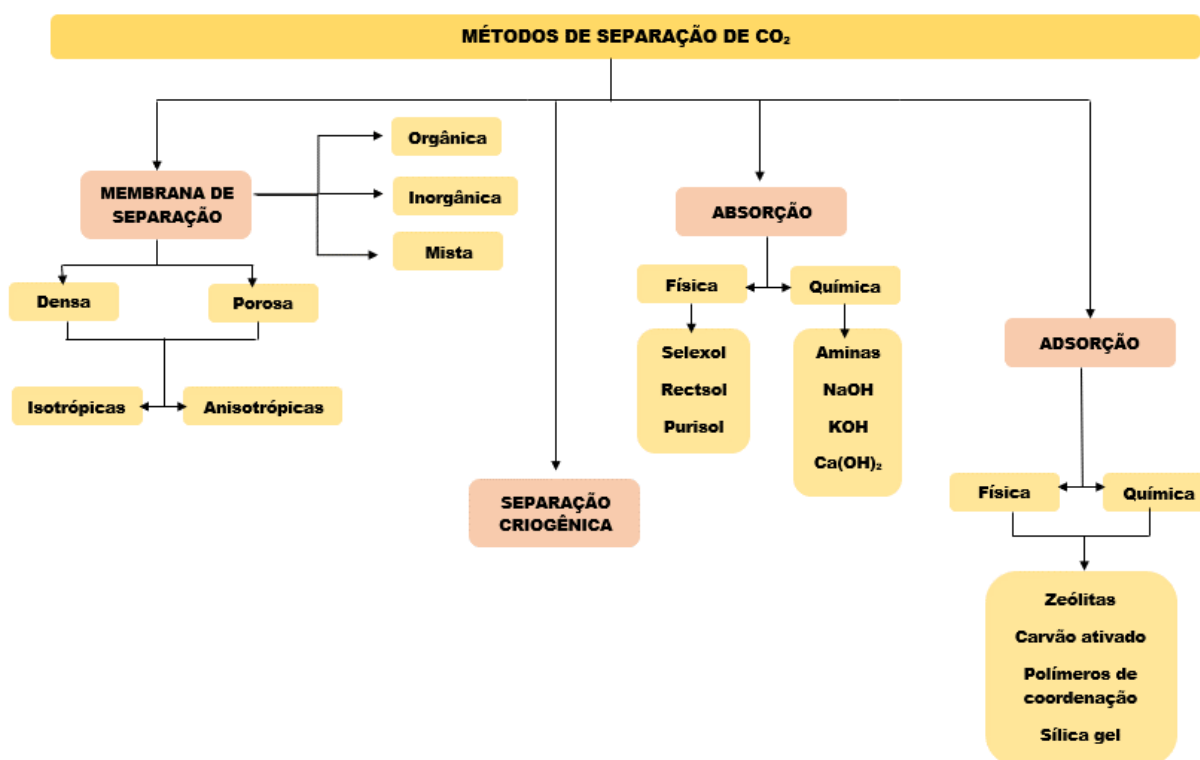
O dióxido de carbono é gerado por fontes naturais e antrópicas, sendo a última subdividida em fontes fixas como os polos industriais ou fontes móveis como os meios de locomoção. A presença deste gás na atmosfera do planeta ocasiona alterações climáticas que culminam no aumento da temperatura global, resultando em um desequilíbrio ambiental com impactos consideráveis principalmente na composição da fauna e flora e no aumento do nível do mar em virtude do derretimento das geleiras.

Diante da demanda energética exigida atualmente pela sociedade e considerando o fato de que os combustíveis fósseis são fontes indispensáveis que constituem a base da matriz

energética mundial faz-se necessário o uso de métodos de separação como o primeiro passo de um projeto de CCS.

A seguir será exposto as principais concepções, eficácia e ineficácia dos principais mecanismo de separação do CO₂ (figura 4). Vale ressaltar que para a escolha do procedimento adequado é necessário analisar as características do fluxo de gás da combustão (NASCIMENTO, 2014).

Figura 4: Mecanismos de separação de CO₂



Fonte: autor.

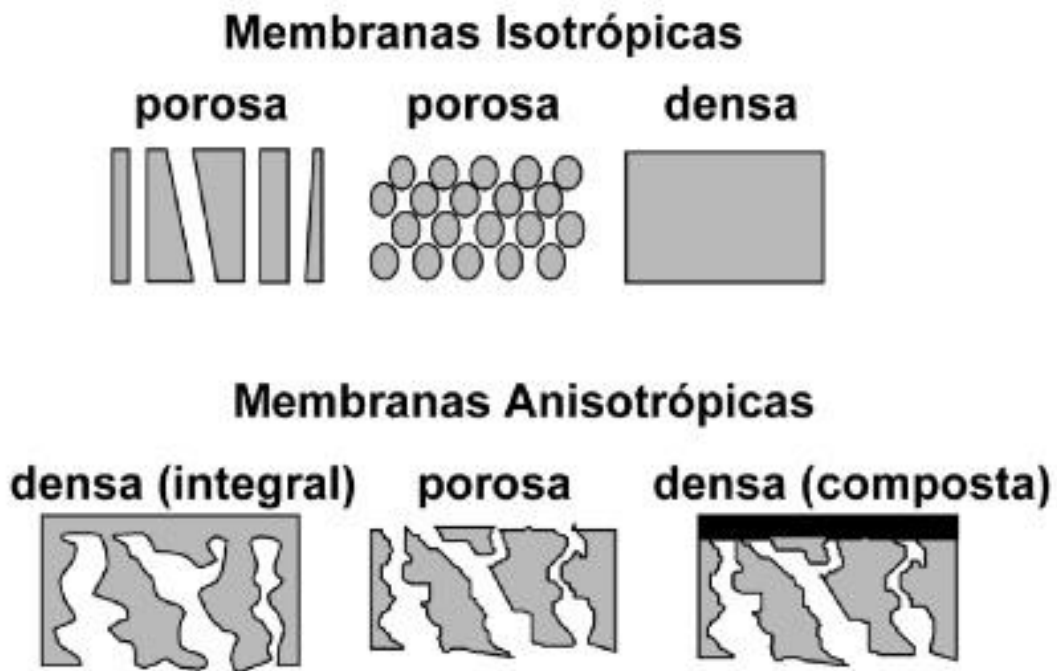
3.4.1 Filtros e Membranas de Separação

Considerado um método alternativo e bem difundido, as membranas de separação consistem em barreiras seletivas sintéticas e semipermeáveis com a função de reter certos gases. Morfologicamente são classificadas como: densas e porosas, podendo ser isotrópicas e/ou anisotrópicas.

Membranas isotrópicas são simétricas e apresentam as mesmas características morfológicas ao longo de seu corpo. Entretanto membranas anisotrópicas (assimétricas) são recobertas por uma fina camada densa superficial “pele” (FRANCO, 2021). Caso a “pele” e o

restante do corpo da membrana possui o mesmo material tem-se a membrana integral, todavia se a camada densa for feita de material diferente a membrana é denominada composta. A figura 5 permite visualizar a seção transversal dos diferentes tipos de morfologia desses tipos de membranas.

Figura 5 – Representação esquemática da seção transversal dos diferentes tipos de morfologia de membranas sintéticas



Fonte: Harbet *et.al*, 2006.

Em relação a composição química, as membranas são classificadas em: inorgânicas, orgânicas e matriz mista. O quadro 1 apresenta a descrição dos materiais que as constituem bem como suas principais características.

Quadro 1: Composição e características das membranas inorgânicas, orgânicas e de matriz mista

TIPO DE MEMBRANA	MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	FONTE
<i>Inorgânicas</i>	zéolitos, carbono, sílica, material cerâmico e metais	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam boa resistência térmica e química; 	Nabais, 2016.

		<ul style="list-style-type: none"> • Altamente seletivas (principalmente as Zeólitas); • Desvantagens: baixa resistência mecânica e custos muito altos. 	
<i>Orgânicas</i>	polímeros	<ul style="list-style-type: none"> • Geralmente são membranas densas; • Gás permeado segue o mecanismo solução-difusão; • Baixo custo; • Podem ser produzidas em larga escala; • Boa resistência mecânica; • Categorias: vítreas e borrachas; • Desvantagens: baixa seletividade e baixa estabilidade térmica. 	Costa, 2016. Fragão, 2015. Nabais, 2016.
<i>Matriz mista</i>	Combinação de polímeros orgânicos e materiais inorgânicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Combinam benefícios dos polímeros (fácil processamento, baixo custo e boas propriedades mecânicas) com dos materiais inorgânicos (elevada taxa de separação de gases); • Os polímeros constituem fase contínua; O material inorgânico a fase dispersa; 	Fragão, 2015.

		<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam estabilidade térmica, química e mecânica; • Bom desempenho econômico. 	
--	--	---	--

Fonte: autor.

A análise do desempenho da membrana é determinada pelo gradiente de concentração e ou diferenças de pressão (FRAGÃO, 2015). Suas propriedades físicas e químicas associadas as interações entre os componentes e a membrana definem sua funcionalidade.

Dentre as vantagens destaca-se a possibilidade de serem usadas em processos de pré-combustão ou pós-combustão, custo zero relativo ao uso de agentes de separação e de agentes que promovem mudanças de fase (FREITAS, 2019), sistema compacto, a possibilidade de operação em multi-estágios e o baixo custo de manutenção (DANTAS, 2009). Em contrapartida este procedimento, para processos em larga escala, requer um alto consumo de energia além do que o uso contínuo das membranas resulta na perda da permeabilidade evidenciando um tempo de meia vida curto (RONCONI, 2014), surge então a necessidade de pesquisas que tornem este método economicamente viável.

3.4.2 Separação criogênica

Neste processo a mistura gasosa é resfriada a temperaturas muito baixas, cerca de -185°C (DANTAS,2009), logo em seguida o CO₂ é condensado e separado. Financeiramente é considerado inviável pois demanda um gasto alto com energia para atingir a temperatura exigida, por outro lado o CO₂ recolhido se encontra pronto para ser transportado em tubulações e nenhum material químico, absorvente e elevadas pressões são utilizados o que evita etapas de pré e pós-tratamento (FREITAS,2019).

3.4.3 Absorção

Técnica de separação baseada na transferência de massa entre fases. Os gases de exaustão são submetidos a uma coluna de absorção e o dióxido de carbono (o componente de interesse) é então transferido para um absorvedor líquido, já os demais gases são descartados.

A solução final passa por uma etapa de recuperação onde o solvente é regenerado ou esgotado e o soluto, o CO₂, é recolhido em quase toda sua totalidade.

A absorção pode ser classificada em: física ou química. Na absorção física o componente de determinada corrente gasosa possui solubilidade na solução absorvedora, porém não ocorre reação química (MARTINS, 2021). As condições experimentais exigem altas pressões e baixas temperaturas e os principais solventes utilizados são dimetiléter de polietileno glicol (Selexol), metanol frio (Rectsol) e n-metil-2-pirolidona (Purisol) (WONG & BIOLETI, 2002). Em contrapartida os processos de absorção química podem ser reversíveis ou irreversíveis e utilizam solventes de natureza reativa com o componente gasoso que se deseja absorver (BIANCHINI, 2018), estes solventes líquidos apresentam caráter alcalino destacando-se as aminas, hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂).

A transferência de massa depende das condições termodinâmicas do processo e a velocidade de absorção é definida pelas condições físico-químicas dentre elas a solubilidade, difusividade, cinética da reação, viscosidade, densidade do líquido e pelas condições hidrodinâmicas do sistema como geometria do equipamento e vazão do fluído (SEADER *et.al*, 2011).

3.4.4 Adsorção

Envolvendo superfícies sólidas denominadas adsorventes este processo ocorre em duas etapas: a adsorção e a dessorção. Basicamente consiste na infiltração de moléculas ou íons, presentes na fase fluida (adsorvato), na superfície de um material sólido por meio de interações intermoleculares entre os envolvidos.

A natureza das forças intermoleculares definirá o tipo de adsorção. Interações do tipo dispersões de London, Ligação de Hidrogênio, Dipolo-dipolo e Íon-dipolo resultam na adsorção física. Essas forças são fracas e eletrostáticas por natureza, envolvendo atrações entre espécies positivas e negativas (NASCIMENTO, 2014). A quimissorção envolve a formação de ligações químicas (iônica ou covalente) entre as valências livres do sólido e do adsorvato (DANTAS, 2009).

Zeólitas, carvão ativado, polímeros de coordenação e sílica gel são os adsorventes mais utilizados na captura do CO₂. A dessorção destes materiais depende da afinidade estabelecida entre o adsorvato e a superfície do sólido pois uma intensa interação resultará num gasto energético muito alto para a regeneração do sólido.

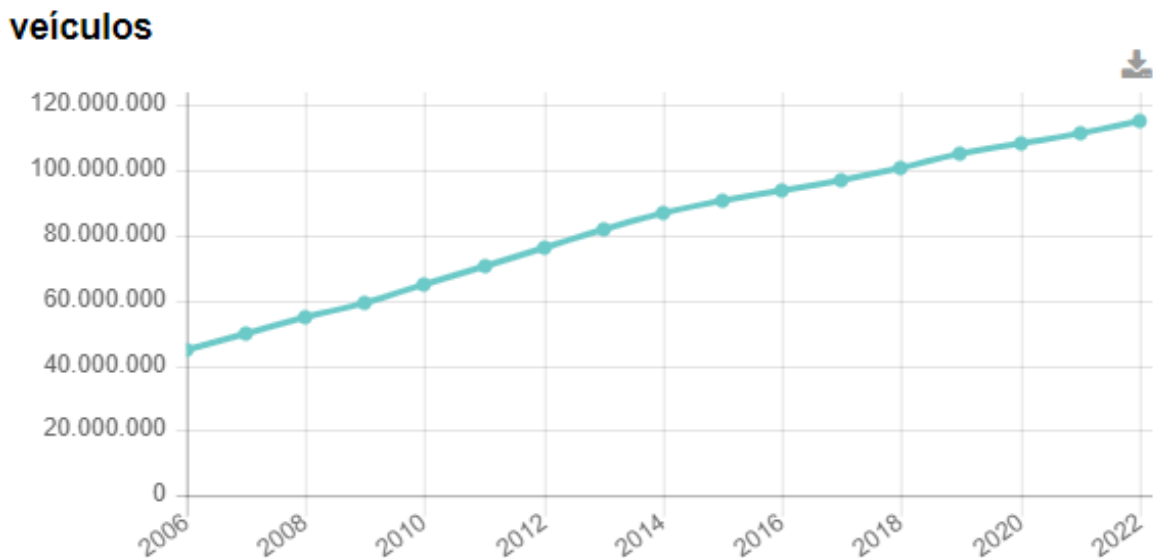
3.5 Membranas de captura de CO₂: desafios e perspectivas futuras.

Atividades humanas, indústrias e veículos emitem diariamente na atmosfera grandes quantidades de compostos químicos, sendo estes a maioria de natureza orgânica. Essa mistura de poluentes compõem os GEE, em especial o CO₂, e causam uma inquietação em relação aos impactos na saúde e no ambiente.

Usualmente o debate sobre ações mitigadoras para reduzir as emissões de CO₂ se concentram na substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis. Neto (2021) afirma que a queima dos combustíveis fósseis é responsável por apenas 19,78% do dióxido de carbono emitido.

A emissão deste gás pela frota veicular gera uma preocupação ambiental significativa. Dados do Ministério de Infraestrutura, SENATRAN - Secretaria Nacional de Trânsito – (2022), apontam que no Brasil há um total de 115.116.532 veículos (figura 6) e a quantidade de CO₂ emitida por estes dependem de vários fatores como: o combustível utilizado, a eficiência do motor do veículo, o padrão da condução e as práticas de revisões do automóvel.

Figura 6: Quantitativo de veículos no Brasil com o passar dos anos



Fonte: IBGE, 2022.

Ao analisar os combustíveis utilizados no setor de transporte rodoviário, observa-se um fator de emissão de carbono de 20,1 tC/TJ para o óleo diesel (IPCC, 2008), 18,9 tC/TJ para a gasolina (IPCC, 2008) e 14,81 tC/TJ para o álcool hidratado (MTC,2010). Isto indica que

quanto maior o fator de emissão de carbono maior é a quantidade de CO₂ emitida, logo o óleo diesel, dentre os citados, é o maior poluente.

Ante o exposto, um dos métodos de captura de CO₂ que vem sendo bastante investigado são as membranas de separação.

Martins (2017) obteve êxito ao confeccionar uma membrana de matriz mista (MMMs) utilizando a solução polimérica Matrimid®5218 e dois tipos de carvão, o CB N326 e CA Anguard®5, em concentrações diferentes alcançando resultados satisfatórios referente a permeação de CO₂ principalmente nas membranas com baixas percentagens de incorporação de carvão.

Outro tipo de membrana que está sendo colocada em evidência envolve a combinação de Metal-Organic Frameworks (MOFs), que são materiais com alto grau de adsorção de GEE por apresentarem inúmeros poros, e um polímero, sistema denominado MOF/polímero. Sodré (2022) sintetizou três membranas com a matriz polimérica de poliuretano e os MOFs UiO-66, UiO-66-NH₂ e MIL-53-Al. Todas estas apresentaram um desempenho significativo, podendo este ser atenuado alterando as variáveis como pressão e temperatura.

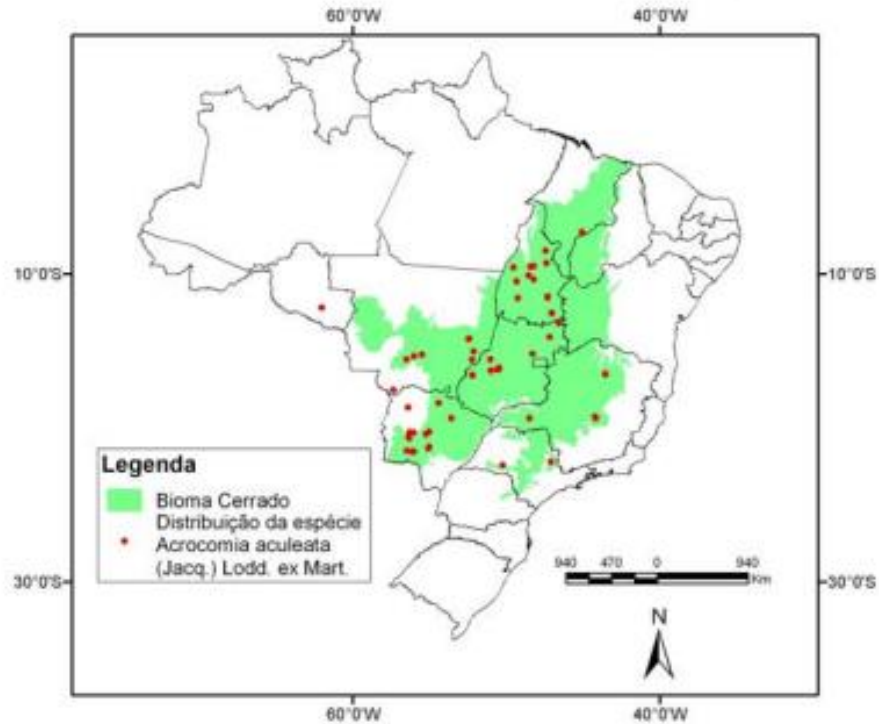
A purifica o de correntes gasosas demanda elevados gastos energéticos e financeiros e as membranas de separa o são vistas como uma alternativa viável para suprir essa demanda tanto industrial como automobilística, sendo necessário definir condi es de pressão e temperaturas adequadas bem como um bom material constituinte que seja seletivo e permita a permeabilidade do gás que se deseja obter.

3.6 Membrana compósita a ser produzida – caracteriza o dos constituintes

3.6.1 Macaúba

Palmeira arborescente e espinhosa a macaúba, de nome científico *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Martius,   uma árvore de até 25 metros de altura, pertencente à família Arecacea, nativas em florestas tropicais. Distribui-se geograficamente no Brasil nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, parte do Nordeste, sul do Pará, Paraná e Minas Gerais (figura 7), sendo o último estado evidenciado como a região de origem da palmeira (MOTTA *et al*, 2002).

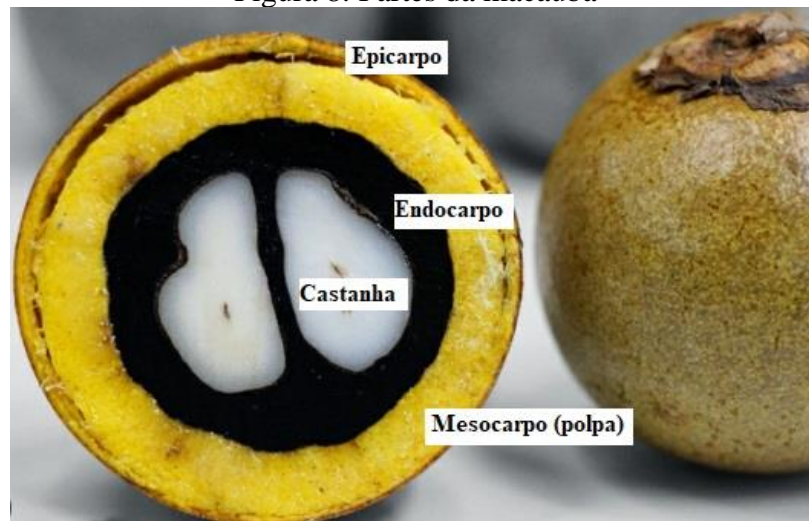
Figura 7: Distribuição espacial da espécie *Acrocomia aculeata* Jacq.) Lodd. ex Mart. em 53 localidades entre os 376 levantamentos realizados no Cerrado sentido amplo



Fonte: Ratter *et al* (2003).

Conhecida popularmente como bocaiúva, macaíba, coco-baboso, coco-de-espinho e chiclete-pantaneiro (MARQUES, 2021), este fruto (figura 8) é dividido em quatro partes, sendo estas: epicarpo (casca), mesocarpo (polpa), endocarpo e endosperma (castanha).

Figura 8: Partes da macaúba



Fonte: Portal da Macaúba

Após o processamento do fruto os resíduos gerados se tornam possíveis biocombustíveis de alta energia. A casca pode ser transformada em carvão vegetal e briquetes (RENCORET *et*

al., 2018), já a polpa e a castanha apresentam propriedades satisfatórias para a produção de biodiesel. Observa-se que para cada hectare plantado é possível produzir cerca de 1500 a 5000 kg de óleo (MANFIO *et al.*, 2011), sendo que óleo proveniente do mesocarpo apresenta um teor elevado de ácido oleico podendo substituir o azeite de oliva na nutrição humana e o óleo da amêndoa é constituído por ácidos graxos de cadeia curta, destacando-se a presença do ácido láurico, sendo utilizado na fabricação de sabão, sabonete, margarina e cosméticos em geral (MARQUES, 2021). As folhas que podem atingir cerca de 5 metros de comprimento são utilizadas na confecção de artesanatos, redes e linhas de pesca.

Recobrimo a castanha no fruto, o endocarpo é uma estrutura rígida, rica em carbono com alto poder calorífico podendo ser utilizado como combustível e carvão de excelente qualidade produzido após um processo de carbonização, apresentando como características ausência de enxofre, elevada densidade, desprezível teor de cinzas e controlável teor de carbono fixo e de matérias voláteis. Também pode ser utilizado como material de artesanato, na produção de concreto e confecção de botões (MOTA *et al.*, 2011).

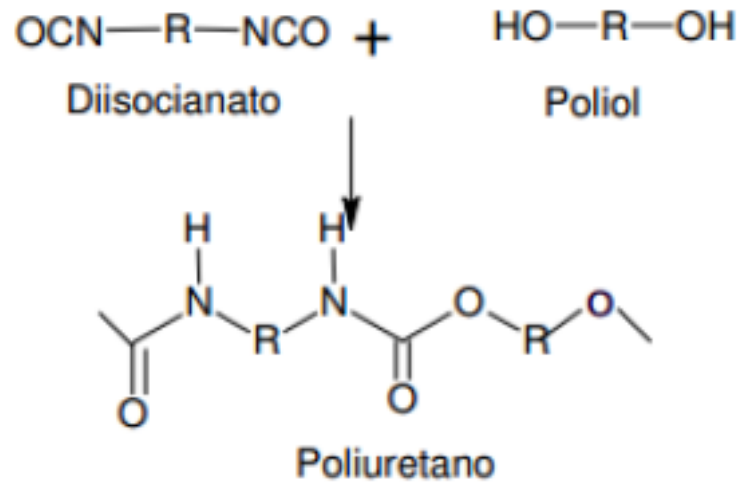
Diante de ampla utilidade evidencia-se o despertar do interesse socioeconômico no cultivar ressaltando-se ainda os benefícios ambientais como o sequestro de carbono e a recuperação de áreas deterioradas.

3.6.2 Matriz polimérica: Poliuretano

Em 1937 Otto Bayer e seus colaboradores sintetizaram os poliuretanos (PU) e a sua comercialização teve início ainda nesta década. Podem ser classificados em termoplásticos, termofixos e elastômeros, sendo também encontrados na forma de espumas rígidas, semirrígidas, flexíveis, tintas, adesivos, selantes e revestimentos (ARTIAGA, 2014).

Considerada uma classe de polímeros, o termo poliuretano se refere a um produto derivado da reação de policondensação entre um poliol (-OH) e poliisocianato (-N=C=O) (figura 9) com diversas peculiaridades físicas e químicas que os definem como uma classe mutável pois através de técnicas sintéticas adequadas pode-se obter ampla variedade de materiais para as mais diversas aplicações (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Figura 9: Reação de policondensação de formação do poliuretano



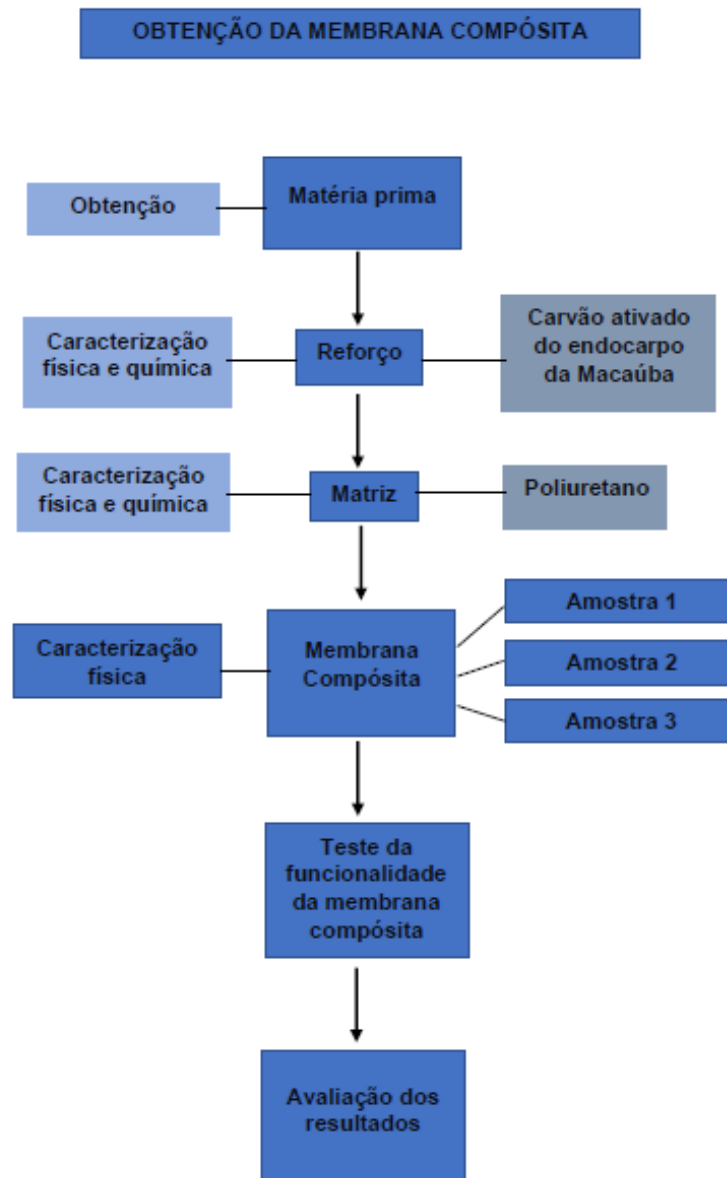
Fonte: Alimena, 2009.

Suas propriedades mecânicas aliada às físicas e químicas confere ao material tenacidade e flexibilidade em temperaturas baixas, resistência ao ataque de fungos, solventes, escoriações e a possível quebra de sua estrutura por moléculas de água. Diante disto os PU são empregados em diversos âmbitos da sociedade destacando-se a medicina, construção civil, setores automobilístico e industrial (FIORIO, 2011).

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho rotula-se como pesquisa aplicada, com interpelações qualitativas e quantitativas, objetivo metodológico descritivo e explicativo, constituído de procedimentos experimentais, no qual a pesquisadora desenvolveu um material compósito e realizou pesquisas científicas em periódicos nacionais e internacionais (Periódico Capes, *Science Direct*, Scopus, *Scielo*, entre outros) procurando assuntos associados ao carvão ativado da macaúba e membrana compósito adsorvente de gás carbônico. O fluxograma A (figura 10) apresenta um esboço geral da pesquisa.

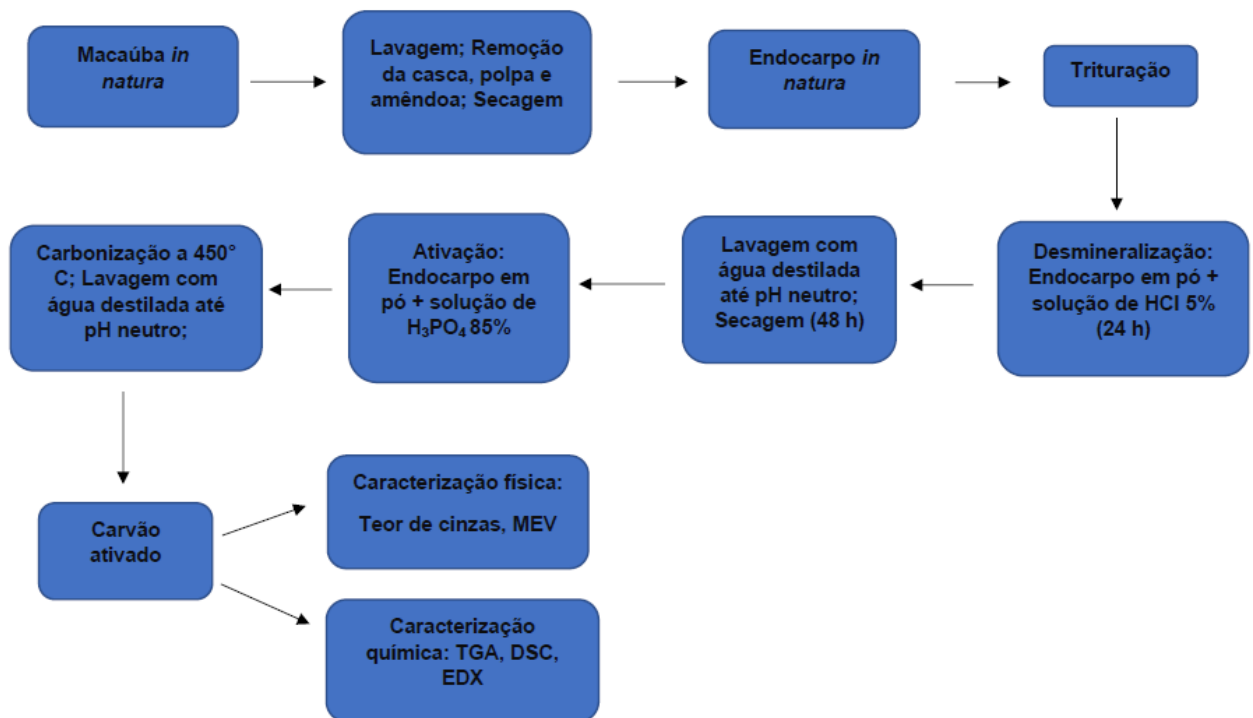
Figura 10: Fluxograma A – esboço geral da pesquisa



Fonte: Autores.

O endocarpo *in natura* foi obtido pelo processamento da macaúba, sendo triturado, purificado, ativado quimicamente e carbonizado resultando no carvão ativado. Este por sua vez foi misturado ao poliuretano e a membrana compósita obtida. Esta foi submetida a um teste de funcionalidade e caracterizada. O fluxograma B (figura 11) detalha o preparo do carvão ativado (CA).

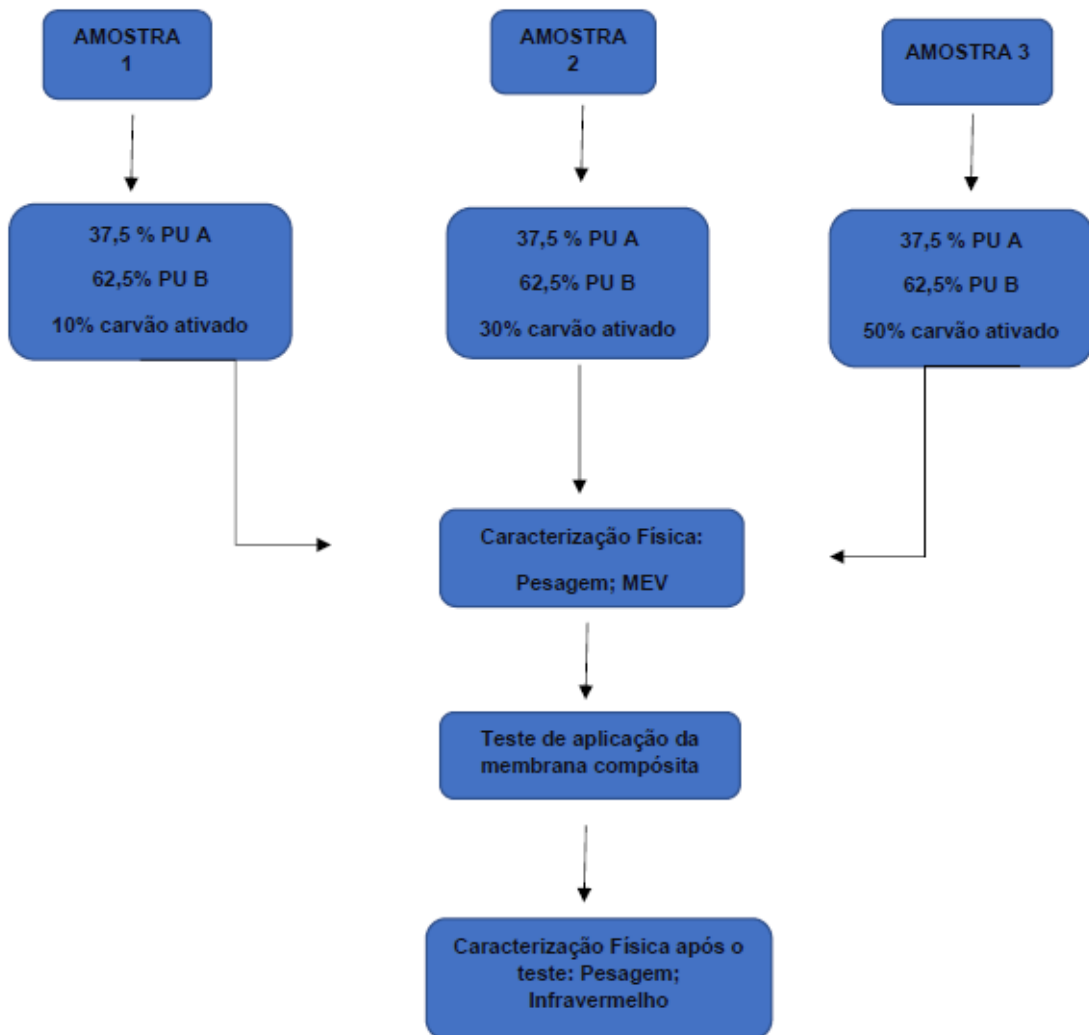
Figura 11: Fluxograma B – preparo do carvão ativado



Fonte: Autores.

Inicialmente foi feita a lavagem, remoção da casca, polpa e amêndoa da macaúba obtendo-se o endocarpo *in natura*. Este foi triturado e em seguida desmineralizado em solução de HCl 5% por 24 horas. Após este período, o mesmo, foi lavado com água destilada até que a solução de descarte apresentasse pH neutro. O endocarpo desmineralizado secou por 48 horas e então realizou-se a sua ativação com a solução de ácido fosfórico 85% sob agitação por 24 horas. Passado o período estimado, foi feita a carbonização do carvão a 450°C e depois do seu resfriamento sua lavagem conforme citada anteriormente. O carvão ativado obtido foi caracterizado fisicamente pelos métodos de teor de cinzas e MEV e quimicamente por TGA, DSC e EDX. O Fluxograma C demonstra as etapas do processo de produção e avaliação do material compósito (figura 12).

Figura 12: Fluxograma C – etapas de produção e avaliação das amostras do material compósito



Fonte: Autores.

Após a produção do carvão ativado realizou-se a junção do reforço com a matriz de poliuretano. Foram confeccionadas três amostras do filtro compósito. A quantidade de CA varia para cada amostra e o seu percentual foi calculado considerando a massa total da matriz polimérica, 8 gramas, que permaneceu constante em todas as amostras. Foram realizados os ensaios das propriedades físicas e químicas dos compósitos obtidos e feita a análise de absorção de gás carbônico por meio de espectroscopia de infravermelho. Analisados os resultados obtidos foi realizada a conclusão.

4.1 Produção do carvão ativado a partir do endocarpo da macaúba

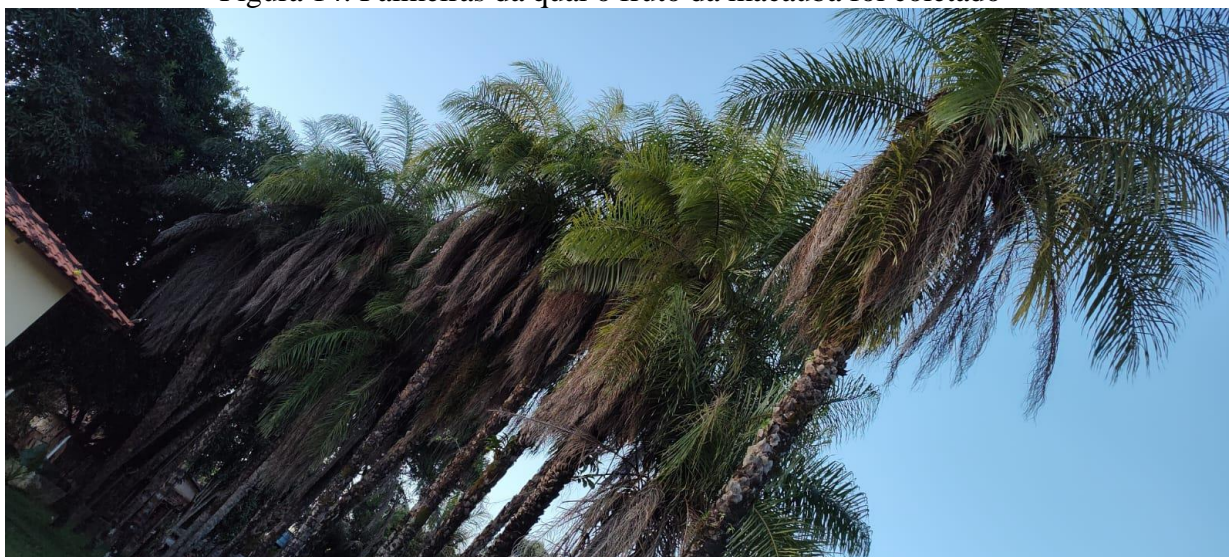
A macaúba (figura 13) utilizada neste experimento foi coletada manualmente de palmeiras (figura 14) localizadas no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), campus Paraíso–Tocantins.

Figura 13: macaúba *in natura*



Fonte: autor.

Figura 14: Palmeiras da qual o fruto da macaúba foi coletado



Fonte: autor.

O IFTO, campus Paraíso do Tocantins está situado na BR 153, KM 480 – Distrito Agroindustrial, Paraíso do Tocantins – TO, CEP: 77600-000. (figura 15). Logo após a coleta, os frutos da macaúba foram embalados em sacos plástico, trazidos para Palmas-Tocantins e

armazenados no Laboratório de Materiais Compósitos – LMC da Universidade Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Figura 15: Localização das Palmeiras de Macaúba



Fonte: autor.

Para a produção do carvão ativado a partir do endocarpo da macaúba utilizou-se a metodologia (adaptada) descrita por Ribeiro (2019). Inicialmente foi feita a quebra da casca com o auxílio de uma prensa (figura 16), obtendo-se assim o conjunto polpa, endocarpo e amêndoa (figura 17-a) que apresentava a característica de estar bastante seco dificultando a remoção da polpa.

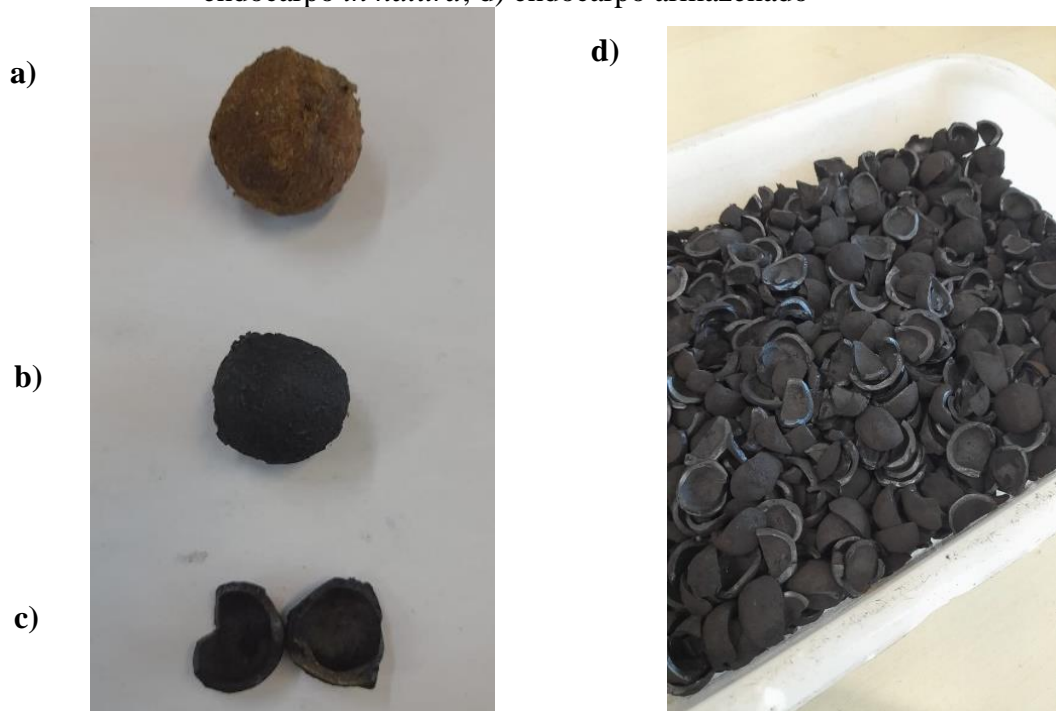
Figura 16: Prensa utilizada para quebra da casca da macaúba



Fonte: autor.

Diante deste fato submeteu-se o material ao aquecimento na mufla em uma temperatura de 200° C por 2 horas observando-se a carbonização da polpa e da amêndoa (figura 17-b), recolhendo o endocarpo *in natura* (figura 17-c) intacto e armazenando-o em uma bacia (figura 17-d).

Figura 17: a) Conjunto: polpa, endocarpo e amêndoa; b) carbonização da polpa e amêndoa; c) endocarpo *in natura*; d) endocarpo armazenado



Fonte: autor.

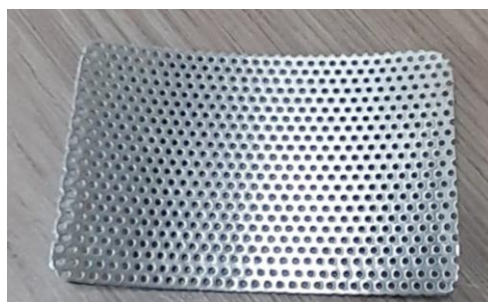
Por ser um sólido muito rígido, o insumo foi triturado em moinho de facas Tipo Wiley – TE – 650/1 (figura 18-a) utilizando-se uma peneira de 0,1 mm de diâmetro (figura 18-b). Para desmineralizar e retirar as impurezas presentes, o endocarpo *in natura* foi colocado na incubadora em uma solução de HCl 5% durante 24 horas sob agitação de 160 rpm e 50°C (figura 19).

Figura 18: a) Moinho de facas; b) Peneira

a)



b)



Fonte: autor.

Figura 19: Incubadora: remoção de impurezas



Fonte: autor.

Após o período estimado o endocarpo em pó apresentou ácido clorídrico em excesso e para retirá-lo o mesmo foi submetido a uma filtração à vácuo (figura 20) no qual o material foi lavado com água destilada. Assim que o erlenmeyer conectado a bomba à vácuo era

completamente preenchido media-se o pH da solução recolhida e repetiu-se este procedimento até que o pH da solução fosse neutro. O endocarpo puro foi seco naturalmente por 48 horas.

Figura 20: Processo de lavagem para obtenção de pH neutro



Fonte: autor.

A ativação química do carvão foi feita com ácido fosfórico (H_3PO_4). Pesou-se o material seco, após as 48 horas definidas anteriormente e adicionou ao mesmo uma solução de H_3PO_4 85%, permanecendo a mistura sob agitação de 160 rpm, $50^\circ C$ por 24 horas. A massa de endocarpo e a massa de ácido fosfórico utilizados seguiram a proporção de 1:1, sendo, portanto, iguais a 246 gramas.

Por fim, para a carbonização da matéria-prima utilizou-se uma mufla, por um período de 8 horas com a temperatura final de $450^\circ C$. Para retirar o excesso de ácido fosfórico o CA foi submetido ao mesmo processo de lavagem citado anteriormente e após sua secagem foi obtido o material esperado.

4.2 Caracterização física e química do carvão ativado da macaúba

Com o objetivo de avaliar o comportamento do carvão ativado fez-se necessário o estudo das suas propriedades físicas e químicas. Para isto foram feitas análises em ambientes monitorados, amparado por normas e metodologias já especificadas.

Fisicamente a amostra de carvão ativado da macaúba, denominada de ACA, foi caracterizado por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Análise Imediata do Carvão normatizada pela NBR 8112/1986 (ABNT, 1986) com o intuito de avaliar o teor de cinza. Quimicamente foi qualificada por análise termogravimétrica (TGA), análise térmica diferencial (DSC) e espectroscopia de raio X por dispersão de energia (EDX).

As técnicas de caracterização física (MEV) e químicas (TGA, DSC e EDX) foram realizadas no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), localizado na Rodovia R2, nº 3061, edifício CRTI, Universidade Federal de Goiás (UFG), Campus Samambaia, CEP: 74.690-631, Goiânia-GO, Brasil. O teor de cinzas foi realizado no Laboratório de Materiais Compósitos – LMC da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Palmas.

4.2.1 Teor de cinzas

Segundo Souza (2020) as cinzas da biomassa podem ser caracterizadas por minerais (sódio, potássio, cálcio, magnésio, ferro, zinco, entre outros) presentes nesta, bem como por materiais residuais utilizados em seu preparo.

Para determinar o percentual de cinzas do carvão ativado proveniente do endocarpo da macaúba, utilizou-se a proposta metodológica de Brandão *et al* (2020) realizando o teste em triplicata.

Inicialmente foi acondicionado o cadinho em mufla à 650°C por 1 hora, e posteriormente procedeu-se o seu resfriamento por 24 horas. Após este processo a massa do recipiente (MR) foi determinada. Em seguida, a massa do carvão seco (MCS) foi adicionada ao mesmo. Este conjunto retornou para a mufla à 650°C por um período de 8 horas. Logo após seu resfriamento até a temperatura ambiente, a massa do recipiente contendo as cinzas calcinadas (MRC) foi mensurada. O teor de cinzas foi então calculado conforme Equação 1:

Equação 1: Fórmula para o cálculo do teor de cinzas

$$\% \text{ cinzas} = \frac{MRC - MR}{MCS} \times 100 \quad (1)$$

Fonte: Brandão *et al.* (2020).

Onde,

% cinzas → teor de cinzas do carvão ativado (%);

MRC → massa do recipiente contendo cinzas calcinadas (g);

MR → massa do recipiente (g);

MCS → massa do carvão seco (g).

4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises realizadas buscavam verificar microestruturalmente a forma e o diâmetro médio dos grãos do carvão ativado, proveniente do endocarpo da macaúba.

Para a aquisição das imagens espectrais a ACA foi recoberta por uma fina camada de ouro como elemento condutor. Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) *Jeol JSM7100F* com tensão de aceleração de elétrons de 5 kV no modo de detecção de elétrons secundários (SED) (figura 21).

Figura 21: Microscópio eletrônico de varredura *JEOL JSM7100F*

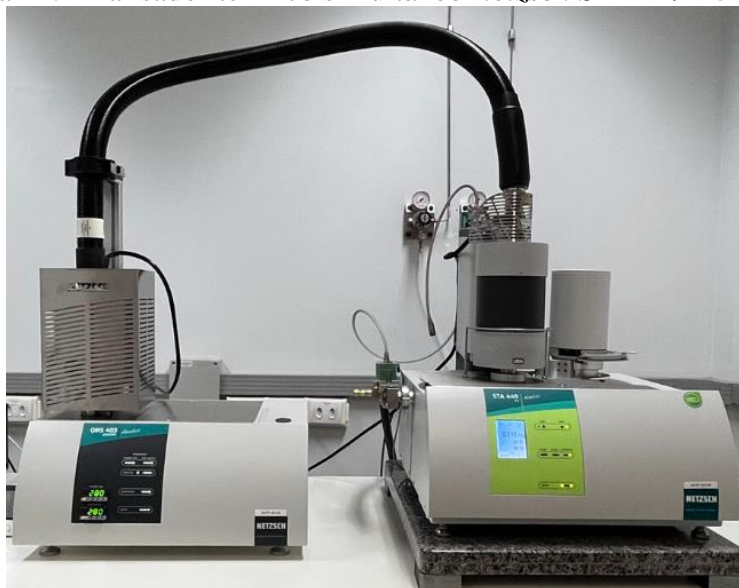


Fonte: CRTI, 2023.

4.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Para a determinação das curvas de TGA e DSC utilizou-se um analisador térmico simultâneo da marca *Netsch STA 449 F3 Nevio* (figura 22), em atmosfera dinâmica de O₂ e N₂, fluxo de 60 mL min⁻¹, utilizando uma taxa de aquecimento de 10 K min⁻¹ na faixa de temperatura de 35°C a 800°C, cadinho de alumina 85 µL aberto e massa da amostra de aproximadamente 11,49 mg.

Figura 22: Analisador térmico simultâneo *Netzsch STA 449 F3 Neveio*



Fonte: CRTI, 2023.

4.2.4 Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia (EDX)

Para as análises composicionais a ACA foi recoberta por carbono como elemento condutor. Foram realizadas pela técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDX), com um detector de raios-X *Oxford Instruments XMax-n 80* acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (figura 23).

Figura 23: Detector de raios-X *Oxford Instruments XMax-n 80* acoplado ao microscópio eletrônico de varredura



Fonte: CRTI, 2023.

4.3 Obtenção do material compósito

A membrana compósita evidenciada neste trabalho tem como matriz o polímero Poliuretano (PU). Este é caracterizado por ser uma espuma expansiva rígida, de baixa densidade combinando-se os componentes PU A e PU B. A composição química para componente A é uma mistura de polioliol (compostos contendo hidroxilas) e para componente B, 2,4-diisocianato de difenilmetano.

A espuma poliuretano (PU A associado ao B) (figura 24) utilizada neste experimento foi adquirida com o representante Rede Center Buriti e a confecção da membrana foi realizada no Laboratório de Materiais Compósitos – LMC da Universidade Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Figura 24: Componentes da espuma poliuretano (PU A associado ao PU B)



Fonte: autor.

As principais características do poliuretano descritas pelo fornecedor são: Marca – Redelease; Modelo – Espuma PU; Proporção indicada: 100 g PU A para 110 g PU B.

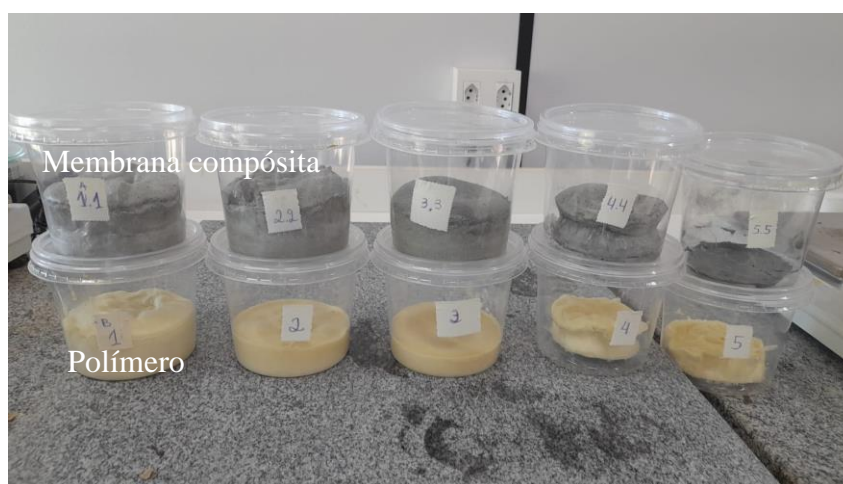
A princípio, para obter a membrana ideal, levando em consideração a quantidade e a possibilidade de misturar os componentes do poliuretano foram realizados dois testes. Primeiramente, baseando-se na proporção indicada pelo fabricante, fixamos a massa total da matriz em 8 gramas mantendo a massa do carvão ativado em 10% da massa da espuma expansiva, o equivalente a 0,8 gramas, variando-se apenas a quantidade de PU A e PU B (tabela 1). O produto foi depositado em um refratário de plástico para melhor desenformar o compósito (figura 25).

Em contrapartida, a título de comparação e visando verificar a melhor proporção para a expansão da espuma de poliuretano misturou-se também apenas os componentes do polímero. As massas (m) utilizadas neste primeiro teste estão pontuadas na tabela 1.

Tabela 1: Teste da proporção ideal para a produção da membrana

AMOSTRA	m PU A	m PU B	m carvão
1	4g	4g	0,8g
2	3g	5g	0,8g
3	2g	6g	0,8g
4	5g	3g	0,8g
5	6g	2g	0,8g

Figura 25: Teste 1 – Produção da membrana compósita e expansão do polímero

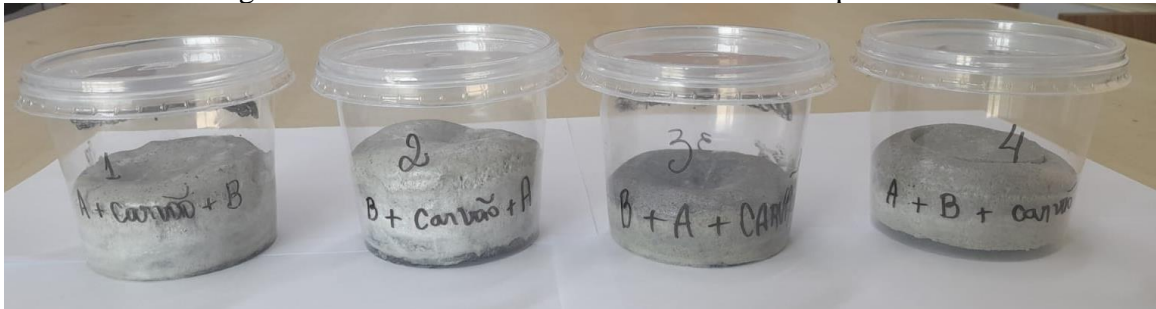


Fonte: autor.

Dentre as proporções analisadas no teste 1, considerando-se a expansão da espuma do polímero e a consistência da membrana compósita, a amostra 2 cuja proporção é 3 g de PU A e 5 g de PU B apresentou-se como a mais certa, pois o resultado entregue foi uma membrana mais consistente, isto é, menos quebradiça.

Definida a proporção entre os componentes realizou-se o teste 2 (figura 26). Neste considerou-se os possíveis ensaios de mistura das substâncias envolvidas, sendo: ensaio 1) PU A + carvão + PU B; ensaio 2) PU B + carvão + PU A; ensaio 3) PU B + PU A + carvão; ensaio 4) PU A + PU B + carvão.

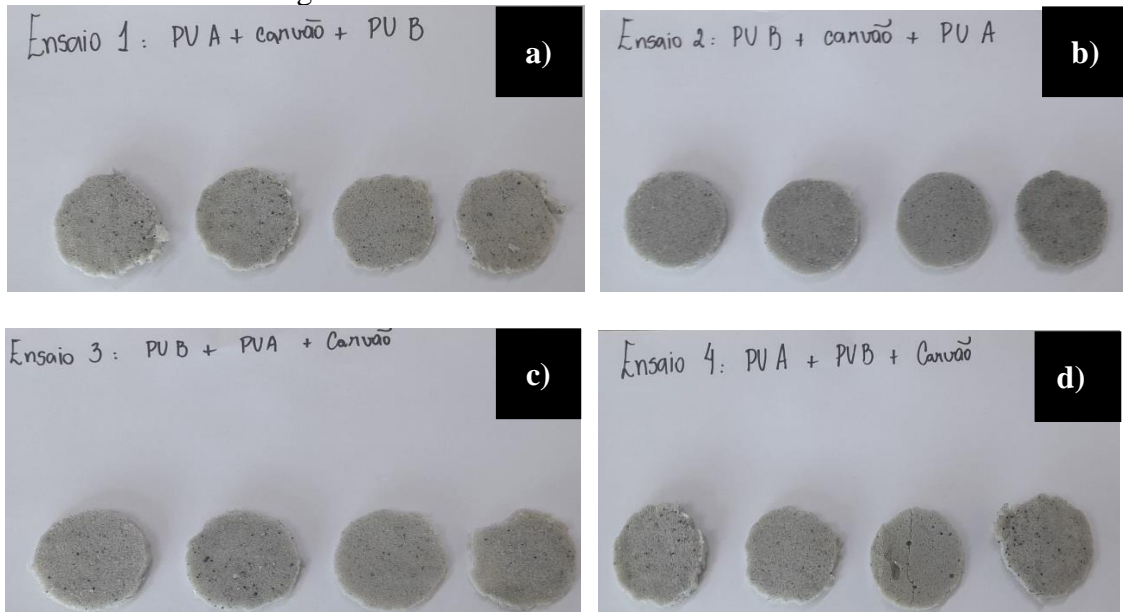
Figura 26: Teste 2 – Ensaio de mistura dos componentes



Fonte: autor.

Ao desenformar as membranas compósitas foi possível constatar visualmente considerando a textura que a membrana do ensaio 2, cuja mistura compreende PU B + carvão + PU A (figura 36), era a melhor opção, pois apresentou a menor quantidade de poros visíveis a olho nu, distribuição mais homogênea do carvão ativado no PU e menor tendência de desfazer-se quando comparada as membranas dos demais ensaios (figura 27).

Figura 27: Teste 2 – Membranas desenformadas



Fonte: autor.

Com a proporção e a melhor sequência para a mistura dos componentes já definidas procedeu-se a confecção dos corpos das amostras da membrana, denominadas AM1, AM2 e AM3.

Quantitativamente a massa total das amostras foi de 8 g para a matriz polimérica sendo 5 g de PU B, 3 gramas de PU A variando-se apenas a porcentagem de carvão ativado, sendo

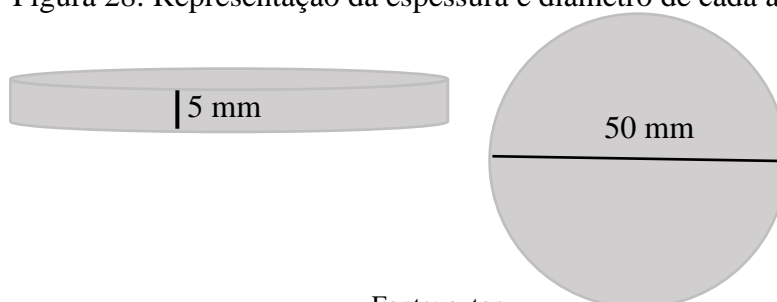
10% para a AM1, 30% AM2 e 50% AM3. O percentual de CA foi calculado por regra de três baseando-se na massa total da matriz (tabela 2).

Tabela 2: Composição das amostras

AMOSTRAS	MATRIZ		CARVÃO ATIVADO (% referente ao valor total da matriz / g)	
	PU A (% / g)	PU B (% / g)		
AM1	37,5% / 3g	62,5% / 5g	10%	0,8g
AM2			30%	2,4g
AM3			50%	4,0 g

Confeccionadas as membranas compósitas foram desenformadas e cortadas considerando um diâmetro de 50 mm e espessura de 5 mm (figura 25). Para validar o experimento e analisá-los estatisticamente foram confeccionadas 5 unidades para cada amostra, totalizando 15 amostras.

Figura 28: Representação da espessura e diâmetro de cada amostra



Fonte: autor.

4.4 Caracterização física do material compósito obtido pela combinação do carvão ativado e poliuretano.

4.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com a finalidade de analisar microestruturalmente a morfologia, as dimensões e a distribuição das partículas do carvão ativado, as amostras das membranas compósitas (AM1, AM2 e AM3) produzidas foram submetidas ao MEV. As micrografias foram obtidas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) *Jeol JSM7100F* com tensão de aceleração de elétrons de 5 kV no modo de detecção de elétrons secundários (SED).

4.5 Caracterização química do material compósito obtido pela combinação do carvão ativado e poliuretano.

4.5.1 Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As técnicas de TGA e DSC foram utilizadas para avaliar a estabilidade e a decomposição térmica das membranas compósitas obtidas, em função da perda de massa, quando submetidas a uma variação de temperatura. As curvas de TG e DSC, foram realizadas no CRTI - UFG Goiânia-GO utilizando-se um analisador térmico simultâneo da marca *STA 449 F3 Nevio*, em atmosfera dinâmica de O₂ e N₂, fluxo de 60 mL min⁻¹, utilizando uma taxa de aquecimento de 10 K min⁻¹ na faixa de temperatura de 35°C a 800° C, cadinho de Al₂O₃ 85 µL e massa da amostra de aproximadamente 9 mg.

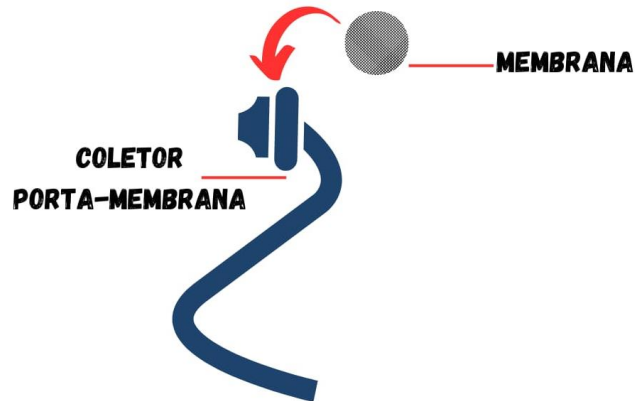
4.5.2 Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia (EDX)

A caracterização da composição química das membranas foi realizada pela técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDX) no CRTI-UFG Goiânia-GO. As amostras foram recobertas por carbono como elemento condutor e o equipamento utilizado foi o detector de raios-X *Oxford Instruments XMax-n 80* acoplado ao microscópio eletrônico de varredura.

4.6 Verificação da funcionalidade do filtro compósito confeccionado

Para verificar a funcionalidade do filtro utilizou-se um equipamento fabricado pela autora denominado coletor porta-membrana (figura 29). Este equipamento é constituído por um tubo de passagem de gás acoplado em um cilindro metálico soldado a um flange.

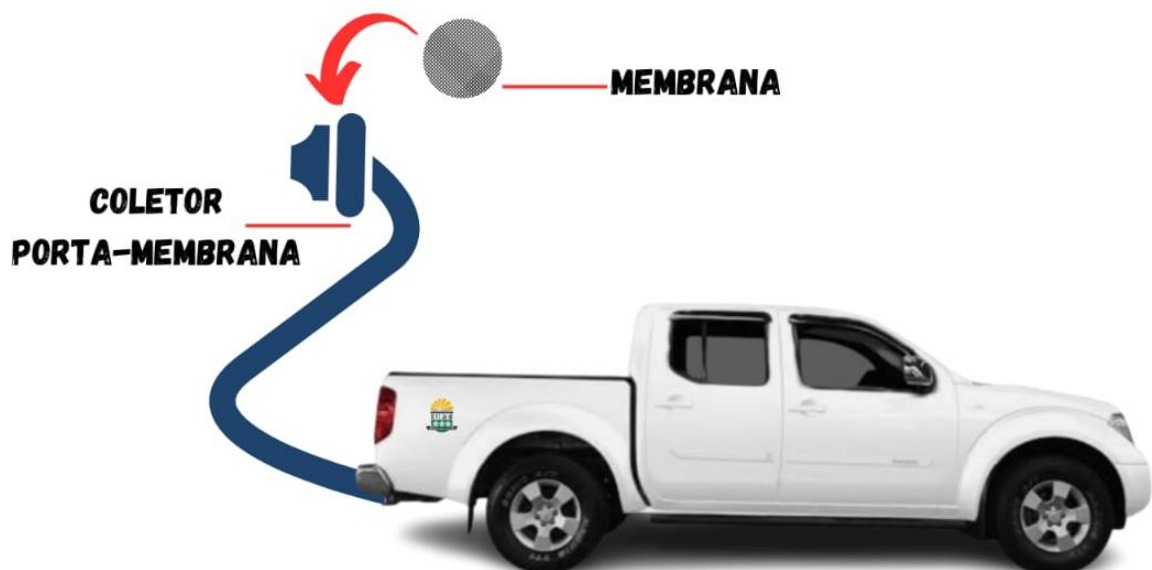
Figura 29: Coletor porta-membrana



Fonte: autor.

A amostra do filtro compósito produzidos foi inserida no flange e a extremidade livre do tubo foi acoplada por uma braçadeira no escapamento do veículo que permaneceu parado com motor a diesel ligado (figura 30).

Figura 30: Esquema do experimento de verificação da funcionalidade



Fonte: autor.

O experimento foi realizado com os 15 filtros confeccionados. O automóvel ficou estacionado no pátio da UFT, campus Palmas - TO, e tempo de combustão analisado para cada amostra foi de 10 minutos.

4.7 Avaliação de retenção do Dióxido de Carbono (CO₂) no material compósito produzido

Após a utilização das membranas compósitas foi realizado uma avaliação da retenção do CO₂. Neste procedimento considerou-se a caracterização por espectroscopia de infravermelho. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Química Ambiental e Biocombustível – LAPEQ, localizado na UFT campus Palmas – TO.

4.7.1 Espectroscopia de infravermelho (IRS)

Todas as amostras (AM1, AM2 e AM3) foram analisadas por IRS antes e após o uso dos filtros no espectrofotômetro *Agilent Technologies Cary 630 FTIR* (figura 31), na região de 4000 a 650 cm⁻¹, com número de varreduras de 32 e resolução de 2 cm⁻¹.

Figura 31: Infravermelho *Agilent Technologies Cary 630 FTIR*



Fonte: autor.

4.8 Análise estatística

Os dados relativos ao espectro do infravermelho referente a todas as amostras AM1, AM2 e AM3, tiveram seus resultados submetidos à testes estatísticos para verificar a correlação entre dados inerentes à um mesmo ensaio, para amostras constituídas com traços distintos quanto a quantidade de reforço que as compõem.

Os resultados foram submetidos a Análise de Variância (ANOVA) para determinar a significância de quaisquer dissemelhanças examinadas. Existirá significância, ou seja,

diferença, se o F calculado for maior ou igual ao F tabelado e será insignificante se o F calculado for menor que o F tabelado.

Considerando que cada tratamento possui um fator perturbador (percentual de carvão em cada amostra) utilizou-se o Delineamento Experimental Inteiramente Casualizado (DIC), determinando a ANOVA e Teste Tukey a 5% de significância, empregando-se o *software Sisvar* versão 5.7.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Carvão ativado obtido

A figura 32 apresenta o carvão ativado obtido que constituirá o reforço da membrana compósita produzida.

Figura 32: Carvão ativado obtido



Fonte: autor.

5.2 Caracterização física e química do carvão ativado da macaúba

5.2.1 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi realizado com o objetivo de determinar qual a porcentagem de resíduo inorgânico após a incineração do carvão. Obteve-se uma média de teor equivalente a 35,34% o que significa que a cada 1 grama de carvão ativado calcinado têm-se aproximadamente 0,35 gramas de material inorgânico, podendo este ser minerais, metais ou elementos traços componentes da matéria-prima do carvão.

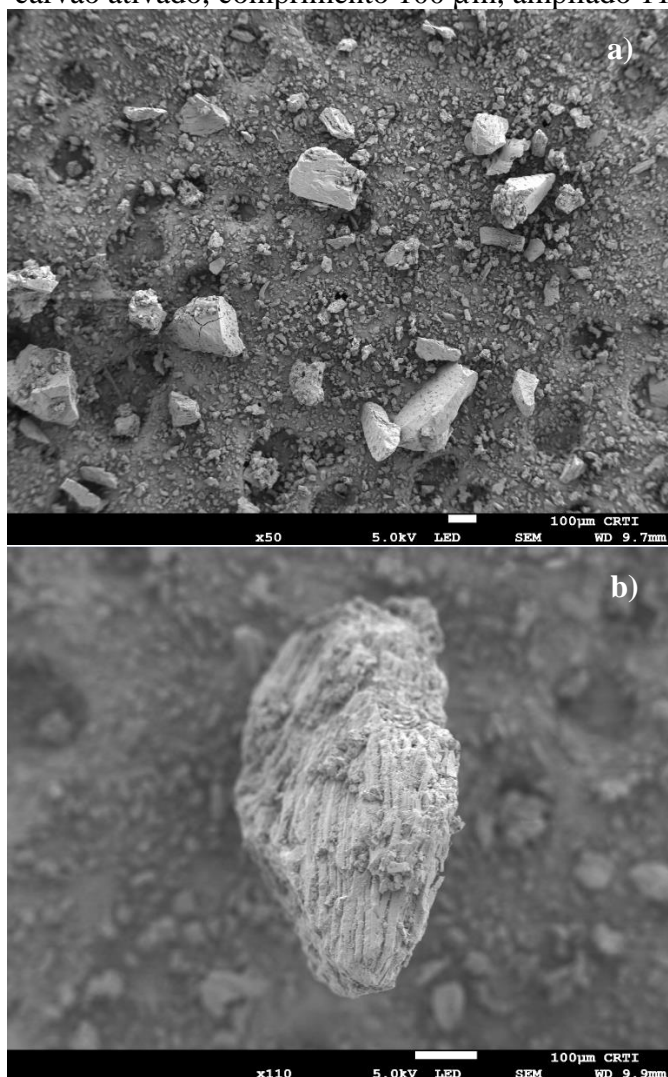
Este percentual se deve ao fato de que parte da matéria orgânica se perdeu durante o processo de carbonização do endocarpo.

5.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para a analisar a estrutura superficial do carvão.

Analisando as microscopias ampliadas em 50 vezes e 110 vezes, com um grão com comprimento de 100 μm (figura 33) notam-se poros, espaços vazios que anteriormente eram ocupados pelo ácido fosfórico, o agente ativante, que se decompôs durante a carbonização.

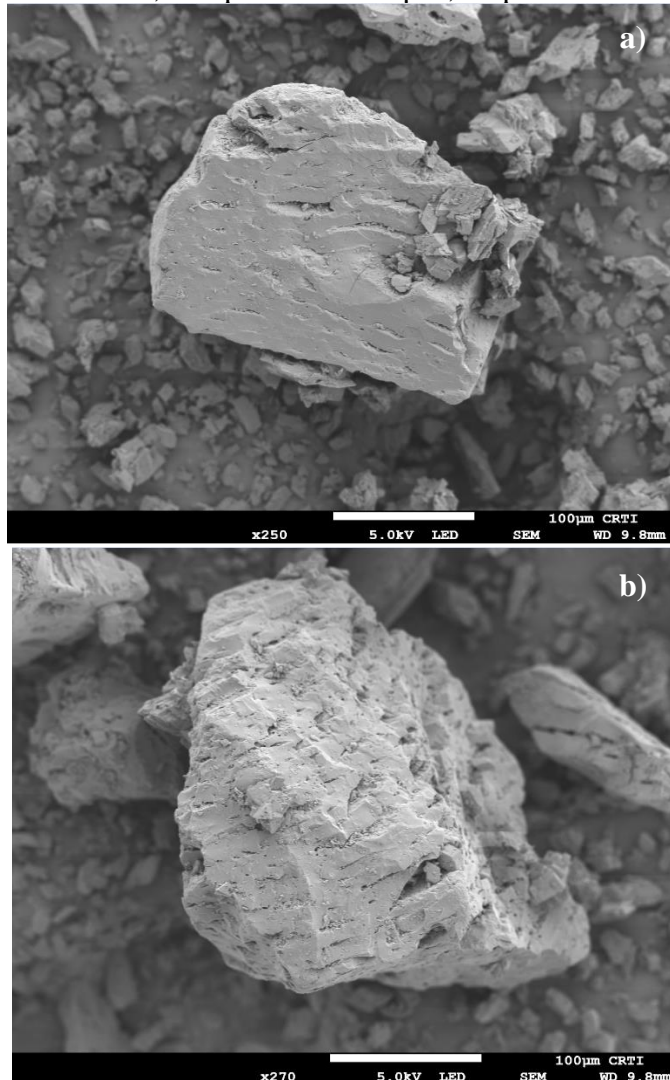
Figura 33: a) MEV – carvão ativado, comprimento 100 μm , ampliado 50 vezes; a) MEV – b) MEV - carvão ativado, comprimento 100 μm , ampliado 110 vezes



Fonte: CRTI, 2023.

Evidencia-se, nas microscopias ampliadas 250 e 270 vezes (figura 34), que o material produzido apresenta superfícies irregulares, heterogêneas, rugosas com estrutura porosa bem distribuída com diferentes formatos e dimensões diferentes.

Figura 34: a) MEV – carvão ativado, comprimento 100 μm , ampliado 250 vezes; b) MEV – carvão ativado, comprimento 100 μm , ampliado 270 vezes



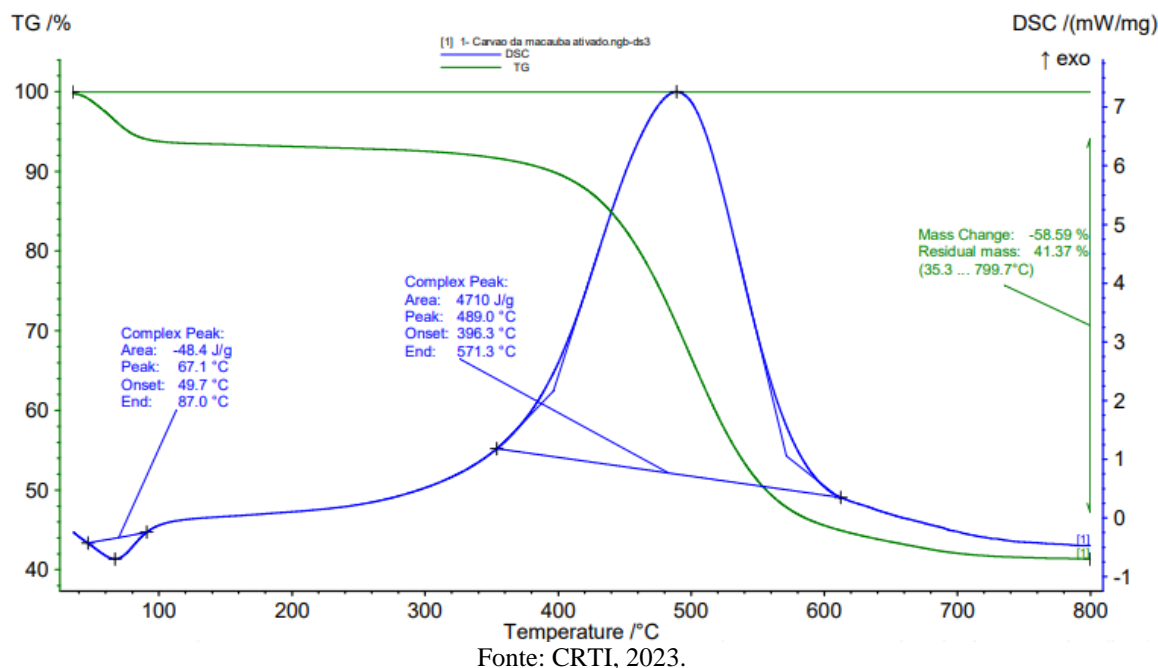
Fonte: CRTI, 2023.

Vale ressaltar que segundo Deng *et al.* (2010) o agente ativante utilizado na produção do CA influencia diretamente no diâmetro dos poros.

5.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A curva de análise termogravimétrica (TGA) (curva verde-Figura 35) mostra que o carvão ativado perde massa primeiramente na faixa de temperatura compreendida entre 40° e 106° C, fato justificado pela perda de água presente na biomassa. No intervalo de temperatura entre 360° a 700° C observa-se que o material orgânico, o carvão ativado, é decomposto. Durante toda essa variação de temperatura, 35°C a 799,7°C, perde-se 58,59% de massa amostral e infere-se que massa residual (massa fixa) de carvão é equivalente a 41,37%.

Figura 35: Curvas de análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria exploratória individual (DSC) em atmosfera de ar sintético do carvão ativado

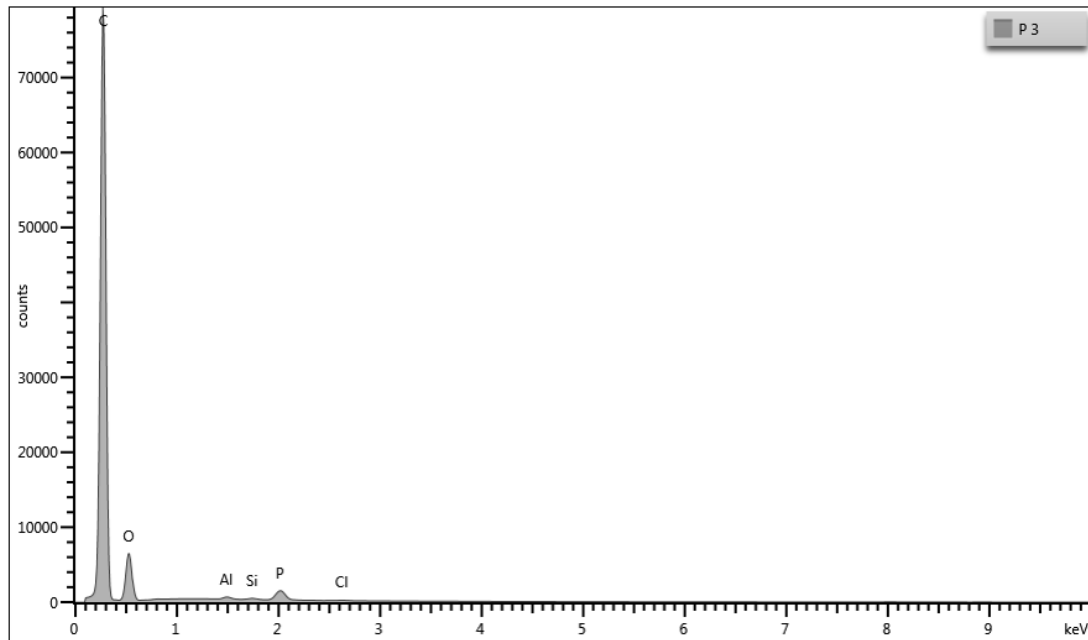


A análise da curva de DSC (curva azul – figura 35) aponta um pico endotérmico entre as temperaturas de 49,7° e 87°C, atribuindo este ao fato de ser necessário a absorção de calor para que a água presente no carvão evapore. Observa-se que durante a decomposição da matéria orgânica, evidenciada na TGA, ocorre a formação de um pico exotérmico, isto é uma liberação de energia, que se inicia na temperatura de 396,3° e finda em 571,3° C. A partir desta temperatura o carvão adquire massa fixa.

5.2.4 Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia (EDX)

A análise do espectro EDX (figura 36) mostra um sinal intenso de carbono (C), evidenciando uma fração elevada do mesmo, e uma quantidade menos expressiva, porém relevante de oxigênio (O), característica comum de material classificado como orgânico, visto que o endocarpo da macaúba é uma biomassa lignocelulósica que apresenta uma estrutura química complexa, a qual consiste principalmente de 38% de celulose, 18% de hemicelulose, 35% de lignina e 9% outros (GUILHEN, 2018).

Figura 36: Espectro de energia dispersiva de raios X (EDS) do carvão ativado produzido a partir do endocarpo da Macaúba



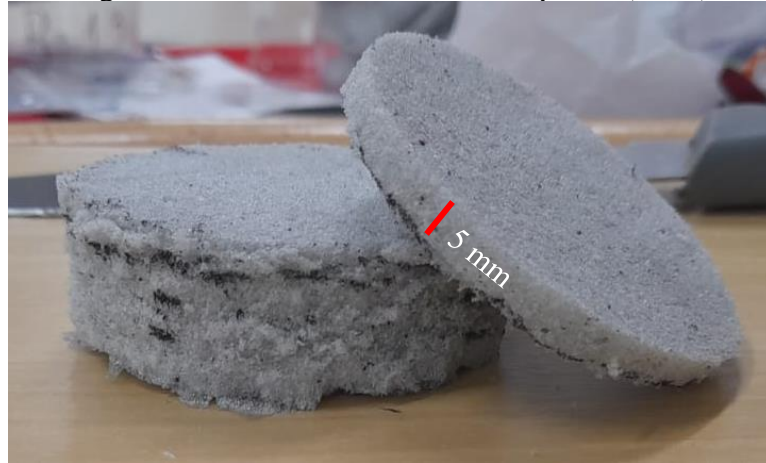
Fonte: CRTI, 2023.

A presença de alumínio (Al) e silício (Si), encontradas em baixas proporções, se deve ao fato de os mesmos estarem entre os elementos mais abundante da crosta terrestre encontrando-os principalmente nas rochas graníticas, basálticas e sedimentares. O cloro (Cl) detectado está relacionado ao processo de purificação a qual o endocarpo foi submetido e o fósforo (P) se justifica pela etapa de ativação do carvão ativado, apresentando apenas traços.

5.3 Material compósito obtido

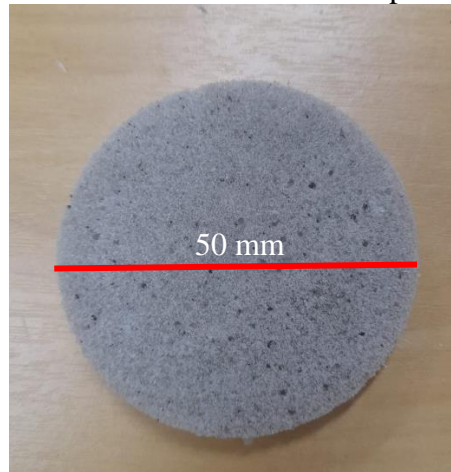
Após ocorrer a expansão do material compósito, as amostras AM1, AM2 e AM3 permaneceram em repouso por 24 horas para secagem completa do material. Ao ser desenhada e cortada, com o auxílio de um cortador de massa, obteve-se membranas com 5 mm de altura (figura 37) e 50 mm de diâmetro (figura 38). As 5 repetições para cada amostra totalizaram a produção de 15 filtros compósitos (figura 39).

Figura 37: Altura da membrana compósita (5mm)



Fonte: autor.

Figura 38: Diâmetro da membrana compósita (50 mm)



Fonte: autor.

Figura 39: Repetições para cada amostra



Fonte: autor.

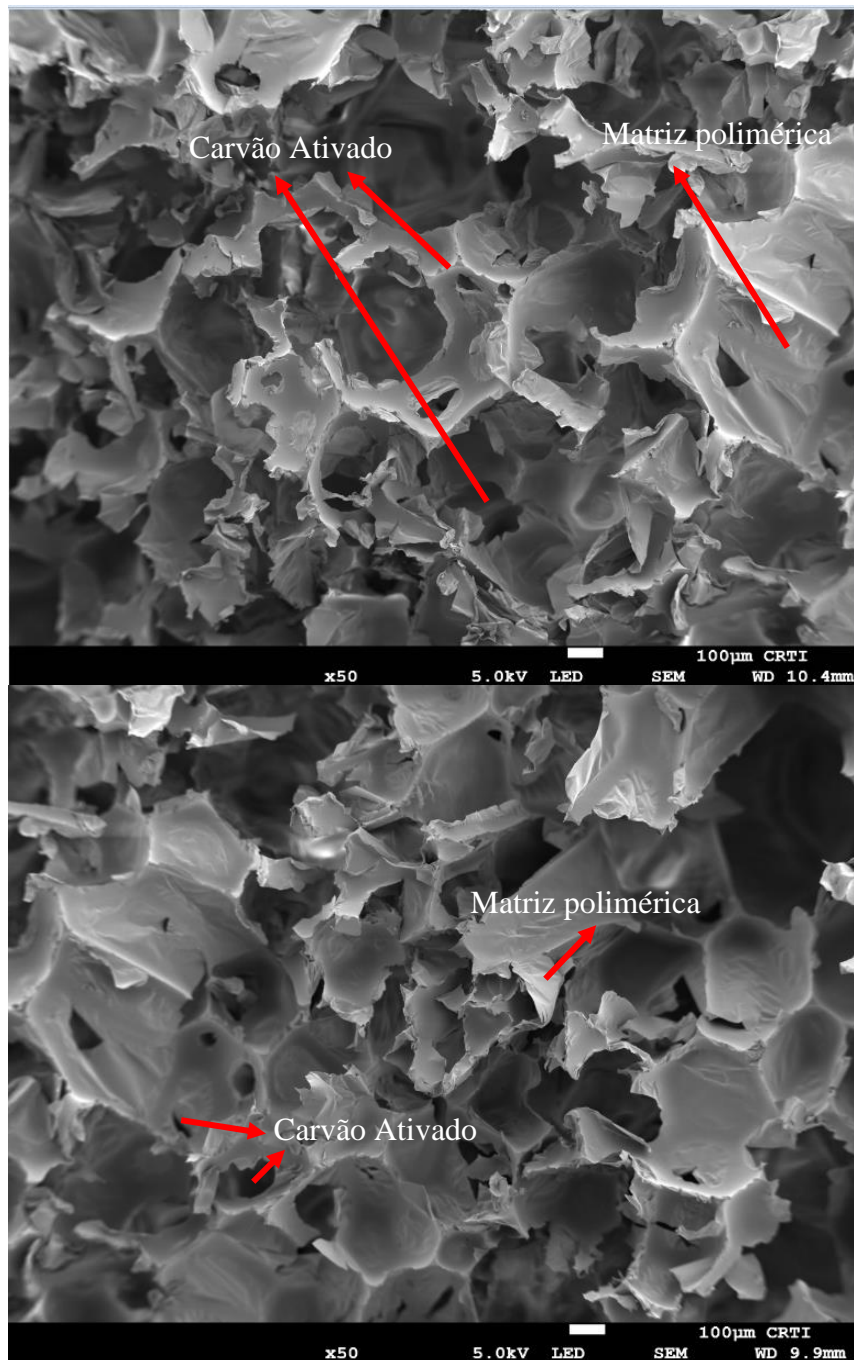
5.4 Caracterização física do material compósito obtido pela combinação do carvão ativado e poliuretano.

5.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As microscopias, analisando uma dimensão de 100 μm e ampliando a imagem 50 vezes, das amostras AM1, AM2 e AM3, respectivamente, permitem analisar de forma direta a morfologia (formato e textura do material), bem como o grau de dispersão do reforço na matriz.

A amostra 1 apresenta a menor quantidade de carvão, isto é, 0,8 gramas. Na figura 40 observamos que o carvão ativado foi impregnado na matriz polimérica sendo esta evidenciada pela textura mais densa e o reforço representado por pontos mais escuros dispersos no poliuretano.

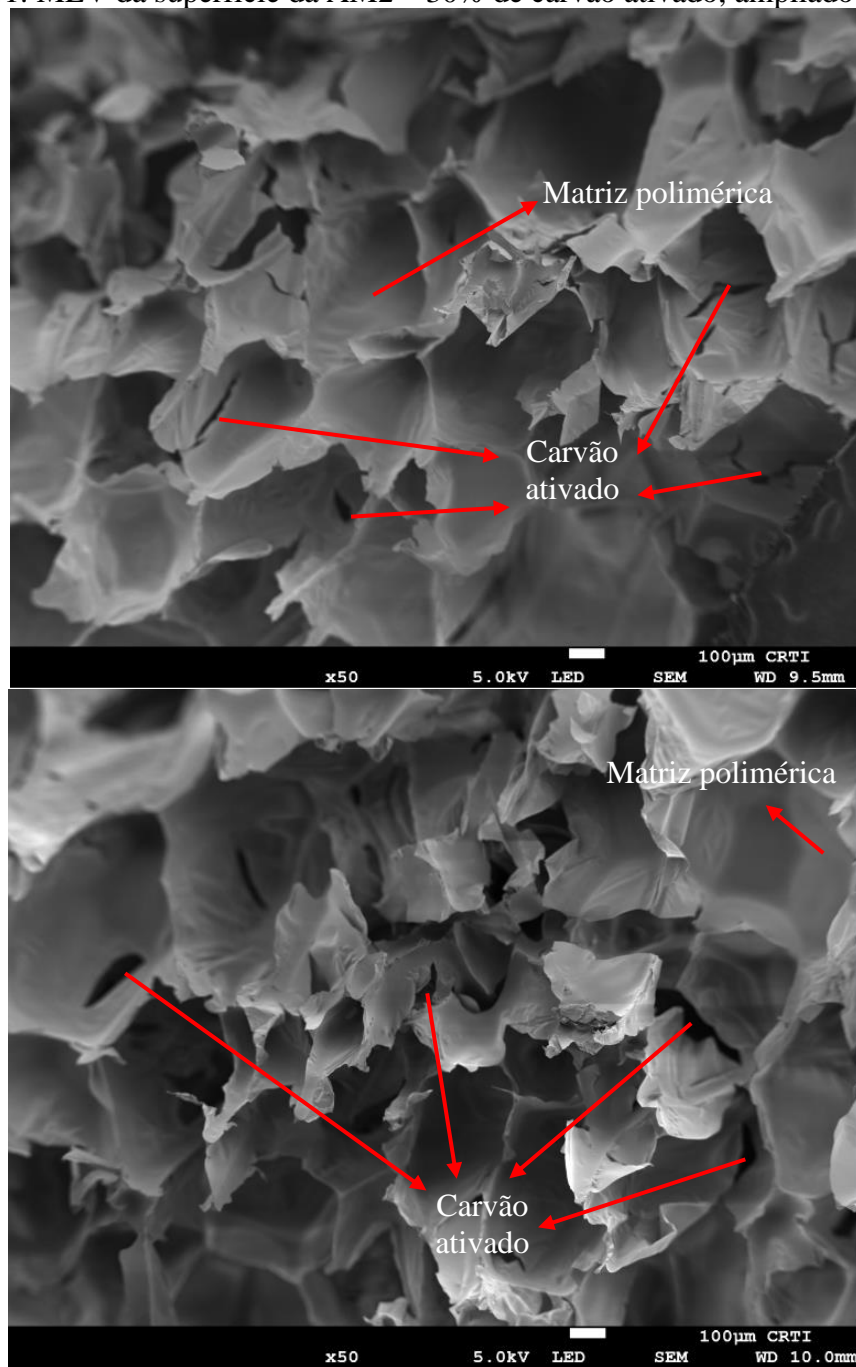
Figura 40: MEV da superfície da AM1 – 10% de carvão ativado, ampliada 50 vezes



Fonte: CRTI, 2023.

A microscopia representada na figura 41 demonstra uma quantidade superior de carvão aderido à matriz pois a amostra 2 apresenta 1,6 gramas a mais de reforço que a AM1.

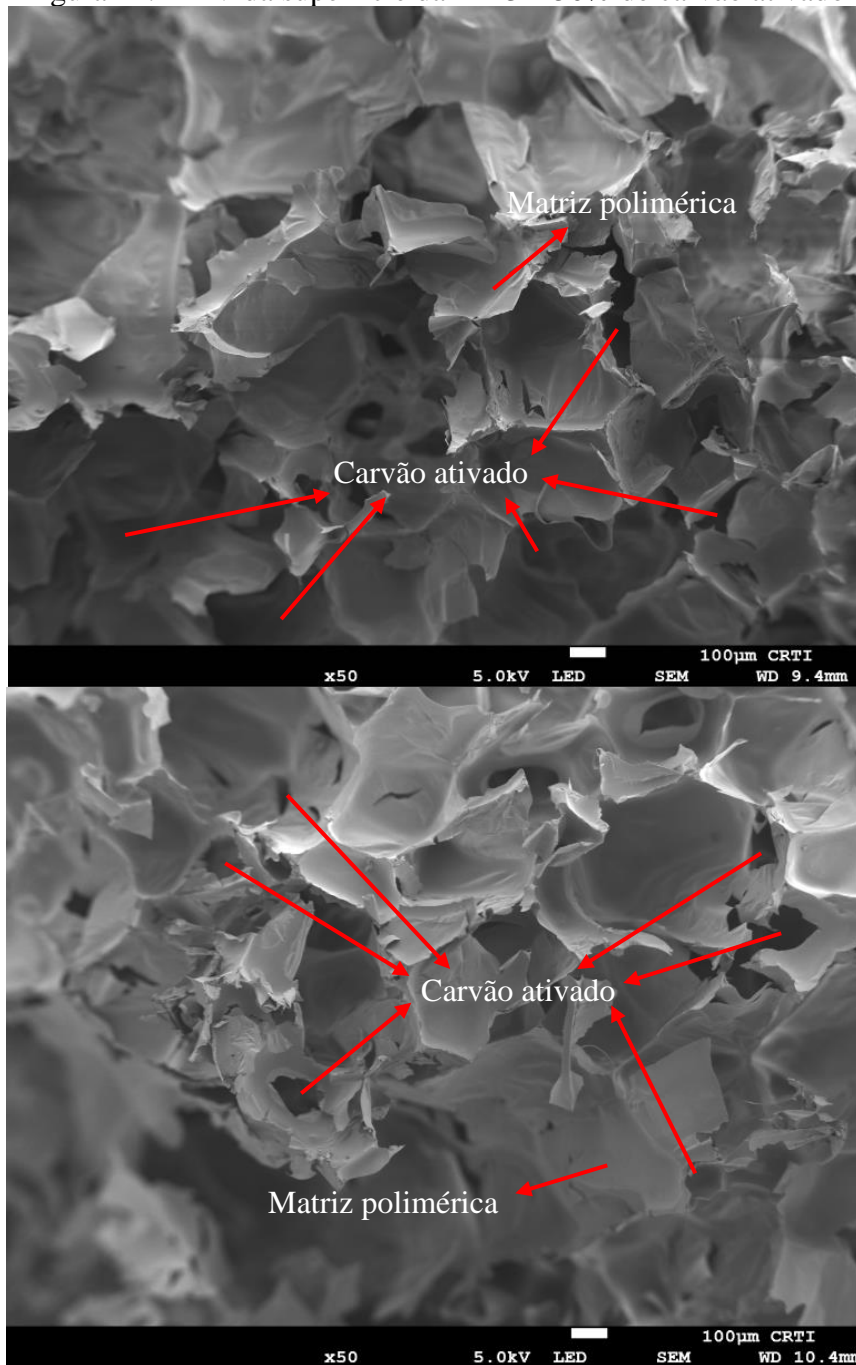
Figura 41: MEV da superfície da AM2 – 30% de carvão ativado, ampliado 50 vezes



Fonte: CRTI, 2023.

Com 4 g de carvão ativado, correspondendo a 50% da massa total da matriz polimérica, a amostra 3, representada na figura 42 evidencia a quantidade mais expressiva de carvão ativado distribuída em toda a matriz.

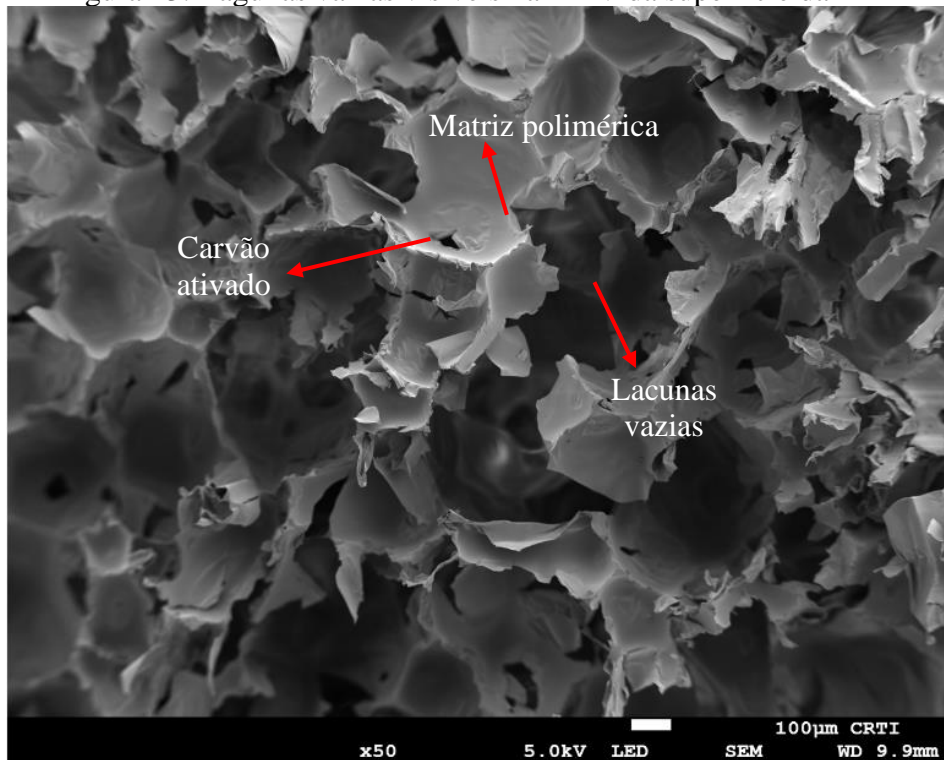
Figura 42: MEV da superfície da AM3 – 50% de carvão ativado



Fonte: CRTI, 2023.

As micrografias mostram que o carvão ativado teve uma interação heterogênea com a matriz. Esta mistura carvão/matriz aparenta ter diminuído a quantidade de espaços vazios comuns na espuma de PU que surgem durante o processo de expansão. Possivelmente justifica-se este fato pelo englobamento do carvão à matriz preenchendo parte das lacunas vazias. No entanto percebe-se que em algumas áreas ainda há bolsões com tamanhos consideráveis (figura 43).

Figura 43: Lagunas vazias visíveis na MEV da superfície da AM1



Fonte: CRTI, 2023.

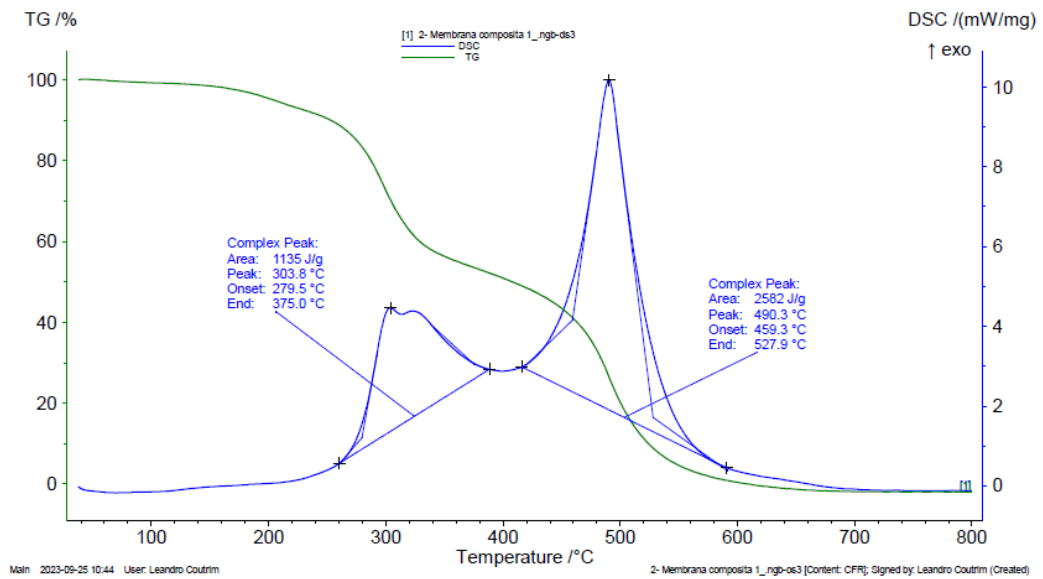
5.5 Caracterização química do material compósito obtido pela combinação do carvão ativado e poliuretano.

5.5.1 Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Para analisar a variação da massa em função da temperatura e a troca de energia quando comparado a um padrão, as amostras foram caracterizadas pelas curvas TGA e DSC.

A curva da TGA para a amostra 1 (figura 44 – curva verde) demonstra que a perda crítica de massa se inicia na temperatura de 279,5° C e estende até 527,9° C, observando que a partir desta a massa da amostra se torna fixa. A curva de DSC (figura 44 – curva azul) apresenta dois picos exotérmicos, o que caracteriza a liberação de energia durante o processo de perda da massa amostral. Conclui-se que a energia máxima liberada por esta amostra é 10 mW/mg.

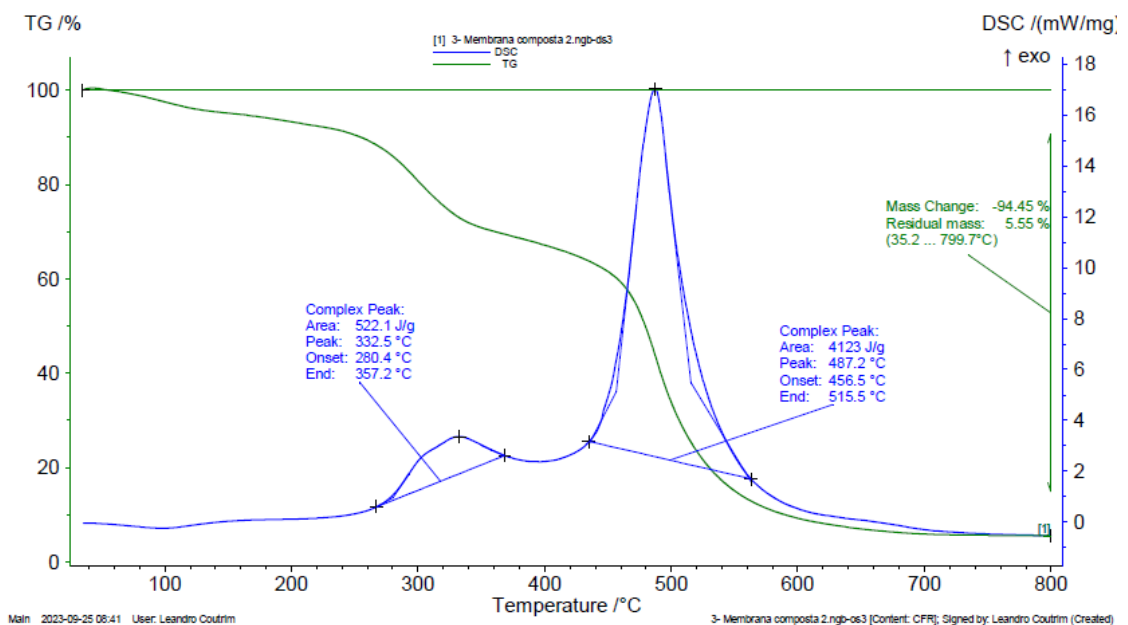
Figura 44: Curvas de TGA e DSC da membrana compósita – amostra 1



Fonte: CRTI, 2023.

A análise das curvas para amostra 2 (figura 45) caracteriza um processo exotérmico durante perda de massa. Entre as temperaturas 280,4 °C e 515,5 °C a variação da massa é mais evidente sendo que ao finalizar a DSC em 799,7 °C a massa residual da amostra é 5,55% referente a inicial. Nota-se que a energia máxima liberada é de 17 mW/mg.

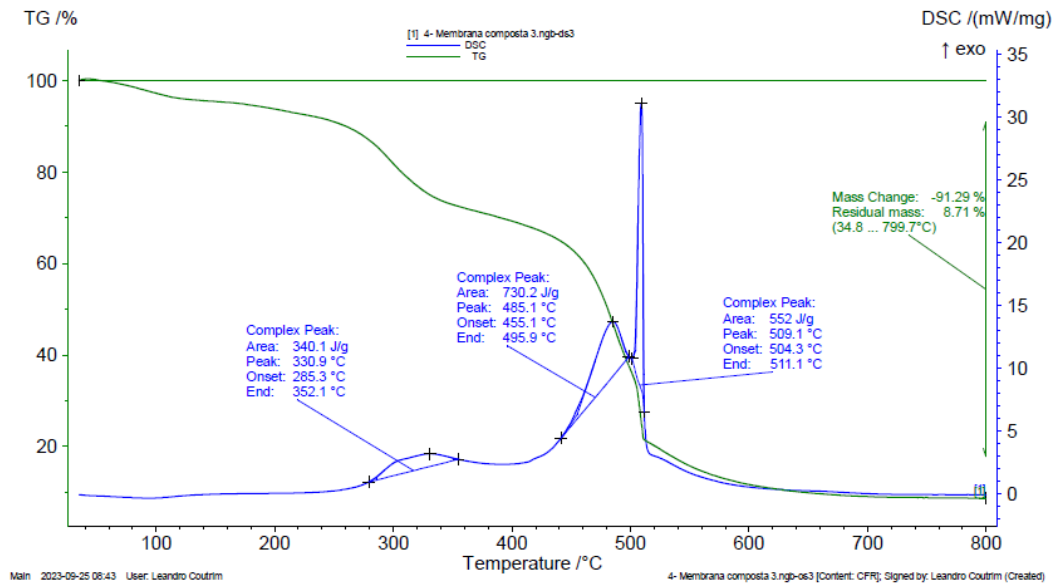
Figura 45: Curvas de TGA e DSC da membrana compósita – amostra 2



Fonte: CRTI, 2023.

Nas curvas referentes a amostra 3 (figura 46) é possível examinar que a perda de massa expressiva liberando energia ocorre entre as temperaturas 285,3 ° C e 511,1° C, consumindo 91,29% da amostra analisada. Nota-se que a energia máxima liberada é de 32 mW/mg.

Figura 46: Curvas de TGA e DSC da membrana compósita – amostra 3



Fonte: CRTI, 2023.

As amostras apresentam estágios de decomposição similares. Observa-se que a variação de massa inicia em aproximadamente em 35° C e que a perda de massa mais significativa ocorre na faixa entre 279° C e 530° C.

As curvas de DSC mostram picos exotérmicos o que caracteriza que os materiais componentes da membrana liberam energia durante a decomposição. A diferença entre os picos energéticos está relacionada aos componentes da membrana bem como as quantidades empregadas de cada um.

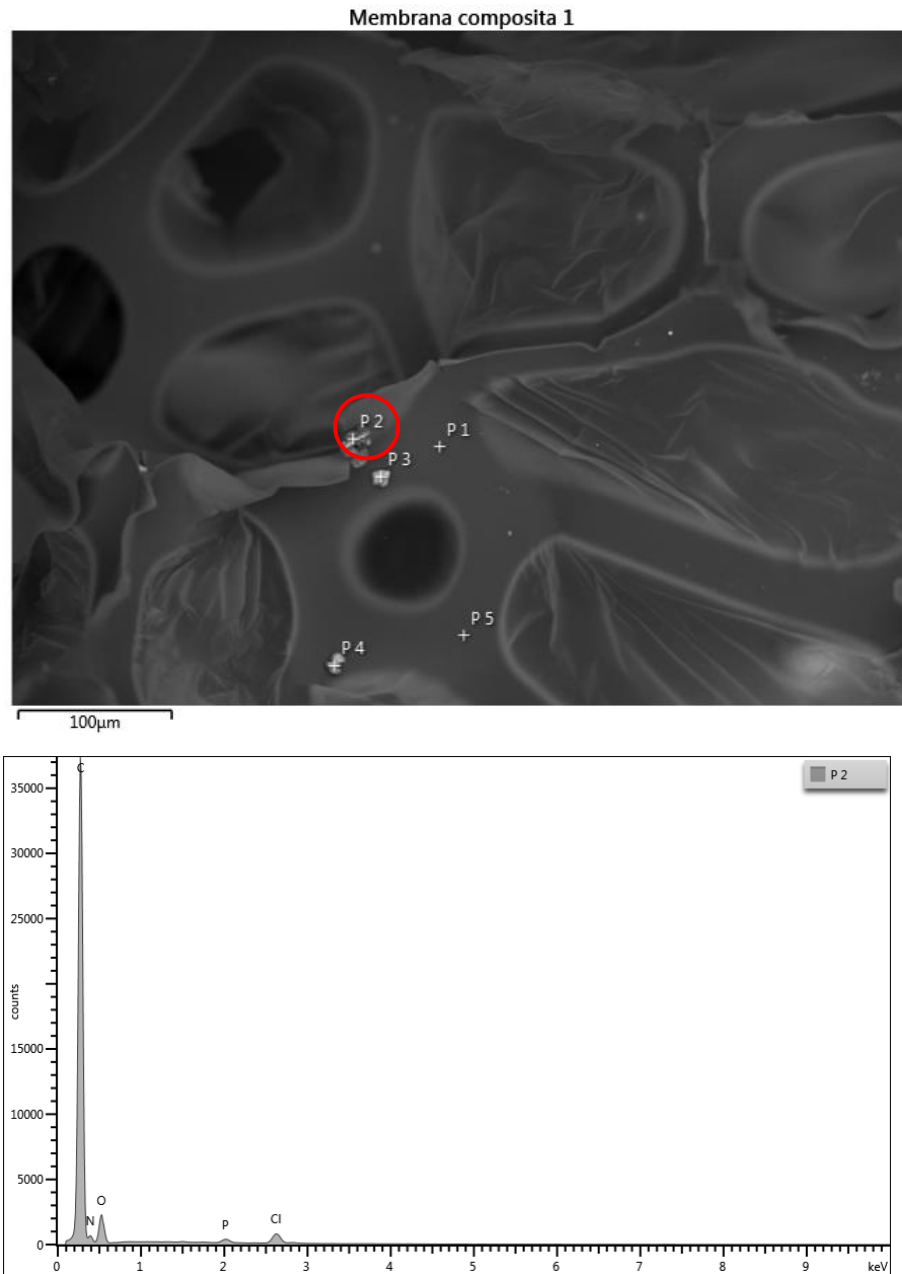
5.5.2 Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia (EDX)

O espectro de EDX permite determinar quais elementos químicos estão presentes em determinados pontos da amostra. Abaixo são apresentadas espectroscopias referentes ao ponto 2 de cada amostra (AM1, AM2, AM3).

Na espectroscopia apresentada na figura 47, referente a amostra 1, foram realizadas 37000 contagens em função da energia do Raio-X. Isto caracterizou a presença dos elementos

carbono (C), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P) e cloro (Cl), sendo o carbono o elemento químico em maior quantidade.

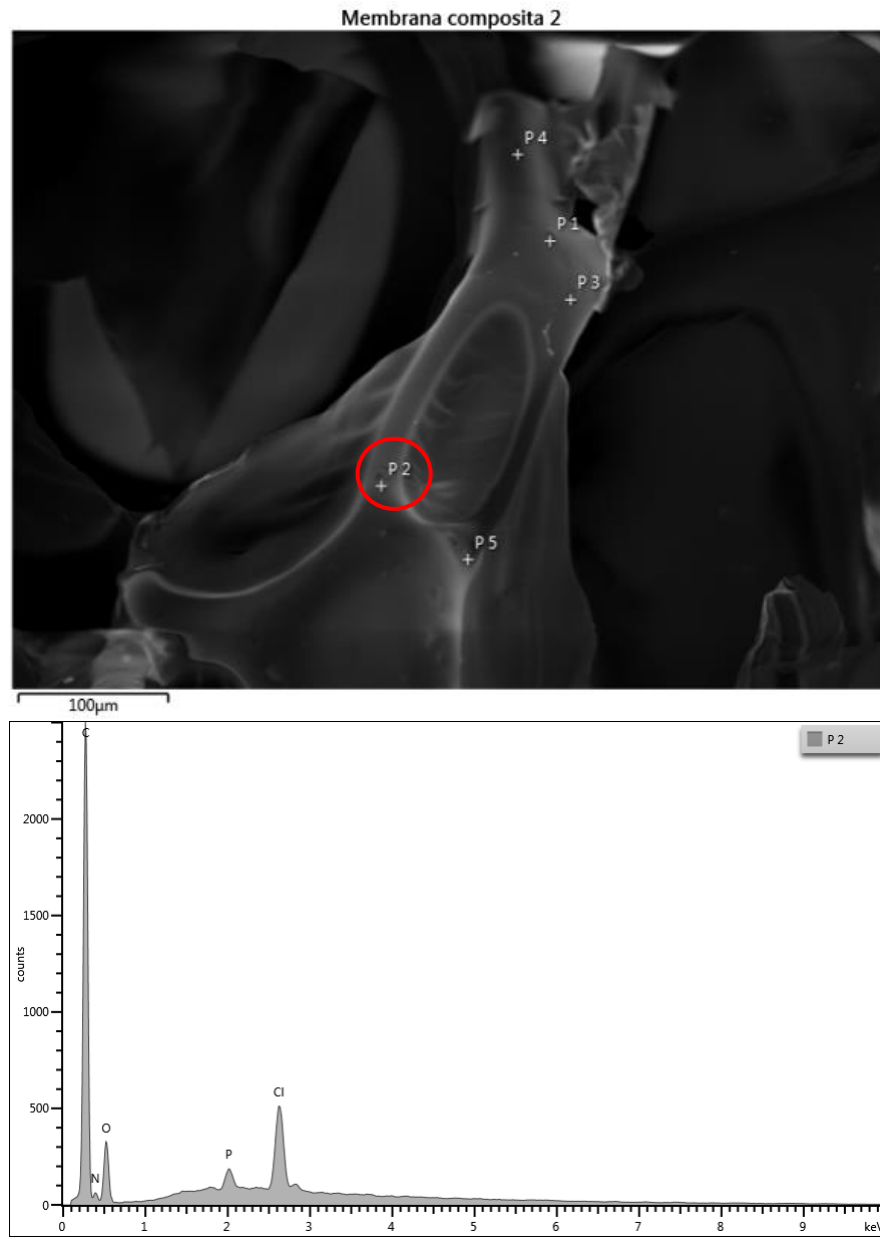
Figura 47: Espectro de energia dispersiva de raios X (EDX) da membrana compósita – amostra 1



Fonte: CRTI, 2023.

No espectro detalhado da amostra 2, visualizado na figura 48, observamos 2500 contagens em função da energia do Raio-X. Foram detectados picos expressivos de carbono (C), oxigênio (O), fósforo (P) e cloro (Cl), e uma porcentagem bem baixa de nitrogênio (N).

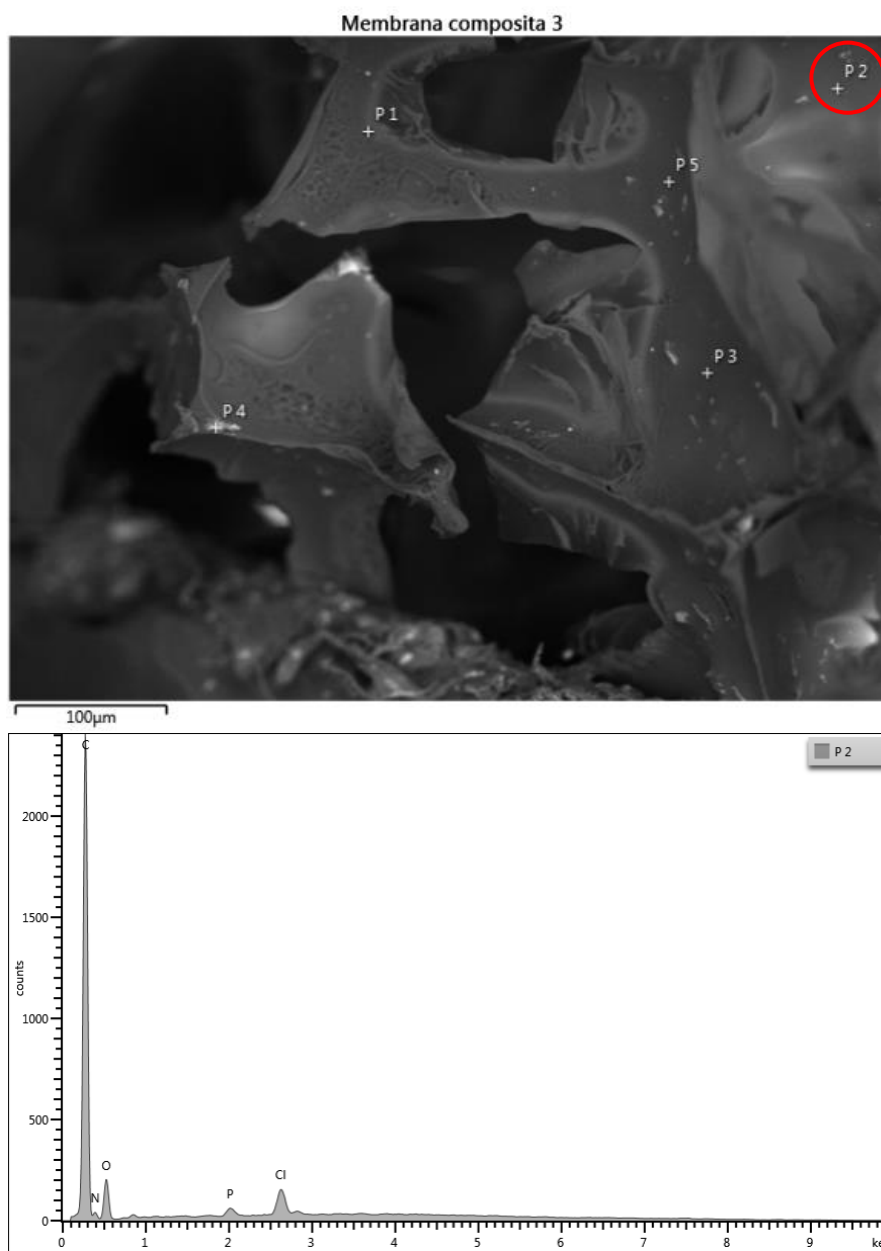
Figura 48: Espectro de energia dispersiva de raios X (EDX) da membrana compósita – amostra 2



Fonte: CRTI, 2023.

A membrana compósita referente a amostra 3 caracterizou um espectro (figura 49) similar ao da amostra 2, validando a presença de carbono (C), oxigênio (O), fósforo (P) e cloro (Cl), e uma quantidade mínima nitrogênio (N). Para este EDX foram identificadas 2400 contagens.

Figura 49: Espectro de energia dispersiva de raios X (EDX) da membrana compósita – amostra 3



Fonte: CRTI, 2023.

Todas as espectrografias apontam que a composição química da mistura constituinte da membrana compósita apresenta grande quantidade de carbono (C) e concentração significativa de oxigênio (O) pois o material polimérico PU e os precursores (material lignocelulósico) do carvão ativado são compostos orgânicos.

O poliuretano é polímero resultante da combinação de PU A e PU B. A presença do N se justifica pelo constituinte do componente B - 2,4-diisocianato de difenilmetano. Os átomos de cloro (Cl) e fósforo (P) são provenientes do HCl utilizado na purificação do endocarpo *in natura* e do H₃PO₄ utilizado na ativação do carvão, respectivamente.

5.6 Verificação da funcionalidade do filtro composto confeccionado

5.7 Avaliação de retenção do Dióxido de Carbono (CO₂) no material composto produzido

Para verificar a funcionalidade do filtro composto utilizamos o veículo da marca Nissan, modelo Frontier 2015, versão S 4x4, motor a diesel. Este foi estacionado no pátio da UFT, campus Palmas-TO, e o coletor porta-membrana foi acoplado ao escapamento do veículo (figura 50).

Figura 50: Coletor porta-membrana acoplado ao veículo Frontier S 4x4



Fonte: autor.

O automóvel permaneceu estacionado, com o motor ligado e ausência de aceleração. A figura 51 mostra o marcador de combustível ao iniciarmos e finalizarmos o experimento, o que permite inferir que realmente ocorreu a queima do combustível.

Figura 51: Marcador de combustível



Fonte: autor.

Com o intuito de caracterizar a mistura gasosa resultante da combustão do diesel, considerando o pré-uso das membranas, mensurou-se a velocidade e a temperatura de vazão desta solução resultando em 5,5 m/s a 40,1°C (figura 52).

Figura 52: Velocidade e temperatura da vazão da mistura gasosa pré-uso das membranas compósitas



Fonte: autor.

Para cada amostra confeccionada (AM1, AM2 e AM3) foram feitas cinco repetições, logo um total de 15 membranas foram testadas. A membrana era inserida no coletor-porta membranas e o automóvel era ligado (figura 53).

Figura 53: Membranas em uso



Fonte: autor.

Todos os testes foram realizados em um único dia, demandando um tempo total de 5 horas. Cada membrana permaneceu em uso por 10 minutos e após este tempo foram acondicionadas individualmente em sacos plásticos lacrados para posterior análise.

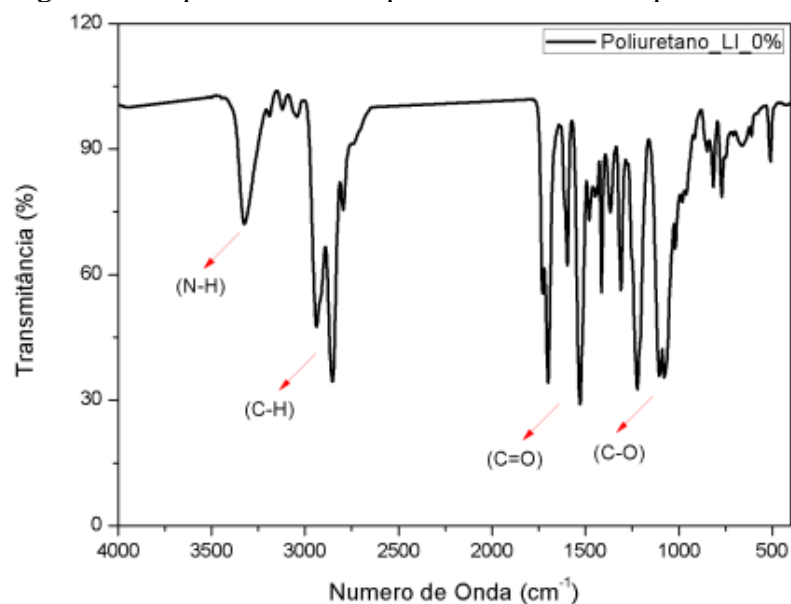
5.7.1 Espectroscopia de infravermelho (IRS)

A espectroscopia do infravermelho foi utilizada para examinar as alterações ocorridas nas bandas de absorção de cada grupo funcional e suas respectivas transmitâncias após o uso das membranas compósitas.

Segundo Vilani (2022) as bandas mais relevantes para caracterizar o espectro do polímero poliuretano puro são referentes as ligações do grupo funcional carbonila (C=O) livre e ligado por interação intermolecular (ligação de H com N-H) e do grupamento amina (N-H).

Neste espectro (figura 54) constata-se os picos: N-H no comprimento de onda 3325 cm^{-1} ; na faixa entre $2798\text{-}2941\text{ cm}^{-1}$ as ligações C-H referente a cadeia carbônica do polímero; nas bandas de 1529 cm^{-1} a carbonila C=O ligada e 1699 cm^{-1} a C=O livre e no intervalo de $1080\text{-}1223\text{ cm}^{-1}$ observa-se bandas referentes as vibrações axiais C-O.

Figura 54: Espectro de FTIR para a membrana de poliuretano



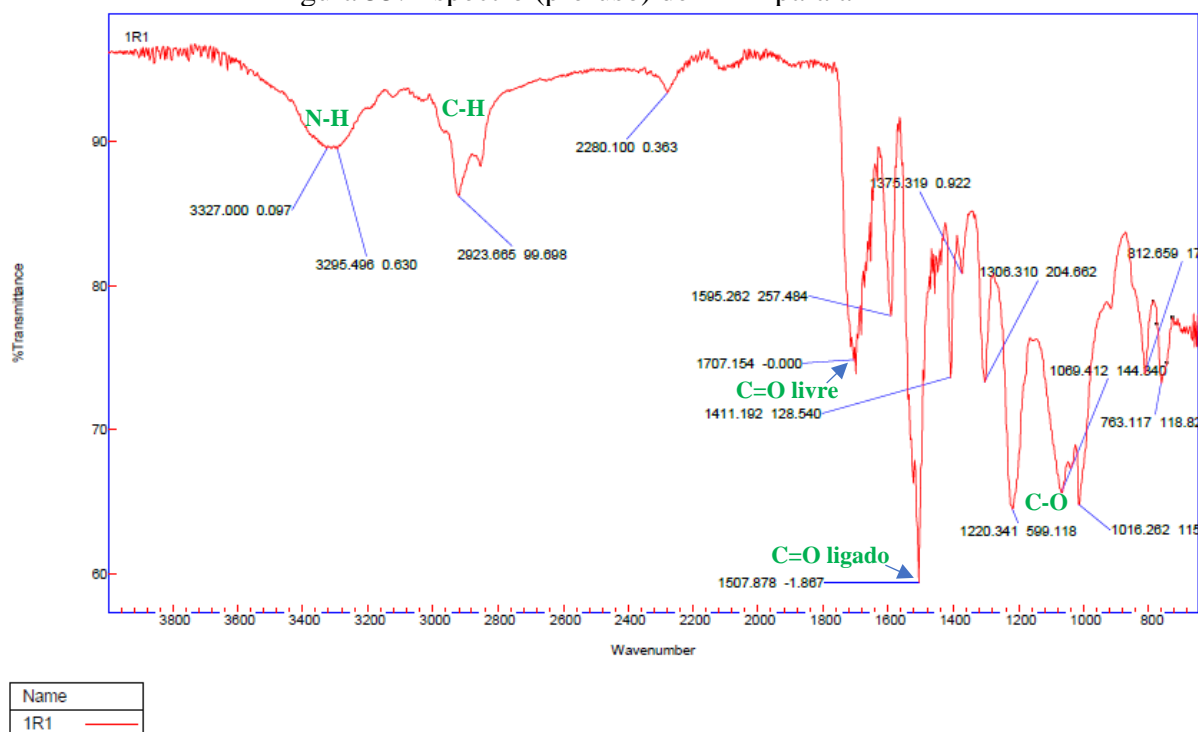
Fonte: Vilani, 2022.

Ao analisar os espectros (pré-uso) das membranas AM1, AM2 e AM3, considerando a repetição 1 para cada amostra, obteve-se imagens que apresentam como característica ligações

com os comprimentos de ondas semelhantes ao espectro do PU puro, padrão este observado em todas as repetições.

Na AM1 (figura 55) as bandas referentes a cada ligação apresentam as seguintes características: N-H e C-H com bandas de intensidade relativamente fracas e picos característicos em comprimentos de onda iguais a 3327 cm^{-1} e 2933 cm^{-1} , respectivamente; C=O livre com comprimento de onda de 1707 cm^{-1} e C=O ligado com pico intenso e estreito em 1507 cm^{-1} e para a ligação C-O duas bandas características no comprimento de onda de 1220 e 1069 cm^{-1} .

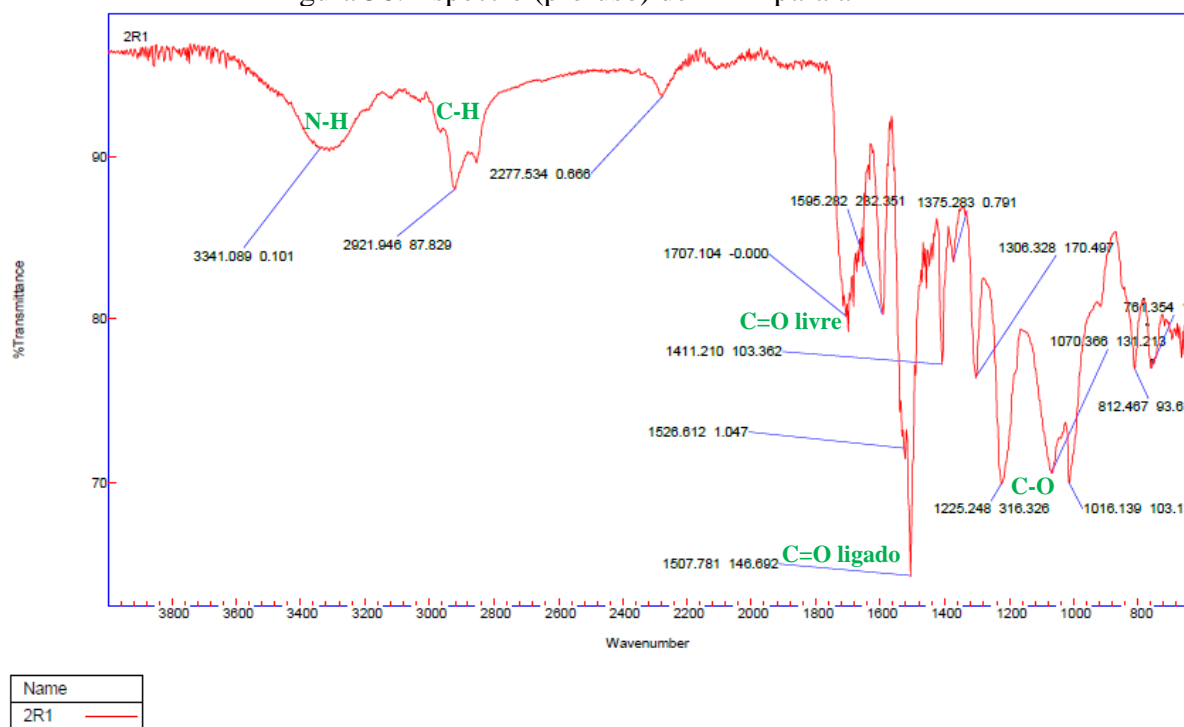
Figura 55: Espectro (pré-uso) de FTIR para a AM1



Fonte: LAPEQ, 2024.

Adotando como referência o espectro da amostra 1 observa-se que a adição de 1,6 gramas a mais de CA para compor a amostra 2 influenciou na transmitância e na área das bandas típicas de cada ligação.

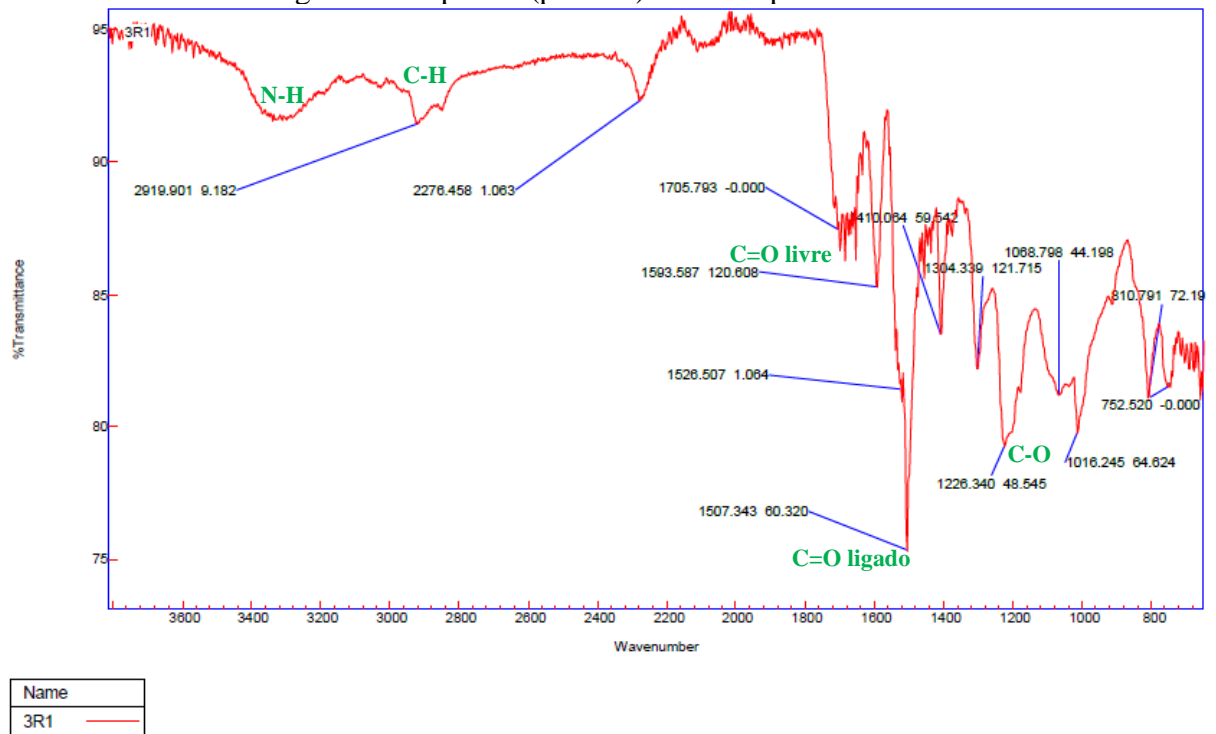
Figura 56: Espectro (pré-uso) de FTIR para a AM2



Fonte: LAPEQ, 2024.

O espectro da amostra 3 (figura 57) corrobora este fato, visto que apenas o pico de C=O ligado permanece com a característica original - estreito e intenso - observando-se alterações considerável nas bandas referentes as ligações de N-H, C-H, C=O livre e C-O.

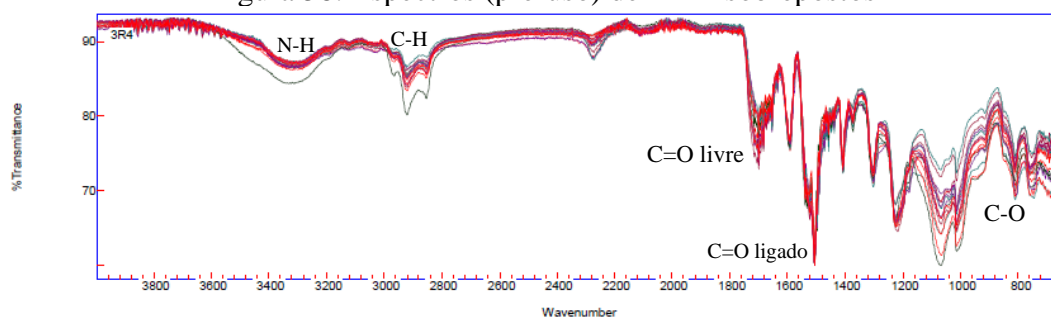
Figura 57: Espectro (pré-uso) de FTIR para a AM3.



Fonte: LAPEQ, 2024.

A sobreposição das imagens espectrais (figura 58) referentes as repetições mostram que os comprimentos de ondas de cada ligação são semelhantes independentemente da quantidade de CA incorporado na matriz, porém é nítida a diferença em relação a intensidade e a forma das bandas.

Figura 58: Espectros (pré-uso) de FTIR sobrepostos



Name	Color
1R4	Red
3R5	Red
1R1	Red
1R2	Purple
1R3	Green
1R5	Red
2R1	Purple
2R2	Green
2R3	Grey
2R4	Red
2R5	Red
3R1	Purple
3R2	Blue
3R3	Green
3R4	Red

Fonte: LAPEQ, 2024.

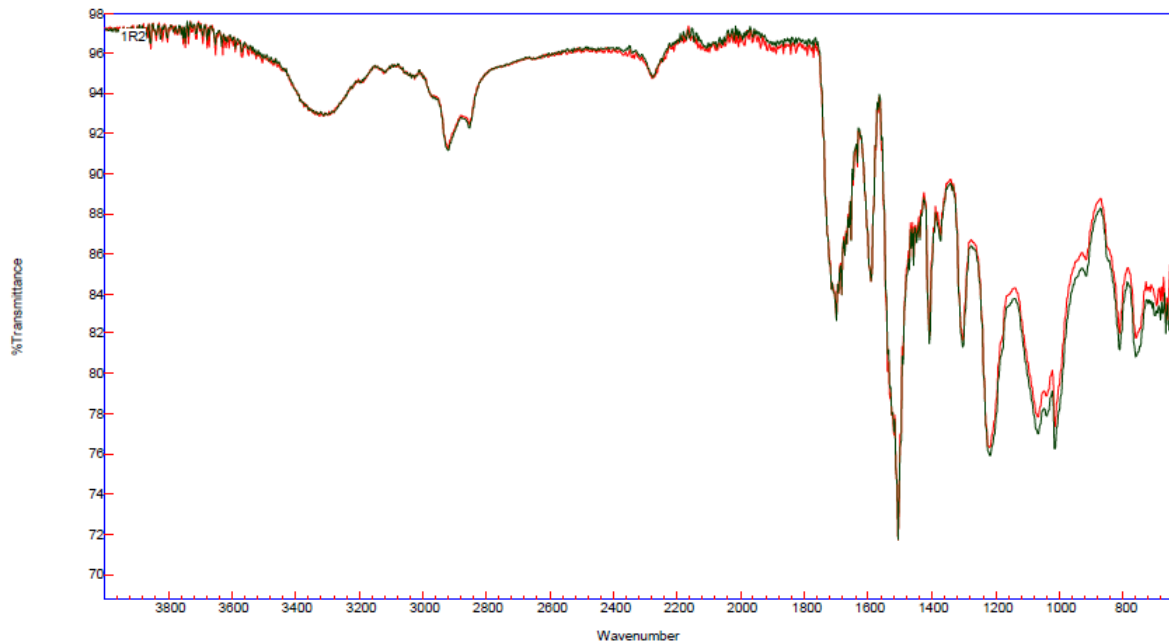
Apesar de apresentarem picos com comprimentos semelhantes observou-se que em todas as repetições espectrais o aumento da quantidade de carvão ativado alterou a interação da luz com a amostra.

Considerando os espectros referentes a repetição 1 demonstrados acima constata-se para a ligação C=O livre uma transmitância de 75% para AM1, 80% para AM2 e 87% para AM3 e na ligação C=O ligado 61% para a AM1, 65% AM2 e 76% AM3. Tais alterações são justificadas pela influência do CA na forma como as moléculas se organizam após a mistura matriz e reforço.

Após a aferição de sua aplicabilidade as membranas compósitas AM1, AM2 e AM3 foram submetidas novamente ao IRS. As imagens pós-uso foram sobrepostas com seus respectivos espectros pré-uso. Para validar as observações, que se configuram como um padrão em todas as amostras, utilizou-se a repetição 2.

A figura 59 refere-se as amostras AM1 pré-uso (curva vermelha) e pós-uso (curva preta) sobrepostas. A espectroscopia aponta uma diferença percentual de 2, 3, 4, 6 e 6% nas transmitâncias considerando as bandas características das ligações N-H, C-H, C=O livre, C=O ligado e C-O, respectivamente (tabela 3).

Figura 59: Espectros pré e pós-uso de FTIR AM1 sobrepostos



Name	Line Color
1R2 POS	Green
1R2	Red

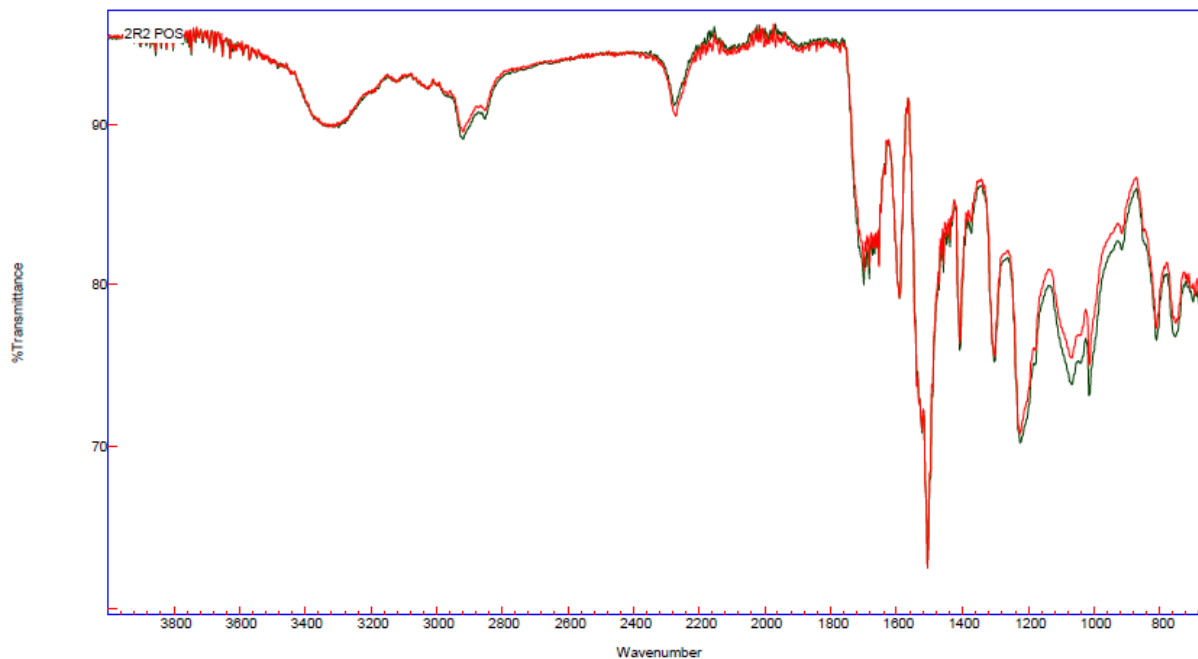
Fonte: LAPEQ, 2024.

Tabela 3 – Transmitâncias pré e pós – uso para as ligações N-H, C-H, C=O livre, C=O ligado e C-O para a AM1

Ligações	TRANSMITÂNCIAS (%)	
	Pré - uso	Pós -uso
N-H	93	91
C-H	92	89
C=O livre	83	79
C=O ligado	72	66
C-O	78 - 77	72 - 71

A amostra 2 possui as linhas espectrais (figura 60) com parâmetros semelhantes aos observados na amostra 1, apresentando variações de 2, 3, 6, 10 e 9% para as transmitâncias nas ligações N-H, C-H, C=O livre, C=O ligado e C-O, respectivamente (tabela 4).

Figura 60: Espectros pré e pós-uso de FTIR AM2 sobrepostos



Name
2R2 POS
2R2

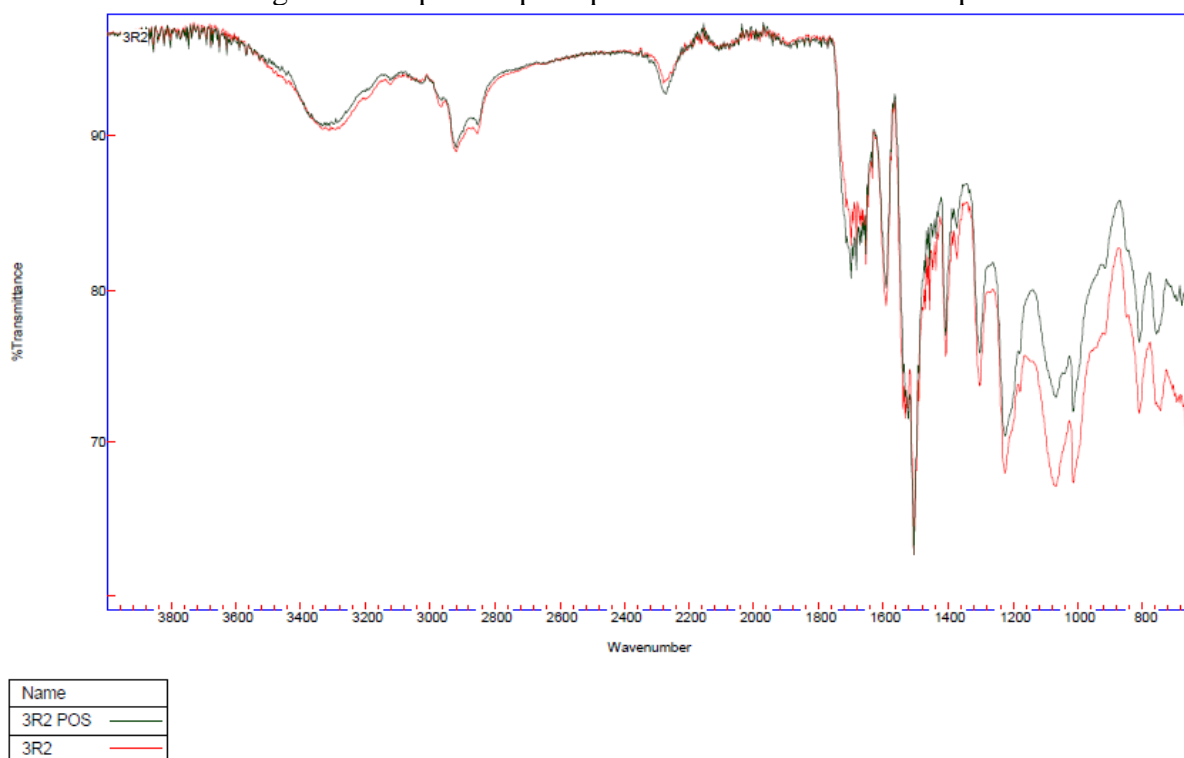
Fonte: LAPEQ, 2024.

Tabela 4 – Transmitâncias pré e pós – uso para as ligações N-H, C-H, C=O livre, C=O ligado e C-O para a AM2

Ligações	TRANSMITÂNCIAS (%)	
	Pré - uso	Pós -uso
N-H	93	91
C-H	93	90
C=O livre	87	81
C=O ligado	74	64
C-O	81-82	72-74

No espectro referente às sobreposições para AM3 (figura 61) nota-se variações de 5% apenas para as transmitâncias das ligações C=O ligado e para as vibrações axiais C-O (tabela 5).

Figura 61: Espectros pré e pós-uso de FTIR AM3 sobrepostos



Fonte: LAPEQ, 2024.

Tabela 5 – Transmitâncias pré e pós – uso para as ligações N-H, C-H, C=O livre, C=O ligado e C-O para a AM3

Ligações	TRANSMITÂNCIAS (%)	
	Pré - uso	Pós -uso
N-H	90	91
C-H	90	90
C=O livre	84	84
C=O ligado	64	69
C-O	71-67	76-76

Os espectros de infravermelho, comparando-se as membranas pré e pós exposição aos gases provenientes da combustão do diesel, revelaram valores com uma variação percentual para as transmitâncias em todas as ligações características da matriz polimérica, sendo os maiores índices, de 4 a 10%, referentes as ligações C=O livre, C=O ligado e C-O, isto demonstra a retenção e absorção de algum gás.

O dióxido de carbono é uma molécula apolar com geometria linear e apresenta deformações angulares que segundo Colati (2011) apresenta absorções intensas no comprimento de onda de 669 cm^{-1} .

Analisando este comprimento de onda nas repetições de número 2 nas amostras 1, 2 e 3 pré e pós-uso obtivemos os seguintes valores (tabela 6).

Tabela 6 – Transmitâncias pré e pós – uso para o comprimento de onda de 669 cm^{-1} para AM1, AM2 e AM3

TRANSMITÂNCIAS (%)		
Amostras	Pré - uso	Pós -uso
AM1	83	78
AM2	84	79
AM3	71	81

Os valores encontrados, para este comprimento de onda nas membranas pós-uso demonstram uma variação percentual de 5 a 10% nas transmitâncias podendo evidenciar uma possível absorção deste gás sendo necessário utilizar outras técnicas de caracterização como a espectroscopia de Raman que estuda a vibração e a rotação das moléculas e um teste de seletividade e permeabilidade comparando os gases N_2 e CO_2 já que estes são os mais abundantes no processo de pós-combustão.

Vale destacar que Sodré (2022) em seus testes de adsorção utilizando membranas de matriz mista com a matriz de poliuretano e reforço de UiO-66, UiO-66-NH₂ e MIL-53 (Al) afirma que a temperatura, pressão e o fator tempo influenciam diretamente na capacidade de adsorção do gás, concluindo que, de um modo geral, o aumento da temperatura diminui a taxa de adsorção e a elevação da pressão aumenta.

5.8 – Análise estatística

As membranas compósitas AM1, AM2 e AM3 após a incidência por IRS tiveram suas transmitâncias determinadas para os comprimentos de onda de 650, 2400 e 4000 cm^{-1} , subsequentemente foram submetidas a análise de variância (ANOVA).

Os resultados da ANOVA obtidos para o comprimento de onda 650 cm^{-1} estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – ANOVA dos tratamentos da transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 650 cm^{-1}

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F calculado
Tratamento	2	16,533333	8,266667	0,5000
Erro	12	198,400000	16,533333	
Total	14	214,933333		

OBS: Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

O F calculado evidenciado na Tabela 7 permite concluir que o teste é não significativo considerando 5% de probabilidade. Após o teste F estes dados de IRS foram submetidos ao teste de Tukey e os resultados observados estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Médias de transmitância das amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 650 cm⁻¹

Membranas Compósitas	Médias de Tratamento	
AM1	79,8	a1
AM2	80,2	a1
AM3	82,2	a1

Coefficiente de variação (CV%) = 5,04%
Diferença Mínima Significativa = 6,8642

Os valores 79,8%, 80,2% e 82,2% dispostos na Tabela 8 remetem a média das transmitâncias para as repetições das amostras AM1, AM2 e AM3 respectivamente no comprimento de onda de 650 cm⁻¹ tendo um coeficiente de variação (CV) de 5,04% e uma Diferença Mínima Significativa (DMS) de 6,8642. A letra a1, que acompanha cada um dos valores na Tabela 8, retrata que as membranas compósitas apresentam a mesma transmitância neste comprimento de onda.

A Tabela 9 apresenta os valores obtidos para a ANOVA no comprimento de onda de 2400 cm⁻¹.

Tabela 9 – ANOVA dos tratamentos da transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 2400 cm⁻¹

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F calculado
Tratamento	2	12,933333	6,466667	1,658
Erro	12	46,800000	3,900000	
Total	14	59,733333		

OBS: Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Considerando 5% de probabilidade para o teste F, o F calculado obtido na tabela acima resulta em um teste não significativo. Estes dados de IRS foram submetidos ao teste de Tukey e os resultados estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Médias de transmitância das amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 2400 cm^{-1}

Membranas Compósitas	Médias de Tratamento	
AM1	94,2	a1
AM2	94,8	a1
AM3	96,4	a1

Coefficiente de variação (CV%) = 2,08%

Diferença Mínima Significativa = 3,3338

A média dos tratamentos para cada amostra no comprimento de onda de 2400 cm^{-1} foram 94,2% para AM1, 94,8% para AM2 e 96,4% para AM3 com um CV de 2,08% e uma DMS de 3,3338. Estes dados indicam que as membranas compósitas apresentam a mesma transmitância neste comprimento de onda.

Por fim, para o comprimento de onda de 4000 cm^{-1} têm-se os seguintes resultados (Tabela 11).

Tabela 11 – ANOVA dos tratamentos da transmitância para as amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 4000 cm^{-1}

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F calculado
Tratamento	2	26,800000	13,400000	1,451
Erro	12	110,800000	92,233333	
Total	14	137.600000		

OBS: Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

O F calculado, obtido neste comprimento de onda, comparado ao F tabelado resulta em um teste não significativo. O teste de Tukey e os resultados estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12– Médias de transmitância das amostras AM1, AM2 e AM3 no comprimento de onda 4000 cm^{-1}

Membranas Compósitas	Médias de Tratamento	
AM1	95,2	a1
AM2	96,2	a1
AM3	98,4	a1

Coeficiente de variação (CV%) = 3,15%

Diferença Mínima Significativa = 5,1296

Um CV de 3,15%, uma Diferença Mínima Significativa (DMS) de 6,8642 e médias de 95,2%, 96,2% e 98,4% para as amostras AM1, AM2 e AM3, respectivamente mostram que não há diferença nos tratamentos quanto a transmitância.

A análise estatística demonstrou que a quantidade de CA, 0,8g na AM1, 2,4g na AM2 e 4g na AM3, não alterou a fração de luz incidente nas amostras nos comprimentos de ondas fixados, sendo as amostras portanto estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

6 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido nessa dissertação teve como objetivo principal a confecção e a caracterização de uma membrana compósita com a matriz polimérica constituída por espuma de poliuretano, resultante da mistura dos componentes PU A e PU B, incorporada ao carvão ativado do endocarpo da macaúba para aplicação de captura de CO₂ pós-combustão realizada de forma direta em motor a diesel. Simultaneamente foi realizada a técnica de IRS para caracterizar o filtro pós-uso, de modo a fundamentar o trabalho e os resultados obtidos.

Ao analisar fisicamente o carvão ativado obteve-se um teor de cinzas de 35,34%, sendo este valor justificado pela perda de parte da matéria orgânica na carbonização do endocarpo. A MEV mostra que o material produzido apresenta superfícies irregulares, heterogêneas, rugosas com poros bem distribuídos em diferentes formatos e dimensões.

Quimicamente a TGA e a DSC pontuam que o 58,59% da massa amostral CA se decompõe, liberando energia, entre as temperaturas de 360°C e 700°C. O EDX comprovou que o carvão ativado apresenta alto teor de carbono, quantidade expressiva de oxigênio, traços de alumínio e silício oriundos do solo, cloro e fósforo provindos do processo de purificação e ativação deste.

As membranas compósitas foram produzidas fixando a massa da matriz polimérica em 8 gramas variando apenas a massa do reforço, o carvão ativado, resultando na AM1 com 0,8 gramas de CA, AM2 com 2,4 gramas e AM3 com 4 gramas. Para definir a melhor proporção entre os componentes PU A e PU B vários testes foram realizados e a membrana que apresentou a melhor textura e o menor número de poros visíveis continha 5g PU B, carvão ativado e 3g de PU A, adicionados nesta sequência. Com um diâmetro de 50 mm e 5 mm de espessura foram feitas cinco repetições para cada amostra.

Fisicamente as amostras foram caracterizadas por MEV. As micrografias mostraram que o CA foi incorporado pela matriz ocupando alguns dos bolsões que surgem durante a expansão da espuma. Quimicamente o EDX corrobora a constituição da membrana orgânica com C, O, N proveniente do PU B e traços de Cl e P. A TGA e DSC apontam que, independentemente da amostra, todas as membranas são termicamente estáveis até a temperatura de 270°C o que agrega potencial para a aplicação em processos de captura de CO₂ em correntes de pós-combustão.

O teste de funcionalidade das 15 membranas foi realizado de forma direta, com a mesma acoplada no escapamento do veículo de motor a diesel ocorrendo a troca dos filtros a cada 10 minutos. Não houve aceleração do veículo e o consumo de combustível confirmou a ocorrência da combustão.

Todas as membranas foram submetidas ao IRS antes e pós-uso. Os espectros pré-uso confirmaram que as membranas possuem a mesma estrutura, com ligações químicas características em comprimentos de ondas definidos e que o aumento da concentração de CA influenciou na interação da luz.

Os espectros IRS pós-uso não apresentaram alterações nos comprimentos de ondas de ligações pré-definidas. Contudo a sobreposição das imagens antes e após o teste de funcionalidade da membrana revelaram valores diferentes para as transmitâncias, com variações percentuais de 2 a 10% em determinados comprimentos de onda, demonstrando a retenção e absorção de gases.

Considerando que este trabalho foi desenvolvido em condições experimentais diferentes das propostas por Sodré (2022) vale ressaltar que fatores como a pressão, a temperatura e tempo influem diretamente na taxa de adsorção do gás.

Contudo a análise estatística concluiu que nas membranas pós-uso a quantidade de CA adicionada em cada amostra não interferiu na incidência da luz, logo a hipótese nula não foi rejeitada.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Realizar teste de permeabilidade e seletividade de gases.
- ✓ Realizar a espectroscopia de Raman.
- ✓ Realizar o teste em ambientes onde é possível controlar a temperatura e a pressão pois essas variáveis influenciam na captura do gás.
- ✓ Realizar novos teste incluindo o fator tempo como variável permitindo assim comparações entre as imagens espectrais.
- ✓ Realizar teste com a combustão de outros combustíveis como a gasolina e o etanol.

8 REFERÊNCIAS

- ABNT. **Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio**. [S.l.], 1986.
- ALIMENA, Luiz Alberto Moura. **Estudo comparativo do coeficiente de condutividade térmica de espuma rígida de poliuretano obtida por reciclagem mecânica e química**. 2009. 56f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- ALMEIDA, Frederico Borges de. **Comportamento das fibras agroenergéticas de coco de babaçu em matrizes poliméricas**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017.
- ARTIAGA, Kelly Christine Maruch. **Desenvolvimento e aplicação do compósito plástico-madeira (Poliuretano/resíduo de MDF) na indústria de bases de calçados**. 2014. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- BARBETTA, Pedro Alberto; REIS, Marcelo Menezes; BORNIA, Antonio Cezar. **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. São Paulo: Atlas, 2004.
- BARROSO, Ellys Amália Aguiar et al. Emissão do gás carbônico a partir de combustíveis de automóveis. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 2, n. 1, p. 27-32, 2014.
- BARRETO, Luciano; FREITAS, Andréia Cristina; PAIVA, Lúcia. **Sequestro de carbono**. Enciclopédia Biosfera, v. 5, n. 7, 2009.
- BIANCHINI, Roberto Hasson Levi. **Estudo comparativo da absorção e dessorção de dióxido de carbono em colunas para solução de aminas: monoetileno amina e monodietil amina/piperazina**. 2018. 147f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- BRANDÃO, Ana Carolina Tolentino; QUEIROZ, Vânia; SILVA, Ramon Geraldo Campos. Síntese e caracterização de carvão ativado quimicamente com H₃PO₄ e NaOH à partir da casca de pequi (Caryocar brasiliense). **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 60945-60962, 2020.
- CANGEMI, José Marcelo; SANTOS, AM dos; CLARO, N. S. Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. **Química Nova na Escola**, v. 31, n. 3, p. 159-164, 2009.
- CARDOSO, Bruno Monteiro. **Uso da biomassa como alternativa energética**. 2012. 94f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- CASTANHO, Davi Homem de Mello. **Desenvolvimento de material zeolítico de alta pureza a partir de cinzas de carvão para aplicação na captura de dióxido de carbono**. 2019. 110f. Dissertação (mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. 2019.
- COELHO, Suani T. Bioenergia. **Brasília, DF, Ministério de Minas e Energia**, 1982.

COLATI, Keroly Alaíde Pascoal et al. Construção de uma célula de gás de baixo custo para análise no infravermelho. **Química Nova**, v. 34, p. 864-867, 2011.

COSTA, Ana Catarina Fernandes. **Estudo das propriedades termofísicas dos solventes eutéticos e desenvolvimento de novas membranas sustentáveis para a separação de CO₂**. 2016. 114f. Dissertação (mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

DANTAS, Taisa Cristine de Moura. **Síntese e caracterização de materiais mesoporos inorgânico-orgânicos para aplicação na adsorção de gás carbônico**. 2016. 133f. Tese (Doutorado em Química) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016

DANTAS, Tirzhá Lins Porto *et al.* **Separação de dióxido de carbono por adsorção a partir de misturas sintéticas do tipo gás de exaustão**. 2009. 172f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Santa Catarina, 2009.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EdiPUCRS, 2007.

DE LIMA RIBEIRO, Ana Paula Alves; LOPES, Kelson Carvalho. Carvão ativado de endocarpo de macaúba (*Acrocomia aculeata*) para adsorção de CO₂ emitido pela queima do bagaço da cana-de-açúcar1. **Processos Químicos e Biotecnológicos Volume 9**, p. 6. 2022. DOI: 10.36229/978-65-5866-197-9.CAP.01

DE MIRANDA, Ronaldo Leão; MARTINS, Eliane Maria; LOPES, Kamila. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. **Desenvolvimento Socioeconômico em Debate**, v. 5, n. 1, p. 94-106, 2019.

DENG, Hui et al. Otimização da preparação de carvão ativado a partir de talo de algodão por ativação química de ácido fosfórico assistida por micro-ondas. **Revista de Materiais Perigosos**, v. 182, n. 1-3, pág. 217-224, 2010.

DIOGENES, Thalles Senna. **Captura de CO₂ em zeólita natural por adsorção**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

DOS SANTOS, Rodrigo Miguel; DE SÁ RODRIGUES, Marilsa; CARNIELLO, Monica Franchi. Energia e sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira. **Scientia: Revista Científica Multidisciplinar**, v. 6, n. 1, p. 13-33, 2021.

DRUMM, Fernanda Caroline *et al.* Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 66-78, 2014.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2022: Ano Base 2021, 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022> Acesso em: 25 fev. 2023.

SOUZA, Joyce Nascimento *et al.* Edaphic and climatic control of macaúba palm seed bank dynamics. **Industrial Crops and Products**, v. 141, p. 111802, 2019.

EVARISTO, Anderson Barbosa *et al.* Potencial energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 571-577, 2016.

FEARNSIDE, Philip M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, v. 16, p. 99-123, 2002.

FGV ENERGIA (Centro de estudos de energia da Fundação Getúlio Vargas). **Dados – Matriz Energética (2020)**. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica> Acesso em: 25 fev. 2023.

FIGUEIREDO, Héliida Cristina Noronha. **Obtenção e caracterização de compósitos biodegradáveis a partir de resíduos agroenergéticos**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

FIORIO, Rudinei. **Síntese e caracterização de poliuretano termoplástico contendo poss via extrusão reativa**. 2011. 135f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Química. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre, 2011.

FRAGÃO, Sónia Cecília Cardoso. **Membranas compósitas para a separação de CO₂**. 2015. Tese de doutorado – Universidade de Aveiro, Portugal, 2015.

FRANCO, Mariana Borges. **Desenvolvimento de membrana hidrofóbica para a utilização em contactores de membranas para separação do CO₂**. 2021. 81f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2021.

FREITAS, Cleírton Moraes. **Processos de separação de CO₂ a partir de absorção utilizando aminas: revisão**. 2019. 73f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró -RN, 2019.

FRIEDRICH, Johannes; GE, Mengpin; PICKENS, Andrew. A trajetória dos 10 maiores emissores de carbono desde o Acordo de Paris em gráficos interativos. **Brasil: WRI Brasil**, v. 9, 2023. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/trajetoria-dos-10-maiores-emissores-de-carbono-desde-o-acordo-de-paris-em-graficos> Acesso em: 25 fev. 2023.

FLORES, Marcelo Costa *et al.* **Membranas de matriz mista preparadas a partir da dispersão de nanotubos de carbono funcionalizados com grupos oxigenados em polissulfona: Caracterização e aplicação para separação de CO₂**. 2021. 116f. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

GOLDEMBERG, José. **Biomassa e energia**. Química nova, v. 32, p. 582-587, 2009.

GOMES, Hiago dos Reis. **Estudo do comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de cânhamo**. 2022. 67f. Dissertação (mestrado), UniEvangélica, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2022.

GONÇALVES, Thaís Matiello. **Caracterização de filmes finos obtidos por deposição de vapor químico assistido a plasma (PECVD) e deposição e implantação iônica por imersão em plasma (PIID)**. 2012. 174 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Sorocaba, 2012.

HABERT, Alberto Cláudio; BORGES, Cristiano Piacsek; NOBREGA, Ronaldo. **Processos de separação por membranas**. Editora e-papers, 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?ano=2022&indicador=28120&tipo=grafico> Acesso em: 23 dez. 2023.

IPCC 2008, 2006 IPCC **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – A primer, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**, Eggleston H.S., Miwa K., Srivastava N. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

JUNGES, Alexandre Luis et al. Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências. Cuiabá. Vol. 13, n. 5 (dez. 2018), p. 126-151**, 2018.

LEITE, Vinicius Pazini; DEBONE, Daniela; MIRAGLIA, Simone Georges El Khouri. Emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: análise do setor de transportes e impactos na saúde. **VITTALLE-Revista de Ciências da Saúde**, v. 32, n. 3, p. 143-153, 2020.

MANFIO, Candida Elisa et al. Repetibilidade em características biométricas do fruto de macaúba. **Ciência Rural**, v. 41, p. 70-76, 2011.

MARQUES, Rafael Moreira. **Avaliação técnico-econômica da casca, do endocarpo de macaúba e do bagaço de cana-de-açúcar para uso em cogeração de energia elétrica**. 2021. 50 f., il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química Tecnológica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

MARTINS, Ana Patrícia dos Santos. **Preparação e caracterização de membranas de matriz mista com carvão ativado para aplicação em processos de captura de CO₂**. 2017. 76f. Dissertação (mestrado), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

MARTINS, Aryane Christine Neves; RUGNO, Igor de Queiroz. **Avaliação do processo de absorção de CO₂ em coluna de pulverização empregando soluções de NaOH e Ca(OH)₂**. 2021.

Ministério da Infraestrutura, SENATRAN - Secretaria Nacional de Trânsito – 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-senatran/frota-de-veiculos-2022> Acesso em 13 jan. 2024.

MOREIRA, Sandro LS *et al.* Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256, p. 379-390, 2018.

MOTA, Clenilso Sehnen *et al.* Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 41-50, 2011.

MOTTA, Paulo Emílio Ferreira da *et al.* Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 37, p. 1023-1031, 2002.

MOTHÉ, Cheila G.; ARAUJO, Carla R. de. Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá. **Polímeros**, v. 14, p. 274-278, 2004.

MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações). **Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-Quadro das nações unidas sobre Mudança do clima**. 2010. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/2comunicacao/scn_portugues_volume-1-compactado.pdf Acesso em 26 jun. 2023.

NABAIS, Ana Rita Mileu Mota. **Preparação e caracterização de membranas de matriz mista para separação de CO₂**. 2016. 84f. Dissertação (mestrado), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

NASTARI, Plínio Mário. A importância dos critérios de sustentabilidade para o uso de energia. **AgroANALYSIS**, v. 40, n. 1, p. 26-27, 2020.

NASCIMENTO, Alexandra Rodrigues do. **Síntese e caracterização de materiais mesoporosos para a captura de CO₂: influência do óxido de níquel**. 2014. 125f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

NETO, Benedito Silva. Limitação da emissão de gases de efeito estufa, desmatamento e crescimento econômico no Brasil: uma análise prospectiva. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 18, n. 4, out/dez, p. 5-26, 2021.

NICOLAU, Olivia Nascimento Boldrini; CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; ZANCHETTA, Igor Tureta. Avaliação do consumo energético e emissões de dióxido de carbono do transporte rodoviário do Brasil (2016-2026). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 54, 2020.

OLIVEIRA, Vitória Mariana Silva de *et al.* **Síntese e caracterização de dispersões aquosas de poliuretano**. 2008. 110f. Dissertação (mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

OSHITA, Marcela Gimenes Bera. **Energia e crescimento econômico no Brasil**. 2019. 113 f. Tese (doutorado em Economia) - Universidade Estadual de Maringá, 2019, Maringá, PR. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/6369> Acesso em: 11 fev. 2022

PEIXER, Janaína Freiberger Benkendorf *et al.* **A contribuição nacionalmente determinada do Brasil para cumprimento do Acordo de Paris: metas e perspectivas futuras**. 2019. 346f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Jurídicas, Programa de Pós-Graduação em Direito, Florianópolis, 2019.

POTENZA, Renata Fragoso, *et al.* **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2020**. SEEG: São Paulo, SP, Brazil, 2021.

Portal da Macaúba. Disponível em: www.portalmacauba.com.br. Acesso em: 07 set. 2022.

PROVENZI, Eduarda Laís Dalmolin *et al.* Estudo da adsorção de tetraciclina em uma matriz de poliuretano expandido com carvão ativado de casca de banana. **Revista Tecnológica**, v. 29, n. 2, p. 430-435, 2020.

- RATTER, James Alexander; BRIDGEWATER, Sam; RIBEIRO, José Felipe. Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation III: comparison of the woody vegetation of 376 areas. **Edinburgh journal of botany**, v. 60, n. 1, p. 57-109, 2003.
- REI, Fernando Cardozo Fernandes; GONÇALVES, Alcindo Fernandes; DE SOUZA, Luciano Pereira. Acordo de Paris: reflexões e desafios para o regime internacional de mudanças climáticas. **Veredas do Direito**, v. 14, n. 29, p. 81-99, 2017.
- RENCORET, Jorge et al. Variability in lignin composition and structure in cell walls of different parts of macaúba (*Acrocomia aculeata*) palm fruit. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 66, n. 1, p. 138-153, 2018.
- RESENDE, Susana Fátima. **Síntese de materiais compósitos TiO₂-SiO₂ via sol-gel para adsorção de água**. 2014. 134f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- RIBEIRO, Ana Paula Alves de Lima *et al.* **Carvão ativado de endocarpo de macaúba (*acrocomia aculeata*) para adsorção de CO₂ emitido pela queima do bagaço da cana-de-açúcar**. 2019. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- RIOS, Regiane Débora Fernandes et al. **Produção de materiais baseados em carvão ativado granular obtidos de resíduos do endocarpo da macaúba e da mineração de ferro para remediação ambiental**. 2019. 140f. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- RONCONI, Celia M.; DOS SANTOS, Thiago C. Captura de CO₂ em materiais híbridos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 1, p. 112-130, 2014.
- SAN MARTIN, Maristel Coelho; SAN MARTIN, Meister Coelho. Condições atuais das emissões dos poluentes atmosféricos durante a quarentena da Covid-19 e as perspectivas futuras. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 2, n. 5, p. 85-96, 2020.
- SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. Edipro, 2019.
- SEADER, Junior D.; HENLEY, Ernest J.; ROPER, Keith. **Separation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations**. 3 ed. United States of America: John Wiley & Sons. Inc. 2011.
- SILVA, Jailson Santos. **Efeito das condições de pirólise no preparo do carvão vegetal de coco babaçu utilizando-se radiação de micro-ondas**. 2019. 24f. Trabalho De Conclusão De Curso. Universidade Estadual Do Maranhão-Campus Caxias, 2019.
- SILVA, Lucas *et al.* **Balanco de Emissão e Neutralização de GEE**. 2019. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/9474/1/Balan%20de%20Emiss%20e%20Neutraliza%20de%20GEE.pdf> Acesso em 10 set. 2023.
- SILVA, Rosana Vilarim da. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, Silvia Caroline Gomes dos Santos. **Síntese de materiais compósitos micro-mesoporosos visando a captura de CO₂**. 2015. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

SILVEIRA, Andresa Rodrigues da *et al.* **Desenvolvimento de materiais compósitos geopolímero-zeólita derivados de resíduos industriais para adsorção de CO₂**. 2021. 85f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2021.

SODRÉ, Hiasmin Christine Kurre Pinheiro. **Uso de materiais nanoestruturados com UiO-66, UiO-66-NH₂ e MIL-53 (Al) em membranas mistas de poliuretano para captura e separação de CO₂ e metano**. 2022. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

SOUSA, Laura Vieira Maia de. **Caracterização energética da macaúba (Acrocomia aculeata)**. 2020. 74 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SOUZA, Maria Cristina Oliveira; CORAZZA, Rosana Icassatti. Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 42, 2017.

SPIEKERMANN, Fernando Ludgero. **Caracterização química e cinética da semente de abacate e dos biocarvões obtidos utilizando análise termogravimétrica**. 2021. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

STEFANELLO, Raquel et al. Efeito da luz, temperatura e estresse hídrico no potencial fisiológico de sementes de funcho. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 28, n. 2, p. 135-141, 2006.

TAKADA, Camila Rosa da Silva. **Obtenção de materiais compósitos a partir de resíduo agroenergético: caso do aproveitamento da palha da cana-de-açúcar**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2014.

TEIXEIRA, Josué da Luz. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco verde**. 2020. 88f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

TORRES, Leandro Marques *et al.* Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente. **Naturae**, v. 2, n. 1, p. 23-33, 2020.

VIEIRA, Ana Carla. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 72f. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VILANI, Cecília. **Síntese e caracterização de membranas de matrizes mistas baseadas em dispersão de líquido iônico em poliuretano ou PEBA para separação de CO₂/N₂**. 2022. 123f. Dissertação (mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

WONG, Sam; BIOLETTI, Rob. Carbon dioxide separation technologies. **Alberta Research Council**, 2002. Disponível em:
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b4c8769ad0f6d605eef2f69ab43ccdaceff510e7> Acesso em 14 set. 2023.