

Obtenção, caracterização e avaliação de membranas poliméricas à base de lignina e amido termoplástico para separação de CO₂

Ana Paula Rodrigues de Souza ^a, Daniel Pasquini ^b, Silvio Vaz Jr ^{bc}.

^aEstudante do Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), nível doutorado. E-mail: anapaulars@ufu.br

^bProfessor do Departamento de Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: daniel.pasquini@ufu.br, silvio.vaz@embrapa.br

^cPesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). E-mail: silvio.vaz@embrapa.br

Resumo: A tecnologia de separação de gases através de membranas se mostra promissora diante da sua processabilidade e aplicação. Esse trabalho tem como objetivo obter e caracterizar membranas poliméricas renováveis (MPR) para separação de dióxido de carbono (CO₂). A metodologia consiste em duas etapas: 1) oxipropilação de ligninas e 2) obtenção de MPR a partir da adição de amido termoplástico (ATP). FTIR, TGA e MEV foram realizadas nas MPR. Dióxido de titânio (TiO₂) foi adicionado ao material visando a otimização dos parâmetros de permeação. As MPR sem TiO₂ não se mostraram favoráveis à permeação de nitrogênio (N₂) e CO₂, enquanto as MPR com TiO₂ apresentaram resultados promissores para a permeação de CO₂. Diante disso, a utilização de TiO₂ se faz essencial na composição das MPR.

Palavras-chave: mudanças climáticas, gases do efeito estufa, CCU, sustentabilidade, biopolímeros.

1 - Introdução

Descarbonização trata-se do processo de redução ou eliminação dos Gases do Efeito Estufa (GEE) da atmosfera e visa contribuir para a minimização dos impactos ambientais causados pelas emissões descontroladas desses gases, dentre eles: o aquecimento global (Vaz et al., 2022). Para isso, pesquisadores no mundo todo tem direcionado esforços para a implementação de tecnologias que promovam a descarbonização, especialmente de atividades

detentoras de maior potencial poluidor como o setor energético e industrial de origem fóssil (Nath et al., 2024).

A CCUS (*Carbon Capture Utilisation and Storage*) é uma abordagem com grande destaque na literatura e corresponde a captura, utilização e armazenamento de GEE, especialmente o CO₂ (gás com maior índice de emissões para a camada atmosférica) (Moioli et al., 2024). Trata-se, portanto, de um conjunto de processos que impulsiona o uso de tecnologias verdes para

4º WORKSHOP DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS UFVJM-UFU

mitigação dessas emissões e atende o 13º Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) determinado pela Organização das Nações Unidas (ONU), que trata sobre as Ações Climáticas (United Nations, 2024).

Um dos mecanismos de maior destaque que incorpora a CCUS é a separação de gases de fontes como plantas termoelétricas (Pal e Agarwal, 2024). Neste sentido, tecnologias que utilizam membranas para separação de gases se mostram eficientes e promissoras (Han e Ho, 2021).

Torre-Celeizabal et al. (2023) ressaltam a importância de se obter membranas de separação a partir de materiais sustentáveis, fortalecendo a descarbonização de grandes fontes de emissão de GEE ao utilizar componentes da biomassa como matérias-primas para materiais de separação.

A utilização de biomassas para obtenção de produtos sustentáveis é almejada especialmente pela disponibilidade e propriedades de cada uma delas que podem variar desde as físico-químicas – biocompatibilidade, interações entre ligações, absorção e adsorção, reatividade, rendimento e comportamento mecânico (Boontongto et al., 2024; Li et al., 2024; Mansy et al., 2024) – até as propriedades de caráter econômico, social e ambiental.

A lignina, por exemplo, é uma componente da biomassa lignocelulósica abundante e de baixo custo. Além disso, possui propriedades valiosas como biodegradabilidade (Nezafat et al., 2023), é isenta de toxicidade e é altamente

versátil em suas aplicações (Hatakeyama e Hatakeyama, 2009).

Diante disso, a oxipropilação de ligninas é uma técnica utilizada para obtenção de polióis onde o objetivo da reação é modificar a substância de modo a promover a inserção de hidroxilas (grupo funcional que facilita outras reações), permitindo a utilização desses polióis na obtenção de poliuretanos e poliésteres, que são substâncias de interesse industrial (Pinto et al., 2020; Li et al., 2020).

Em contrapartida, blendas poliméricas à base de amido de milho são bastante estudadas para obtenção de filmes poliméricos para diversas aplicações, como para obtenção de embalagens biodegradáveis para alimentos (Admase et al., 2022; Mangaraj et al., 2022) e substituição polímeros - como espumas - de origem petrolífera (Engel et al., 2019).

O amido de milho, assim como a lignina, é um recurso renovável e de fácil disponibilidade, possibilitando a formulação de produtos verdes capazes de substituir produtos convencionais à base de recursos fósseis.

O projeto de pesquisa em questão tem como objetivo obter, caracterizar e otimizar os produtos das duas primeiras etapas experimentais do doutorado a partir da oxipropilação de ligninas e preparo de blendas poliméricas utilizando o amido de milho como aditivo para a produção de membranas renováveis, a partir das ligninas oxipropiladas. TiO₂ foi utilizado como aditivo, visando otimizar parâmetros diretamente

ligados à permeação das membranas poliméricas (Rebouças et al., 2021).

2 - Material e Métodos

A obtenção das blendas poliméricas - como primeiro passo para o desenvolvimento das membranas renováveis para separação de CO₂ -, e suas caracterizações físico-químicas foram realizadas através das seguintes etapas: oxipropilação de ligninas, adição de amido e caracterizações.

2.1 Oxipropilação de ligninas

A oxipropilação de ligninas foi realizada em reator de aço inoxidável (Figura 1) e seus parâmetros (temperatura, concentração de reagentes e tempo de reação) foram otimizados visando a modificação efetiva das ligninas.



Figura 1. Reator de aço inoxidável utilizado na reação de oxipropilação.

Dois tipos de ligninas foram selecionados para serem oxipropiladas: 1) lignina alcalina de alta pureza da Sigma-Aldrich (LAP); e 2) lignina comercial tipo Indulin AT da Ingevity (LAT).

Em reator de aço inoxidável foram adicionados 50 mL de óxido de propileno (OP) da marca SIGMA-ALDRICH com $\geq 99\%$ de pureza, 10 g de lignina *in natura* e 0,5 g de hidróxido de sódio (NaOH) como catalizador, da marca SIGMA-ALDRICH na razão de 1:20 (m/m) em relação à amostra de lignina.

Após a mistura dos reagentes, o reator foi fechado e a amostra foi submetida à pressão para que ocorresse a oxipropilação. As ligninas foram oxipropiladas, uma de cada vez, à temperatura de 170 °C, durante 60 min, utilizando-se sistema de agitação mecânica durante todo o processo, visando a homogeneização da amostra. A mistura foi retirada e mantida em recipiente à temperatura ambiente. Nessa etapa foram obtidas as amostras de LAP oxipropilada (LAPOP) e LAT oxipropilada (LATOP).

2.2 Adição de amido como aditivo

Nessa etapa, uma mistura polimérica foi obtida. Cada uma das duas ligninas oxipropiladas, foi submetida a misturas com amido de milho comercial, glicerina P.A e água destilada, alternando a concentração em razão mássica de 1:10 (m/m) (da totalidade dos reagentes) de lignina em cada reação (5%, 10%, 15%, 20% e 25%).

Em béquer, foram adicionados 7,5 g de amido, 2,5 g de glicerina, 100 mL de água e a lignina oxipropilada (0,5 g, 1,0 g, 1,5 g, 2,0 e 2,5 g). O béquer com a mistura de reagentes foi levado a uma chapa de aquecimento à 150 °C,

durante 30 min, com agitação constante. Após a formação dos materiais, eles foram transferidos para uma placa de acrílico e levados à estufa em 60 °C, durante 24 h.

Uma mistura de Amido Termoplástico (ATP) contendo amido de milho comercial, glicerina P.A e água destilada foi obtida sem lignina para efeito de comparação, totalizando 11 amostras, são elas: ATP, LAP5, LAP10, LAP15, LAP20, LAP25, LAT5, LAT10, LAT15, LAT20 e LAT25.

A fim de otimizar os parâmetros de permeação, 4 amostras de membranas poliméricas foram selecionadas e submetidas à inserção de dióxido de titânio (TiO₂) P.A da marca Dinâmica e submetidas à testes de permeação de N₂ e CO₂. A inserção de TiO₂ foi definida após testes prévios de permeação para os gases N₂ e CO₂.

Em duas amostras de ATP, foram adicionados 0,1 g e 0,5 g de TiO₂, respectivamente. A definição da razão mássica utilizada, se deu para efeito de comparação.

Em uma amostra de LAP5 e em outra de LAT25 foi adicionado 0,1 g de TiO₂ em cada uma.

A escolha das amostras submetidas ao teste de permeação de gás até o momento, se deu por recursos e disponibilidade da análise. Portanto, as demais amostras serão submetidas também aos mesmos testes.

2.3 Caracterizações

Os espectros das ligninas oxipropiladas foram obtidos em aparelho SHIMADZU IR PRESTIGE-21. Foram preparados em pastilhas de KBr com 1 mg de amostra para 99 mg de KBr. Os espectros foram obtidos com 32 varreduras e resolução de 4 cm⁻¹.

Os espectros das blendas poliméricas de lignina com amido foram obtidos em aparelho SHIMADZU IR PRESTIGE-21. Os espectros foram obtidos com 32 varreduras e resolução de 4 cm⁻¹. A FTIR foi realizada com Reflexão Total Atenuada (ATR).

A análise de TGA foi realizada com um intervalo de temperatura de 25 a 600 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹, em atmosfera inerte e fluxo de N₂ de 50 mL min⁻¹.

A morfologia (Microscopia Eletrônica de Varredura) das amostras foi obtida no aparelho de marca Tescan, modelo VEGA 3 LMU, operando na faixa de tensão de 20 kV, nas dimensões de 50 e 200. Para realizar as análises na região de fratura, as amostras foram previamente submetidas à N₂ líquido e fragmentadas.

A análise de permeação dos gases N₂ e CO₂ nas amostras foi realizada em bancada de pressões baixas (1bar) e a membrana foi alocada em uma célula de 4 cm ø, a 25 °C. As análises foram feitas em tempos distintos (que variaram de 4 a 28 horas) de acordo com a necessidade de troca das membranas.

3 - Resultados e Discussão

3.1 Oxipropilação de ligninas

Os espectros de FTIR (Figuras 2 a 3) revelaram características relevantes do processo de oxipropilação da lignina alcalina de alta pureza da Sigma-Aldrich (LAP) e da lignina comercial Indulin AT da Ingevity (LAT), respectivamente, bem como de suas formas puras e após reação com o óxido de propileno (OP).

Através dos espectros obtidos pode-se observar as bandas características do processo de oxipropilação, tais como: aumento da absorção na região de 2800-2900 cm^{-1} correspondente ao estiramento do CH alifático e na região de 1375 cm^{-1} atribuído ao grupo metila do poliol incorporado ao material. Em 1100 cm^{-1} é possível observar a mudança na região de absorção do estiramento C-O relacionado à função éter do poliol, comprovando a enxertia de uma camada de polímero termoplástico de poli(óxido de propileno). E, ainda, os espectros apresentaram um pico na banda 1600 cm^{-1} , a qual está atribuída a vibração do estiramento de carbonilas C=O da lignina. Na região de 3417 cm^{-1} pode-se observar o pico que se refere ao estiramento OH (Menezes et al., 2009; Serrano et al., 2010).

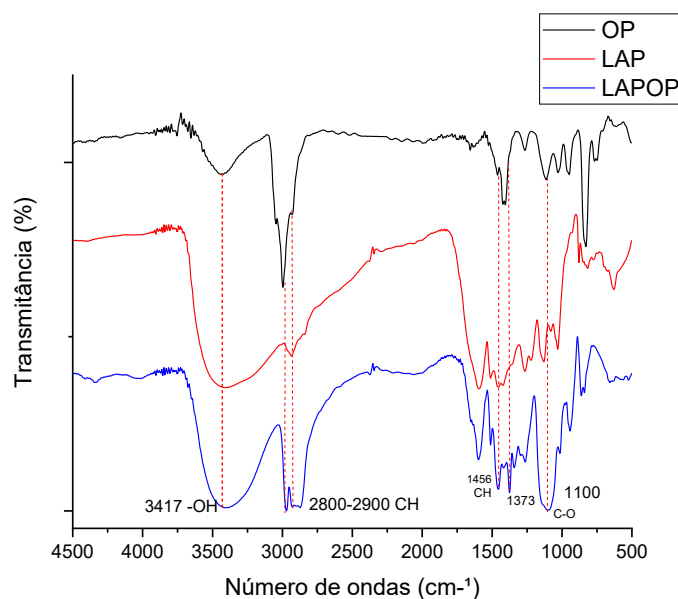


Figura 2. Espectros de FTIR para OP, LAP e LAPOP (feito em pastilha com 1 mg de amostra para 99 mg de KBr em 32 varreduras e resolução de 4 cm^{-1}).

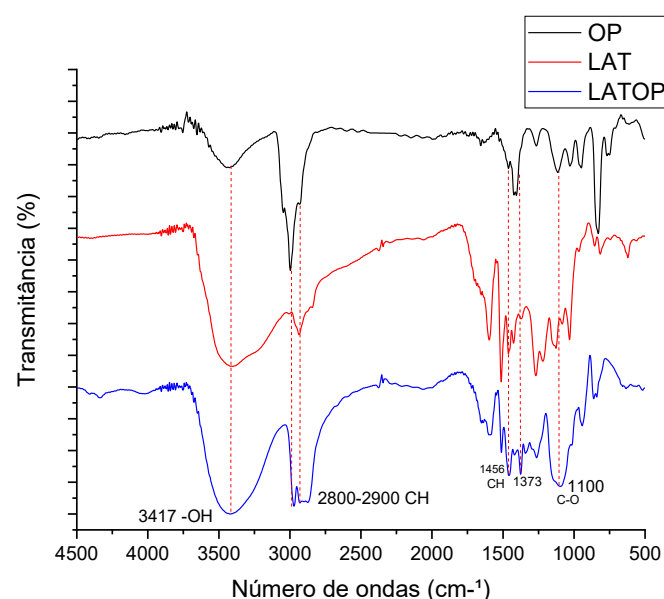


Figura 3. Espectros de FTIR para OP, LAT e LATOP (feito em pastilha com 1 mg de amostra para 99 mg de KBr em 32 varreduras e resolução de 4 cm^{-1}).

3.2 Adição de amido como aditivo

Os espectros de FTIR (Figuras 4 e 5) revelaram características relevantes do processo de inserção de amido e glicerol nas ligninas oxipropiladas (LAPOP e LATOP) para suas respectivas concentrações (5%, 10%, 15%, 20% e 25%). Para efeito de comparação, também é possível observar o espectro da LAPOP e LATOP, bem como do amido termoplástico.

Em todos os experimentos realizados, pôde-se observar bandas que caracterizam a incorporação do amido nas respectivas ligninas, como: o estiramento OH na região de 3429 cm^{-1} , a deformação angular de ligações OH em 1645 cm^{-1} , o estiramento assimétrico C-H em 2972 cm^{-1} , o estiramento C-O em 1100 cm^{-1} , esta última, banda característica do amido (Basiak et al., 2018).

Diante dessas atribuições, pôde-se confirmar a presença de amido nas blendas poliméricas obtidas a partir do processo de incorporação, bem como confirmar as características das ligninas oxipropiladas a partir das atribuições discutidas na seção 3.1.

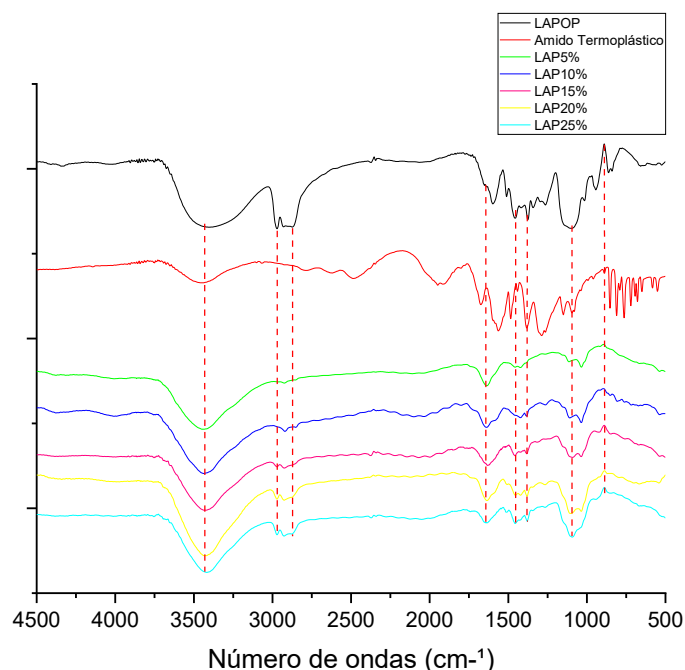


Figura 4. Espectros de FTIR para LAP, Amido Termoplástico, LAP5%, LAP10%, LAP15%, LAP20% e LAP25% (realizado com ATR em 32 varreduras e resolução de 4 cm^{-1}).

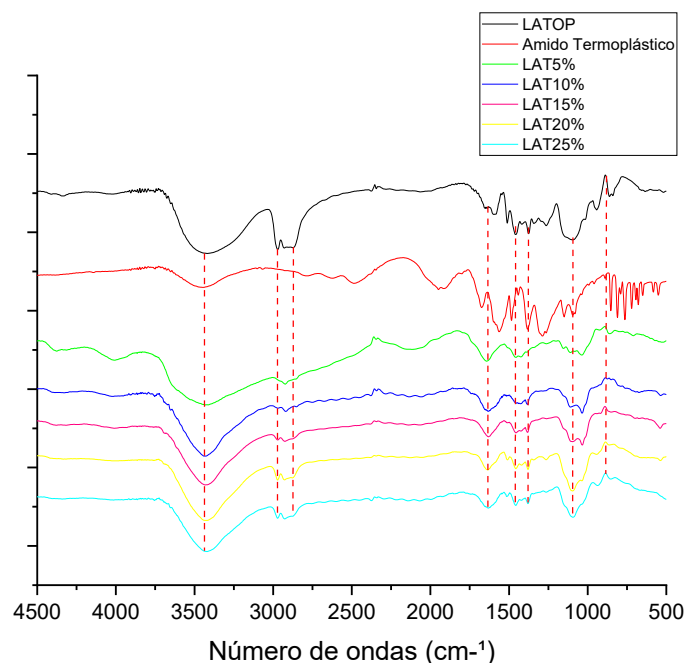


Figura 5. Espectros de FTIR para LATOP, Amido Termoplástico, LAT5%, LAT10%, LAT15%, LAT20% e LAT25% (realizado com ATR em 32 varreduras e resolução de 4 cm^{-1}).

Os termogramas das misturas de amido, glicerol e ligninas oxipropiladas são apresentados nas Figuras de 6 a 8.

O termograma (Figura 6) de mistura de amido com glicerol (Amido Termoplástico) mostrou três eventos. O primeiro está relacionado à desidratação da amostra e corresponde ao intervalo de 25 a 150 °C. O segundo evento corresponde à perda de massa relativa à degradação do polissacarídeo e é observado no intervalo entre 200 e 320 °C. O terceiro intervalo, corresponde ao processo de carbonização das amostras e estende-se até 600 °C.

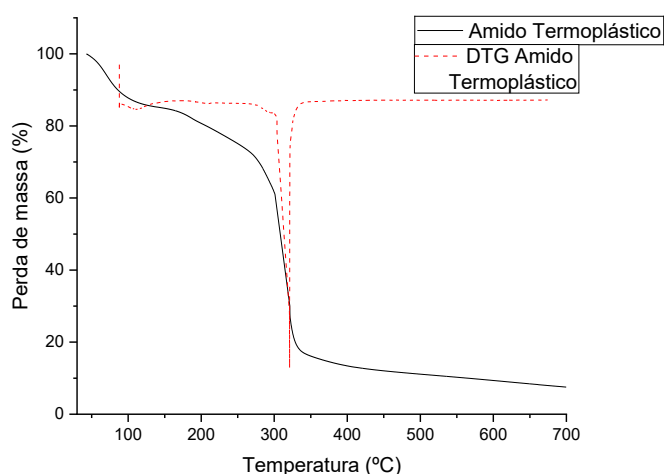


Figura 6. Termograma e derivada da membrana polimérica de Amido Termoplástico (taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹, em atmosfera inerte e fluxo de nitrogênio de 50 mL min⁻¹).

Para as amostras de amido com as respectivas ligninas (Figura 7 e 8), foi possível observar que os materiais obtidos apresentaram três estágios de comportamento térmico.

O primeiro estágio ocorre na faixa de temperatura entre 25 a 100 °C, associado à perda de água.

No segundo estágio (100 a 300 °C) pode-se observar uma maior perda de massa, correspondente à degradação térmica das ligninas e do poli(óxido de propileno).

O terceiro e último estágio está associado ao processo de carbonização das amostras e estendeu-se até 600 °C.

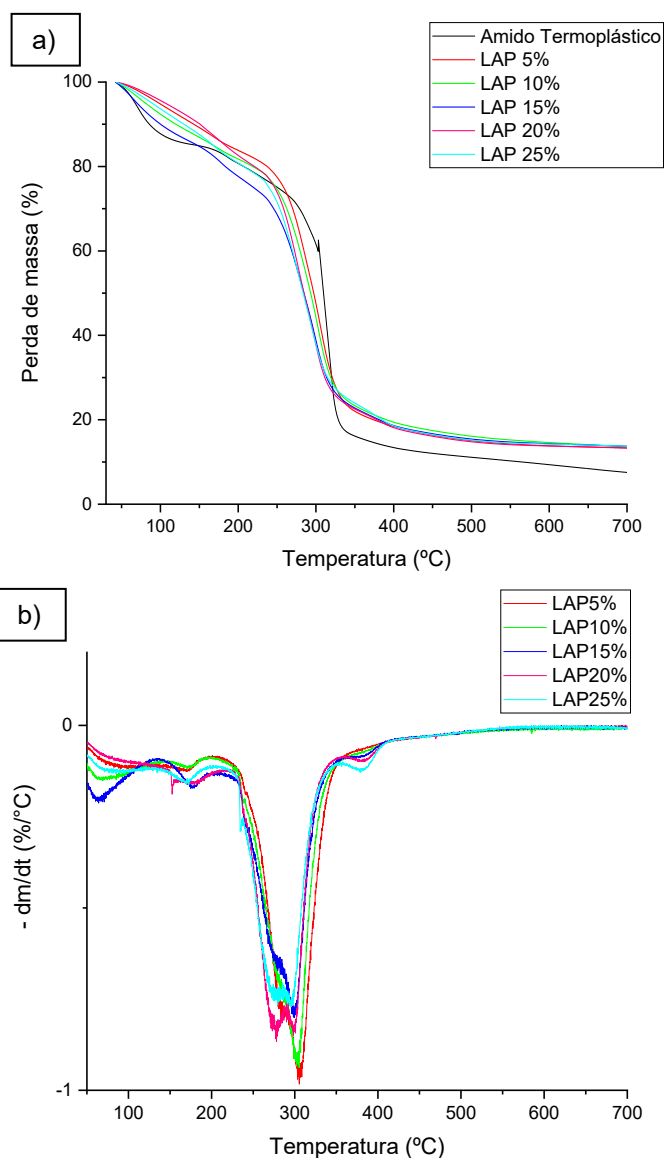


Figura 7. Termogramas (a) e derivadas (b) das membranas poliméricas de LAPOP após mistura com amido e glicerina, em suas respectivas concentrações (taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹, em atmosfera inerte e fluxo de nitrogênio de 50 mL min⁻¹).

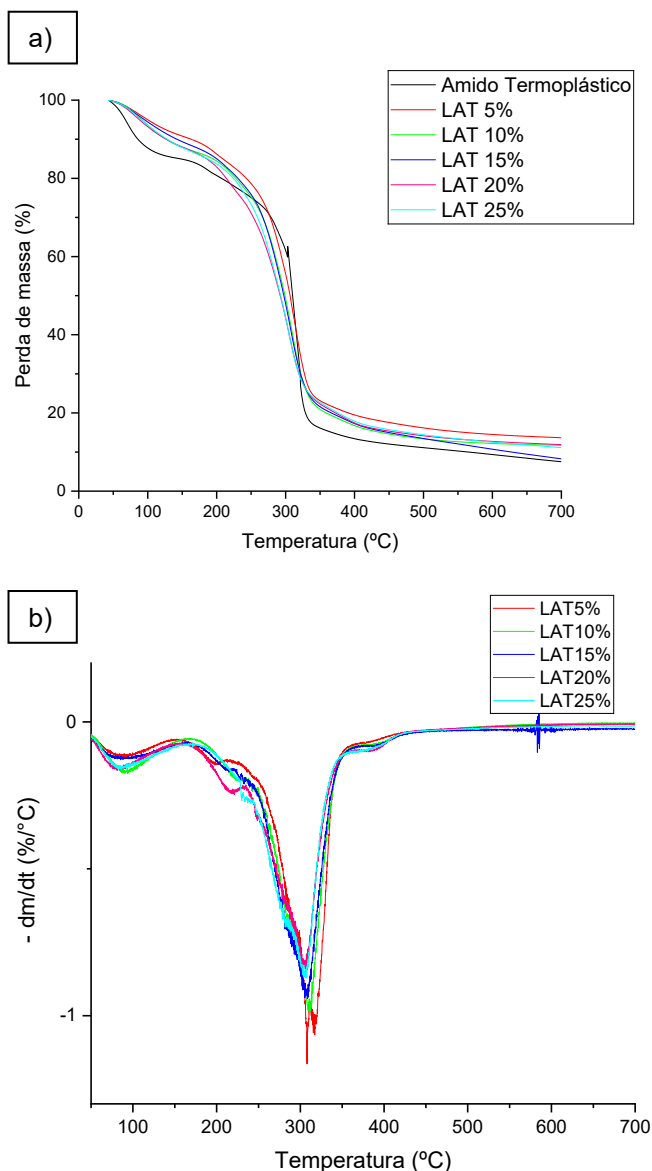


Figura 8. Termogramas (a) e derivadas (b) das membranas poliméricas de LATOP após mistura com amido e glicerina, em suas respectivas concentrações (taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, em atmosfera inerte e fluxo de nitrogênio de 50 mL min^{-1}).

As micrografias da fratura das membranas poliméricas são apresentadas nas Figuras 9 a 11, para as blendas poliméricas de amido termoplástico e LAP25%, LAT25%, respectivamente. Micrografias para as 11 membranas poliméricas foram realizadas. Aqui são apresentadas as micrografias referentes às

membranas poliméricas com maior razão mássica de lignina, visando observar a influência da lignina.

Para as micrografias de amido termoplástico (Figura 9), a imagem de fratura mostra a homogeneização dos reagentes durante o processo. Entretanto, pôde-se observar irregularidades referentes à presença de grânulos de amido, que não foram dissolvidos no processo de homogeneização das blendas formadas. Esse fenômeno pode estar relacionado à temperatura ou agitação durante o processo (Borges, 2022).

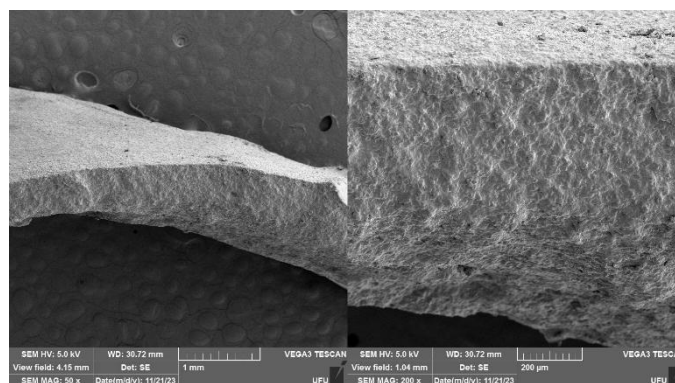


Figura 9. Micrografias da fratura (Ampliação de 50x, 200x) das membranas poliméricas do Amido Termoplástico (operando na faixa de tensão de 20 kV).

Para as blendas poliméricas de amido incorporado às ligninas oxipropiladas da lignina LAP (Figura 10), as micrografias apresentaram rachaduras na região de fratura, mas uma homogeneização na superfície com poucos grânulos e fraturas. Essas fraturas podem ser provenientes do processo de secagem do material em estufa. Outro aspecto observado foi quanto ao aumento de concentração de lignina oxipropilada, mostrando um aumento de irregularidades crescentes.

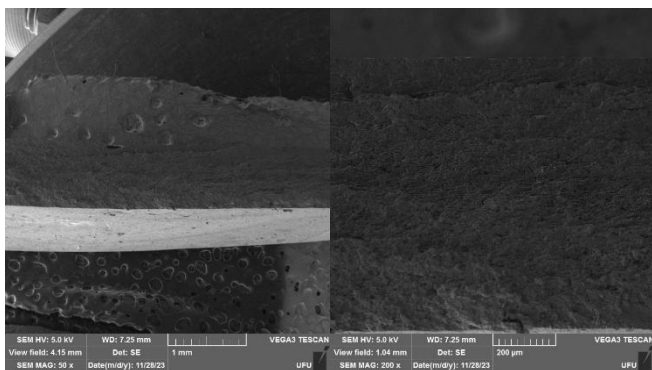


Figura 10. Micrografias da fratura (Ampliação de 50x, 200x) das membranas poliméricas de LAP25% (operando na faixa de tensão de 20 kV).

Para as blendas poliméricas de amido incorporado às ligninas oxipropiladas da lignina LAT (Figura 11), as micrografias apresentaram boa homogeneização nas regiões de fratura, com poucos grânulos.

Para essas blendas poliméricas, o surgimento de irregularidades como fraturas, grânulos e poros, foram observados com o aumento crescente da concentração de lignina oxipropilada.

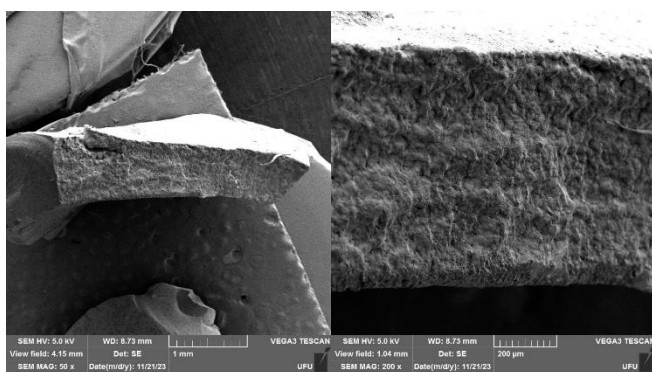


Figura 11. Micrografias da fratura (Ampliação de 50x, 200x) das membranas poliméricas de LAT25% (operando na faixa de tensão de 20 kV).

Os testes de permeação de gás nas amostras de Amido Termoplástico, LAP5, LAP10, LAP15, LAP20, LAP25, LAT5, LAT10, LAT15, LAT20 e LAT25 não foram favoráveis,

indicando ausência de permeação de N_2 e CO_2 em todas as amostras.

A partir desses resultados, optou-se por inserir um aditivo, visando modificar as estruturas das membranas poliméricas até aqui discutidas.

A partir da formulação inicial das membranas poliméricas, foi adicionado o TiO_2 de 1% e 5% para avaliar especialmente a permeação dos gases.

Para o gás N_2 as membranas poliméricas não foram favoráveis à permeação. Entretanto, para o gás CO_2 (gás de interesse desse trabalho), notou-se uma permeação considerável, equivalente à 2,465 (barrer) quando adicionado 1% de TiO_2 e 3,494 (barrer) quando adicionado 5% de TiO_2 . A Tabela 1 corresponde a uma comparação dos resultados de permeação de CO_2 entre as membranas poliméricas de Amido Termoplástico sem TiO_2 , Amido Termoplástico com 1% TiO_2 e Amido Termoplástico com 5% TiO_2 .

Tabela 1. Resultados da permeação de CO_2 em membranas poliméricas renováveis de amido e lignina sem e com TiO_2 .

Amostra/Permeação	P (barrer)
Amido Termoplástico sem TiO_2	0
Amido Termoplástico com 1% TiO_2	2,465
Amido Termoplástico com 5% TiO_2	3,494

Para as membranas poliméricas com ligninas oxipropiladas, os testes foram feitos nas amostras LAP5 sem TiO_2 , LAP5 com 1% TiO_2 , LAT25 sem TiO_2 e LAT25 com 1% TiO_2 . A Os

resultados para as membranas poliméricas com ligninas oxipropiladas (LAP5 e LAT25) para os gases N₂ e CO₂ sem TiO₂ foram iguais a zero (barrer), enquanto nas membranas com a adição de 1% de TiO₂ em cada uma delas, houve permeação de 14,109 e 6,860 (barrer) para o CO₂, respectivamente. Para o N₂ houve pouca ou nenhuma permeação. A Tabela 2 mostra em resumo, os resultados para esses testes.

Tabela 2. Resultado da permeação de CO₂ em membranas poliméricas com amido e ligninas oxipropiladas sem e com TiO₂.

Amostra/Permeação	P (barrer)
LAP5 sem TiO ₂	0
LAP5 com 1% de TiO ₂	14,109
LAT25 sem TiO ₂	0
LAT25 com 1% de TiO ₂	6,860

A adição de TiO₂ alterou significativamente os resultados esperados para a permeação de CO₂. Esses resultados podem estar ligados ao fato de que o TiO₂ pode ter modificado a interação entre os componentes das membranas poliméricas, alterando especialmente a porosidade do material. A disposição do TiO₂ nas membranas poliméricas, está diretamente relacionada à criação de caminhos preferenciais do gás, que ocasiona o aumento da permeabilidade; além disso, o poder de interação entre o TiO₂ e CO₂ – que influencia diretamente a solubilidade do gás na membrana –, aumenta também a permeabilidade (Rebouças, et al., 2021).

Quanto à influência da lignina nas membranas poliméricas, pôde-se notar que a lignina de alta pureza da SIGMA-ALDRICH (LAP) apresentou melhores resultados de permeação. Esses resultados podem estar relacionados diretamente com a pureza (99%) da lignina.

4 - Conclusões

Através dos espectros, dos termogramas e das micrografias, foi possível observar a eficiência do processo de oxipropilação, de adição do amido, e identificar o comportamento térmico e a influência da presença de ligninas oxipropiladas no material.

Visando a melhor composição para a obtenção de resultados significativos de permeação e seletividade do gás, bem como para a formação do filme polimérico, foram definidas as concentrações de lignina e de amido, respectivamente. Entretanto, essa formulação inicial, obteve um comportamento semelhante a uma barreira de gás, causando a ausência de permeação.

Os resultados de permeação de CO₂ para as membranas poliméricas com TiO₂, direcionam o material para o objetivo principal desse trabalho. Portanto, os próximos passos serão em observar de forma precisa, a melhor concentração de TiO₂ para as membranas, mas principalmente, caracterizá-las. Testes de permeação devem ser feitos, focando também na espessura do material, pois é um parâmetro que

influencia diretamente na permeabilidade e seletividade de gases.

Por fim, pretende-se submeter as membranas poliméricas a permeação de CO₂ a partir de uma mistura de gases sintética que simula a composição oriunda de uma chaminé de uma usina termoeleétrica.

5 - Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – Brasil (FAPEMIG. APQ-00321-22.*

6 - Referências

Admase AT, Sendekie ZB, Alene NA (2022) Filme biodegradável de amido de semente de manga usando argila de cerâmica como filler. *Journal of Polymers and the Environment* 30: 3431–3446. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02449-7>

Basiak E, Lenart A, Debeaufort F (2018) How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers* 10: 412. <https://doi.org/10.3390/polym10040412>

Boontongto T, Santaladchaiyakit Y, Burakham R (2024) Biomass waste-derived magnetic material coated with dual-dummy-template molecularly imprinted polymer for simultaneous extraction of organophosphorus and carbamate pesticides. *Food Chemistry* 441: 138325. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138325>

Borges MF (2022) Reticulação física do hidrogel de amido por ciclos curtos de resfriamento e aquecimento na presença de glicerol para potencial uso como curativo dérmico [*Physical crosslinking of starch hydrogels by short cooling and heating cycles in the presence of glycerol for potential use as dermal dressings*]. PhD thesis. Federal University of Uberlândia. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36160>, accessed December 2024

Engel JB, Ambrosi A, Tessaro IC (2019) Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. *Carbohydrate Polymers* 225: 115234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115234>

Han Y, Ho WSW (2021) Polymeric membranes for CO₂ separation and capture. *Journal of Membrane Science* 628: 119244. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119244>

Hatakeyama H, Hatakeyama T (2009) Lignin Structure, Properties, and Applications. In: Abe A, Dusek K, Kobayashi S. (eds) *Biopolymers. Advances in Polymer Science*, vol 232. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/12_2009_12

Li B, Zhou M, Huo W, Cai D, Qin P, Cao H, Tan T (2020) Fractionation and oxypropylation of corn-stover lignin for the production of biobased rigid polyurethane foam. *Industrial Crops and Products* 143: 111887. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111887>

Li H, Tian F, Liu H, Bai Y, Zhang C, Li J, Dong L (2024) Novel positively-charged bio-derived polymer nanofilms for nuclear

- wastewater decontamination. *Desalination* 576: 117389. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117389>
- Mangaraj S, Oliveira RR, Yadav A (2022) Development and characterization of PLA and Cassava starch-based novel biodegradable film used for food packaging application. *Journal of Food Processing and Preservation*. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16314>
- Mansy AE, Desouky EAE, Taha TH, Abu-Saied MA, El-Gendi H, Amer RA, Tian Z (2024) Sustainable production of bioethanol from office paper waste and its purification via blended polymeric membrane. *Energy Conversion and Management* 299: 117855. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117855>
- Menezes AJ, Pasquini D, Curvelo AAS, Gandini A (2009) Self-reinforced composites obtained by the partial oxypropylation of cellulose fibers. 1. Characterization of the materials obtained with different types of fibers. *Carbohydrate Polymers* 76: 437-442. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.11.006>
- Moioli S, Guido G, Pellegrini LA, Fasola E, Riva ER, Alberti D, Carrara A (2024) Techno-economic assessment of the CO₂ value chain with CCUS applied to a waste-to-energy Italian plant. *Chemical Engineering Science* 287: 119717. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.119717>
- Nath F, Md Nahin Mahmood MdN, Yousuf N (2024) Recent advances in CCUS: A critical review on technologies, regulatory aspects and economics, *Geoenergy Science and Engineering* 238: 212726. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212726>
- Nezafat Z, Nasrollahzadeh M, Javanshir S, Baran T, Dong Y (2023) Recent developments in polysaccharide and lignin-based (nano)materials for CO₂ capture. *Green Chemistry* 25: 9603-9643. <https://doi.org/10.1039/D3GC02373G>
- Pal N, Agarwal M (2024) Efficient performance of natural polysaccharide-based mixed matrix membrane for CO₂/H₂ and CO₂/N₂ mixed gas separation. *International Journal of Hydrogen Energy* 57: 273-289. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.019>
- Pinto JA, Prieto MA, Ferreira ICFR, Belgacem MN, Rodrigues AE, Barreiro MF (2020) Analysis of the oxypropylation process of a lignocellulosic material, almond shell, using the response surface methodology (RSM). *Industrial Crops and Products* 153: 112542. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112542>
- Rebouças, LD, Araújo, BA, Souza, JES, Sarmiento, KKF, Lima, CAP, Medeiros, KM. (2021). Incorporação do dióxido de titânio como aditivo em membranas de poliamidas. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 8, e48110817434. (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17434>
- Serrano L, Alriols MG, Briones R, Mondragón I, Labidi J (2010) Oxypropylation of rapeseed cake residue generated in the biodiesel production process. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 49: 1526-1529. <https://doi.org/10.1021/ie9016732>

4º WORKSHOP DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS UFVJM-UFU

Torre-Celeizabal A, Casado-Coterillo C, Gomis-Berenguer A, Iniesta J, Garea A (2023) Chitosan-based mixed matrix composite membranes for CO₂/CH₄ mixed gas separation. Experimental characterization and performance validation. Separation and Purification Technology. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124535>

United Nations (2024) Goal 13: Take urgent action to combat climate change and its impacts. <https://sdgs.un.org/goals/goal13>, accessed December 2024

Vaz Jr, S, Souza, APR, Baeta, BEL (2022) Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. Cleaner Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>