

DESENVOLVIMENTO DE BIOCOMPÓSITO PARA COBERTURA DE SOLO EM SISTEMAS DE CULTIVO AGRÍCOLA

Julia Thais Decker¹, Dênian Fenner², Ruth Marlene Campomanes Santana³

^{1,2,3}Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
(juliadecker@gmail.com)

Resumo: O trabalho teve como objetivo desenvolver filmes biodegradáveis para cobertura de solo (*mulching*) à base de amido de mandioca, plastificado com glicerol e aditivado com ácido málico e negro de fumo. As formulações foram obtidas pelo método de *casting* e avaliadas quanto às propriedades de molhabilidade, absorção de água e umidade, além da biodegradabilidade em ambiente de compostagem. Os resultados demonstraram que a adição de negro de fumo e ácido málico melhorou a resistência dos filmes à absorção de água, reduzindo sua hidrofobicidade e aumentando a integridade física. No ensaio de biodegradação, os filmes apresentaram perda de massa entre 30% e 80% em 30 dias, indicando desempenho adequado para culturas agrícolas de ciclo curto, com posterior biodegradação sem impactos ambientais significativos.

Palavras-chave: Biocompósito, agricultura sustentável, TPS.

INTRODUÇÃO

A prática de cobertura de solo, popularmente conhecida como *mulching*, é amplamente utilizada no Brasil devido aos seus benefícios para a conservação e melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo. Essa técnica consiste na aplicação de materiais sobre a superfície do solo com o intuito de reduzir a evaporação da água, controlar a erosão, suprimir o crescimento de plantas daninhas e regular a temperatura. As coberturas podem ser naturais, compostas por resíduos orgânicos como casca de arroz, palha e bagaço de cana-de-açúcar, ou sintéticas, compostas por filmes plásticos como o polietileno, em diferentes colorações (Lambert et al., 2017).

O *mulching* sintético plástico se destaca pela alta eficiência no controle de plantas daninhas, conservação da umidade, regulação térmica do solo, aliado a baixo custo e facilidade de aplicação (Silva, 2020). Composto principalmente de polietileno (PE), um polímero termoplástico com boa resistência mecânica e flexibilidade os tipos mais utilizados incluem o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polietileno linear de baixa densidade (PELBD) e o polietileno de alta densidade (PEAD). Além da composição base, esses filmes recebem aditivos estabilizantes UV, que prolongam sua durabilidade sob a exposição solar. A coloração preta dos filmes plásticos é eficaz na absorção de calor, o que contribui para o aumento da temperatura do solo, acelerando o desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes (Sousa et al., 2002). Os parâmetros comerciais destes polímeros são regidos pela ABNT NBR 15560-2, que estabelece as características físicas e mecânicas e os

métodos de ensaio para os filmes sintéticos, orientando a escolha dos materiais e proporções utilizadas.

O estado do Rio Grande do Sul apresenta um crescimento na produção de hortaliças de ciclo curto, principalmente em pequenas propriedades (DEE/SPGG, 2023). Para a permanência da produção de hortaliças a utilização de cobertura de solo tem se intensificado devido às condições climáticas do estado (Silva, 2021), classificadas como subtropicais úmidas do tipo Cfa, caracterizadas por verões com temperaturas superiores a 30 °C e períodos de estiagem, além de invernos frios e úmidos, com ocorrência de geadas e temperaturas próximas de 0 °C. Essas variações térmicas e hídricas afetam a dinâmica microbiana do solo, a taxa de mineralização de nutrientes e o desempenho fisiológico das culturas, exigindo estratégias de manejo que atenuem os efeitos do estresse abiótico.

Apesar dos benefícios agrônômicos, o uso intensivo de filmes plásticos sintéticos gera impactos ambientais negativos. Após o uso, esses materiais tornam-se resíduos de difícil manejo, uma vez que sua remoção é trabalhosa e o material está contaminado com terra. Aliado a falta de infraestrutura e conhecimento dos agricultores (Lambert et al., 2017) os resíduos plásticos são, muitas vezes, abandonados nos campos ou enterrados, o que favorece a liberação de microplásticos e aditivos tóxicos, com potenciais efeitos nocivos a estrutura e a biota do solo (Ekta, Tiwari, 2024). Soluções baseadas em aditivos pró-degradantes, como metais de transição que catalisam a fragmentação oxidativa dos polímeros, vêm sendo

utilizadas para acelerar a degradação, mas tais aditivos não promovem a biodegradação completa, resultando na geração de partículas plásticas menores, que por sua vez também acarretam efeitos nocivos ao solo (Lian, 2021).

Nesse contexto, a substituição de filmes sintéticos por materiais biodegradáveis provenientes de fontes renováveis apresenta-se como uma alternativa viável técnica e agronomicamente. Segundo a norma ASTM D-833, um polímero é considerado biodegradável quando sua decomposição ocorre pela ação de microrganismos como bactérias, fungos e algas naturalmente presentes no ambiente. O amido, um polissacarídeo abundante em tubérculos e cereais, pode ser utilizado como matriz filmogênica promissora para a produção de filmes biodegradáveis. Dentre as fontes disponíveis, o amido extraído da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) destaca-se por sua alta disponibilidade, baixo custo e elevado teor de amilose, o que favorece a formação de redes poliméricas coesas quando combinado a plastificantes como o glicerol (Jiménez et al., 2012). O resultado é a formação de amido termoplástico (TPS), obtido por processamento térmico sob alta umidade, no qual a estrutura semicristalina original é rompida, dando origem a um material homogêneo e moldável (Avérous, 2004).

Entretanto, os filmes à base de TPS apresentam propriedades mecânicas e de barreira limitadas, exigindo a adição de compostos que otimizem seu desempenho em campo. A modulação das propriedades de barreira, especialmente a permeabilidade a gases e vapor d'água, é fundamental para prolongar a funcionalidade do filme sobre o solo sem comprometer sua biodegradação. O ácido málico, um composto orgânico dicarboxílico, tem sido estudado como aditivo funcional em matrizes poliméricas biodegradáveis por sua capacidade de interagir com grupos hidroxila do amido, promovendo ligações intermoleculares que reduzem a permeabilidade e aumentam a coesão estrutural (Jiménez, 2012).

Além disso, o uso de agentes de carga carbonáceos pode promover melhorias mecânicas. Entre esses, destaca-se o negro de fumo (*carbon black*), um material carbonáceo amplamente utilizado na devida sua capacidade de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos (Medeiros, 2021). O negro de fumo é composto majoritariamente por carbono amorfo, hidrocarbonetos aromáticos e produtos oleosos, com alta área superficial e excelente capacidade de absorção de radiação (Coelho, 2011), o que contribui para a proteção do material contra degradação fotoquímica. Além de conferir coloração preta, sua incorporação em matrizes biodegradáveis pode atuar como reforço estrutural e tornar a matriz polimérica mais adequada para aplicação agrícola em

mulching, onde se exige resistência às intempéries e estabilidade durante o ciclo da cultura.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver filmes poliméricos biodegradáveis à base de amido de mandioca plastificado com glicerol, aditivados com ácido málico e negro de fumo, visando à aplicação agrícola como alternativa ao *mulching* sintético. A formulação proposta busca integrar propriedades adequadas de resistência, estabilidade e biodegradação, associadas à melhoria das propriedades de barreira, proteção UV e à compatibilidade ambiental, de modo a atender às exigências agrônomicas para aplicação em sistemas de cultivo de ciclo curto.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho consistiu, inicialmente, na definição e refinamento da formulação base do polímero biodegradável. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica com foco nos parâmetros físicos, mecânicos e de barreira requeridos para filmes aplicados como *mulching* agrícola, como flexibilidade, estabilidade térmica e permeabilidade ao vapor d'água. Tais requisitos, descritos em parte na norma ABNT NBR 15560-2.

Os filmes foram obtidos pelo método de *casting* (Figura 1). Para a preparação, utilizou-se amido de mandioca comercial como matriz polimérica e glicerol como plastificante. Inicialmente, o glicerol foi dissolvido em água aquecida a 60 °C para a formação da solução filmogênica. Em seguida, o ácido málico, na forma de pó, foi incorporado à solução, que foi mantida sob agitação constante em chapa aquecida a 70 °C. Após a homogeneização, a solução final foi vertida, ainda a 80 °C, em moldes de silicone e submetida à secagem em estufa ventilada a 40 °C por 24 horas. Para a aditivação com negro de fumo, este foi adquirido na forma sólida e diluído em água quente com agitação. Posteriormente foi adicionado à solução filmogênica sob agitação a 40 °C, seguido da adição dos demais componentes descritos acima.

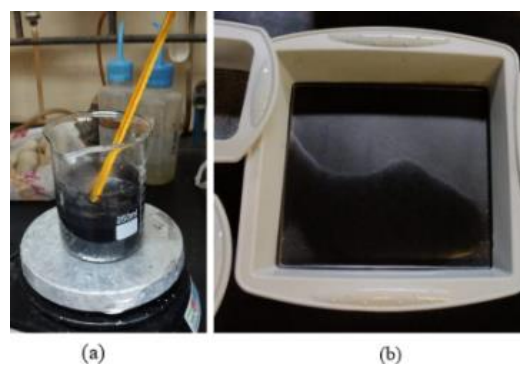


Figura 1. Obtenção dos filmes via *casting*: (a) solução filmogênica em chapa aquecida com agitação, (b) solução em forma de silicone.

Foram elaboradas formulações-teste contendo: (I) apenas amido plastificado, (II) amido com ácido málico, (III) amido com adição de negro de fumo e (V) amido com adição simultânea de ácido málico e negro de fumo, visando simular as propriedades funcionais de filmes comerciais de polietileno aplicados como *mulching*.

As formulações desenvolvidas estão descritas na Tabela abaixo.

Tabela 1. Formulações dos filmes biodegradáveis

Nro.	Amostra	Amido (%)	Glicerol (%)	Ácido málico (%)	Negro de fumo (%)
(I)	AB	80	20	-	-
(II)	AB0,5AM	73	18	9	-
(III)	ANF	80	19	-	1
(V)	ANF0,5AM	73	18	9	1

Os ensaios realizados foram baseados em normas técnicas específicas para polímeros biodegradáveis à base de amido, com a inclusão de parâmetros que visam simular condições mais próximas da aplicação real no solo. As análises realizadas englobaram propriedades físicas, como molhabilidade, absorção de umidade e absorção de água, além da avaliação da capacidade de biodegradação por meio do teste de compostagem. Todos os ensaios foram conduzidos nas amostras descritas na Tabela 1, com o objetivo de avaliar o impacto da aditivação nas propriedades finais dos filmes.

Para avaliar a molhabilidade dos filmes, foi realizada a medição do ângulo de contato entre a superfície da amostra e a água, com o objetivo de determinar a hidrofiliabilidade dos materiais. A análise foi conduzida através do método de gota sésil, no qual uma gota de água é depositada sobre a superfície da amostra (Figura 2), e a partir da imagem capturada são medidos os ângulos de contato formados nos dois lados da gota. As medições foram realizadas nas amostras com dimensões de 5x10cm e espessura aproximada de 0,27 mm. Foram utilizadas três (3) amostras para cada formulação. Para a realização do ensaio, utilizou-se um microscópio digital acoplado a uma seringa com água destilada. Seguindo a norma ISO 15989:2004, foram aplicadas de cinco (5) a dez (10) gotas em cada amostra, tendo tempo de permanência de um (1) segundo e um (1) minuto para avaliar a absorção superficial da gota em filmes TPS. As imagens das gotas foram capturadas individualmente por meio do *software Surfaceware*. As medições dos ângulos de contato foram feitas utilizando o *software SurfTens 3.0* (OEG GmbH), considerando ambos os lados da gota.

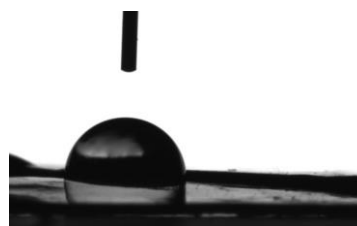


Figura 2. Teste de ângulo de contato: deposição da gota sésil na superfície da amostra.

A avaliação do comportamento de higroscopicidade dos filmes foi realizada por meio da análise do aumento de massa das amostras em ambiente com umidade relativa controlada, seguindo a norma ASTM E104 – 02, que estabelece práticas padrão para a avaliação da propriedade de barreira à absorção de umidade. As amostras dos filmes poliméricos, com espessura aproximada de 0,27 mm, foram cortadas em dimensões de 1,5x1,5 cm. Foram utilizadas quatro (4) amostras para cada formulação. Inicialmente, as amostras foram colocadas em uma estufa a 35 °C por 1 hora para a remoção de umidade residual e, em seguida, foram pesadas (massa inicial).

Posteriormente, as amostras foram transferidas para câmaras de umidade, preparadas com uma solução saturada de NaCl (75% de umidade relativa). Para acomodar as amostras no recipiente, foi utilizado um suporte de tule (Figura 3). O tempo de exposição das amostras à umidade foi distribuído em seis intervalos de uma (1), duas (2), três (3), quatro (4) e vinte e quatro (24) horas. Ao final de cada intervalo, as amostras foram novamente submetidas à estufa e posteriormente pesadas, conforme o procedimento adotado para a massa inicial. O ganho de massa foi calculado por meio da Equação 1, utilizando a massa inicial (m_i) e a massa final (m_f) após cada período de exposição. Para cada condição de tempo, o valor do ganho de massa corresponde à média dos resultados obtidos nas quatro repetições realizadas para cada amostra.

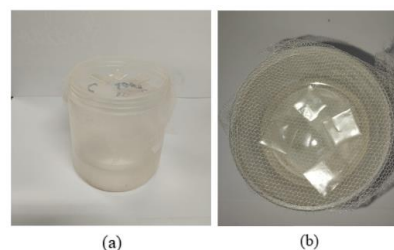


Figura 3. Teste de absorção de umidade: (a) câmara de umidade relativa 75%, (b) amostras dispostas no tule.

$$\text{Ganho de massa (\%)} = \left(\frac{m_f - m_i}{m_i} \right) * 100 \quad (1)$$

A absorção de água é uma propriedade que revela a capacidade do filme em incorporar água na sua

estrutura, sendo influenciada pela presença de grupos hidrofílicos, pela cristalinidade e pela porosidade do material (Kotekewis, 2024). O ensaio de absorção de água foi realizado com base nas premissas estabelecidas pela norma ISO 62:2008, que estabelece o procedimento para determinação da absorção de água em materiais poliméricos, para tempo e condições do ambiente. As amostras foram preparadas com dimensões de 2×2 cm e espessura aproximada de 0,25 mm. O teste foi conduzido em temperatura ambiente (23-25 °C), com imersão total das amostras em água destilada a 25 °C ± 2 °C, utilizando placas de Petri como recipiente (Figura 4). O tempo de exposição foi distribuído em seis intervalos de uma (1), duas (2), três (3), quatro (4), cinco (5) e vinte e quatro (24) horas. Foram utilizadas três (3) amostras para cada formulação. Após cada período, as amostras foram levemente secas com papel absorvente para remoção do excesso de água superficial e, em seguida, pesadas para determinar o ganho de massa, por meio da Equação 1. Adicionalmente, foi realizada a avaliação do aumento das dimensões dos filmes com auxílio de uma régua, com o objetivo de quantificar o inchamento dos materiais decorrente da absorção de água e verificar sua integridade física.

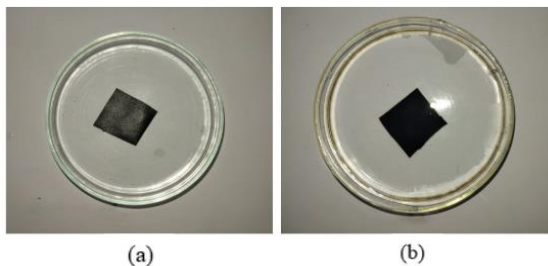


Figura 4. Teste de absorção de água em placas de petri: (a) amostras antes de imersão em água, (b) amostra imersa em água.

Para a avaliação da biodegradação dos filmes, foi realizado o ensaio de compostagem, baseado na norma ASTM G160-03. Para uma maior aproximação com as condições reais de aplicação, o ensaio foi conduzido em ambiente aberto (Figura 5), sendo que as condições climáticas foram monitoradas durante todo o período. Foram utilizadas quatro (4) amostras para cada formulação de filme biodegradável, as quais permaneceram enterradas por sete (7), quinze (15) e trinta (30) dias. As amostras foram secas em estufa a 35 °C por 2 horas e posteriormente pesadas, antes de serem totalmente enterradas, com o auxílio de bolsas de tule, que evitaram a perda das amostras durante o processo. Após o tempo de exposição, as amostras foram retiradas da compostagem e secas em estufa a 35 °C por aproximadamente 2 horas para remoção da terra remanescente com utilização de um pincel para varrer a terra. Em seguida, foram levemente limpas com água, secas com papel absorvente e novamente

levadas à estufa por mais 2 horas, para então serem pesadas. A partir desses dados, foi realizado o cálculo da perda de massa, por meio da Equação 2, utilizando a massa inicial (m_i) e a massa final (m_f). Devido à aplicação proposta para o material, também foram avaliadas as condições físicas das amostras após cada período.



Figura 5. Ensaio de compostagem: (a) recipientes com terra para análise em condições em ambiente aberto (b) amostras dispostas no tule.

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) * 100 \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ângulo de contato permite avaliar a afinidade do material com a água, sendo um parâmetro relevante para sua aplicação agrícola. Valores menores indicam hidrofiliicidade, com maior espalhamento da gota, enquanto valores maiores indicam hidrofobicidade, associada à menor interação com a água. Essa característica influencia diretamente na retenção de umidade do solo, na redução da evaporação e na durabilidade do filme em campo.

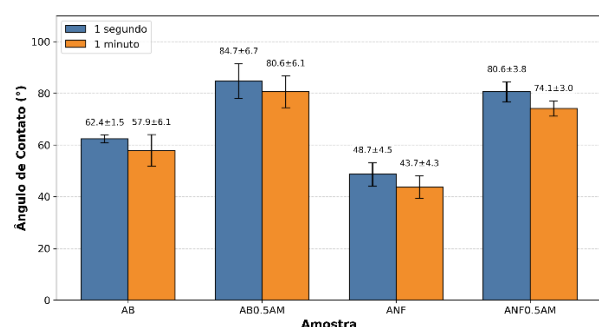


Figura 6. Ângulo de contato das amostras avaliadas.

A partir da avaliação dos ângulos de contato medidos (Figura 6), pode-se observar a afinidade das amostras com a água. A amostra (AB) apresentou os menores ângulos de contato, com valores entre aproximadamente 62,36° e 57,93°, demonstrando uma superfície hidrofílica, que favorece o espalhamento da água, o que é característico da natureza hidrofílica do amido, devido à presença de átomos de oxigênio e hidrogênio, levando a um aumento da formação de

ligações de hidrogênio (Martins, 2015). Avaliando os resultados da amostra (AB0,5AM), percebe-se que a adição de ácido málico proporcionou um aumento do ângulo de contato, atingindo valores de $84,74^\circ$ e $80,58^\circ$, sugerindo uma modificação na superfície, efeito atribuído à formação de ligações cruzadas que reduzem a disponibilidade de grupos hidroxilas livres. A amostra aditivada apenas com negro de fumo (ANF) apresentou os menores ângulos, $48,72^\circ$ e $43,73^\circ$, indicando maior afinidade com a água, o que pode estar associado à natureza polar da matriz de amido e à dispersão do negro de fumo, que isoladamente não promoveu uma barreira significativa à umidade. Por outro lado, a ação combinada da aditivação com negro de fumo e ácido málico na amostra (ANF0,5AM) resultou em ângulos de $80,62^\circ$ e $74,12^\circ$, demonstrando uma redução na hidrofiliabilidade em comparação à formulação apenas com negro de fumo, indicando que a ação sinérgica dos aditivos é benéfica para melhorar a resistência à umidade.

No gráfico da Figura 7 encontra-se as curvas de absorção de umidade em função do tempo de exposição dos filmes ao ambiente de umidade relativa controlada.

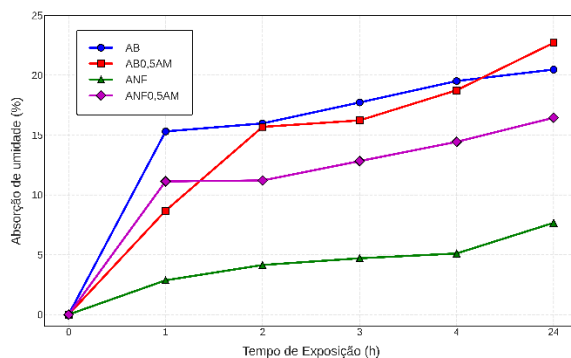


Figura 7. Absorção de umidade (%) em relação ao tempo de exposição (h).

Com base nos resultados apresentados do ensaio, foi possível avaliar a influência dos diferentes aditivos na capacidade dos filmes poliméricos em absorver umidade ao longo do tempo. A amostra (AB) apresentou os maiores valores de absorção em todas as etapas do ensaio, atingindo cerca de 20% após 24 horas de exposição devido a natureza altamente hidrofílica do amido que favorecem a interação com moléculas de água (Martins, 2015). A amostra contendo negro de fumo (ANF) apresentou a menor absorção de umidade em todas as medições, atingindo apenas cerca de 8% após 24 horas. Esse resultado pode estar associado a barreira física superficial da carga de negro de fumo na matriz polimérica que diminui a difusão da água.

As amostras contendo ácido málico apresentaram maior absorção de água, sendo de aproximadamente

24% na (AB0,5AM) e 16% na (ANF0,5AM) ao final do experimento, quando comparadas às suas respectivas formulações sem o aditivo. Esse aumento pode estar relacionado à presença de grupos carboxílicos e hidroxila livres do ácido málico que, quando não totalmente reticulados, permanecem disponíveis na matriz, promovendo maior afinidade com a água e aumentando a polaridade superficial (Gao et al., 2017). Além disso, avaliando o resultado intermediário da amostra (ANF0,5AM) podemos ter um indicativo da ação sinérgica benéfica dos aditivos.

No gráfico da Figura 8 encontra-se as curvas de absorção de água em função do tempo de exposição. As amostras sem aditivação de negro de fumo que apresentaram rompimento ao longo do experimento foram desconsideradas a fim de não se prejudicar a avaliação da curva de absorção de água.

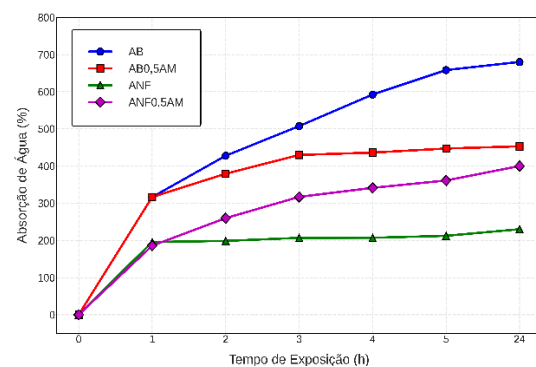


Figura 8. Absorção de água (%) em relação ao tempo de exposição (h).

Com os resultados medidos, foi possível avaliar a capacidade dos filmes em incorporar água na sua estrutura. A amostra (AB) apresentou o maior valor de absorção, devido a natureza altamente hidrofílica do amido. A incorporação de ácido málico na amostra (AB0,5AM) promoveu uma redução significativa na absorção de água, indicando a formação de ligações cruzadas na matriz polimérica, que restringem a mobilidade das cadeias e a disponibilidade dos grupos hidroxila para interações hidrofílicas (Kotekewis, 2024).

Na amostra com adição de negro de fumo (ANF) resultou na menor absorção de água. Esse comportamento pode estar associado à introdução da carga carbonácea, que pode estar atuando como barreira física a difusão da água na matriz polimérica. Na formulação contendo tanto negro de fumo quanto ácido málico (ANF0,5AM) observou-se uma redução menor quando comparada apenas a amostra contendo negro de fumo (ANF) sugerindo que embora o ácido málico atue na formação de ligações cruzadas, a presença do negro de fumo pode limitar parcialmente esse efeito, possivelmente devido à ocupação de espaços na matriz polimérica ou à interferência na

densidade de empacotamento das cadeias, porém, os resultados ainda demonstram menor absorção de água se comparados as amostras sem a carga de negro de fumo.

Para a avaliação da integridade física das amostras, foi avaliado o inchamento das amostras e seu aspecto ao final do tempo de exposição (Figura 9).

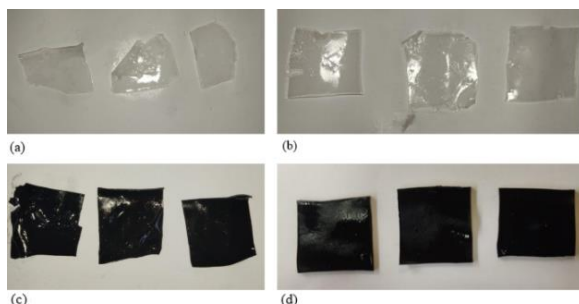


Figura 9. Aspecto físico das amostras após o ensaio de absorção de água: (a) AB, (b) AB0,5AM, (c) ANF, (d) ANF0,5AM.

A partir da avaliação, pode-se observar que a amostra (AB) não apresentou inchamento após 24 horas de imersão em água, enquanto a amostra (AB0,5AM) apresentou um inchamento linear de 25%. A amostra (ANF) apresentou um inchamento linear de 50%, e a amostra (ANF0,5AM) apresentou um inchamento linear de 25%. Em relação à integridade física, as amostras sem a adição de negro de fumo mostraram-se mais sensíveis ao manuseio, apresentando desintegração ao longo do manuseio. Já as amostras aditivadas com negro de fumo apresentaram melhor resistência física, embora uma das amostras do grupo (ANF) tenha apresentado um leve rompimento. Observou-se ainda que as formulações contendo ácido málico, apesar de apresentarem maior capacidade de inchamento, mantiveram maior integridade física. Isso ocorre pois o ácido málico atua como agente de reticulação (*crosslinking*), que impede a dissolução do filme em meio aquoso. Dessa forma, embora a água seja absorvida e fique ocluída na matriz, o filme não se desintegra.

A perda de massa está representada no gráfico da Figura 10, onde pode-se observar que a perda de massa das amostras se apresentou mais intensificada nas amostras sem aditivção de ácido málico.

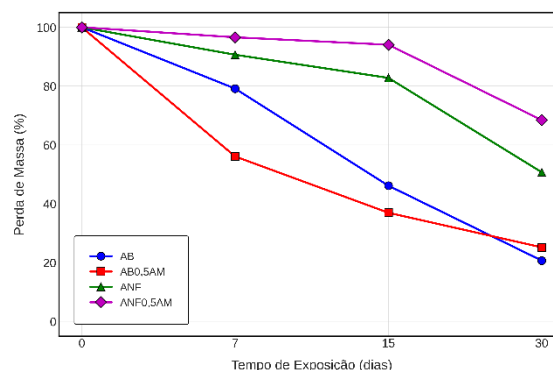


Figura 10. Ensaio de biodegradação: perda de massa medida no tempo de exposição.

Avaliando os resultados apresentados, a amostra (AB) apresentou a maior taxa de perda de massa em todos os tempos avaliados, atingindo aproximadamente 80% aos 30 dias. Esse resultado está diretamente relacionado à natureza altamente biodegradável do amido, cuja estrutura rica em grupos hidroxila é prontamente assimilada pelos microrganismos presentes no ambiente.

A adição de ácido málico na formulação (AB0,5AM) conferiu uma leve redução na taxa de biodegradação inicial, quando comparada à amostra controle (AB). Esse fator pode ser atribuído à formação de ligações cruzadas (*crosslinking*) entre o ácido e os grupos hidroxila do amido, reduzindo ligeiramente a disponibilidade de sítios para ataque microbiano.

A amostra contendo apenas negro de fumo (ANF) apresentou a menor taxa de perda de massa, chegando a aproximadamente 45% aos 30 dias. Esse comportamento pode estar associado à presença da carga carbonácea inerte do negro de fumo, que, ao ser incorporada na matriz polimérica, atua como uma barreira física, dificultando tanto a difusão de água quanto o acesso dos microrganismos às matrizes poliméricas.

A formulação contendo tanto negro de fumo quanto ácido málico (ANF0,5AM) apresentou um comportamento intermediário, com perda de massa em torno de 30% aos 30 dias. Isso sugere que a ação combinada dos dois aditivos promove um efeito sinérgico na redução da biodegradação, possivelmente pela barreira física do carvão associada as ligações cruzadas proporcionadas pelo ácido málico.

A integridade física das amostras foi avaliada ao final do ensaio, a fim de se avaliar visualmente a perda de massa (Figura 11).

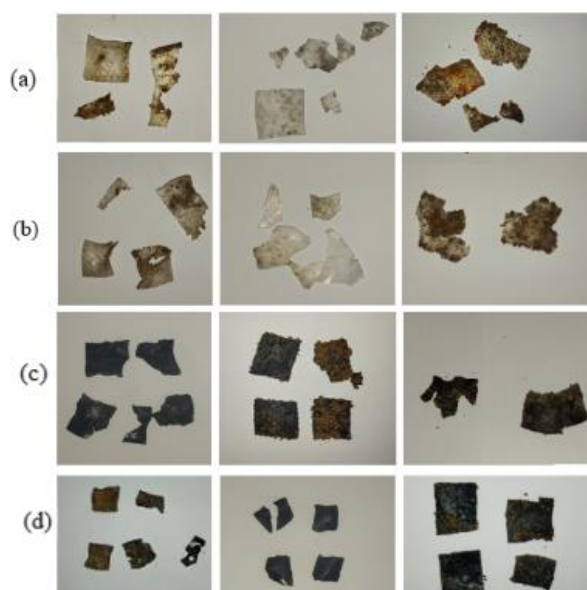


Figura 11. Aspecto físico das amostras após sete (7-esquerda), quinze (15-centro) e trinta (30-direita) dias a biodegradação: (a) AB, (b) AB0,5AM (c) ANF, (d) ANF0,5AM

A amostra (AB) apresentou rápida degradação, com intensa fragmentação já aos 15 dias e quase total desintegração em 30 dias. A formulação (AB0,5AM) apresentou maior resistência, mantendo parte da integridade até os 15 dias, mas com rupturas visíveis aos 30 dias. As amostras (ANF) e (ANF0,5AM) foram as que melhor mantiveram a integridade física, com sinais de degradação mais discretos, especialmente na (ANF0,5AM), que apresentou apenas pequenas fissuras e perda superficial após 30 dias. Indicando que a aditivação se mostrou favorável para a permanência da integridade das amostras para aplicação no solo.

As condições climáticas observadas durante o período de exposição das amostras na cidade de Porto Alegre, com temperaturas médias de 20,17 °C aliadas a elevados índices de precipitação de 76% em (INMET, 2025), proporcionaram um ambiente de alta umidade relativa, favorável ao desenvolvimento microbiano o que contribuiu para um ambiente propício para a degradação das amostras.

CONCLUSÃO

Os filmes desenvolvidos apresentaram boa integridade física após a produção, demonstrando facilidade no desmolde das formas de silicone e facilidade de manuseio. O aspecto físico adequado é fundamental, uma vez que garante que o material seja de fácil aplicação e possua resistência suficiente para sua permanência no solo durante o cultivo.

No ensaio de ângulo de contato, as amostras contendo apenas amido apresentaram maior hidrofiliabilidade, enquanto as que receberam ácido málico e negro de

fumo mostraram comportamento mais hidrofóbico, indicando melhoria na resistência à umidade. Os resultados de absorção de umidade e de água corroboraram com o ensaio de ângulo de contato, uma vez que as amostras contendo negro de fumo apresentaram menor absorção, atuando como barreira física, enquanto o ácido málico contribuiu para maior estabilidade da matriz polimérica, reduzindo o inchamento e favorecendo a integridade física das amostras durante os testes.

No ensaio de biodegradação, a formulação composta apenas por amido (AB) degradou rapidamente, chegando a 80% de perda de massa em 30 dias, enquanto as amostras contendo negro de fumo e ácido málico apresentaram menor taxa de degradação, mantendo integridade suficiente para a aplicação como filme agrícola. Considerando o ciclo de culturas de curto prazo, os resultados se mostram promissores, visto que os filmes permanecem no solo por um período que possibilita sua permanência estrutural no solo e, após esse período, seguem o processo de biodegradação, sem deixar resíduos nocivos ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo apoio e suporte durante o desenvolvimento desta pesquisa. Ao Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL), minha gratidão pela estrutura, pelos recursos e pela disponibilidade que foram essenciais para a realização dos ensaios. Estendo meus agradecimentos ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, pela disposição em compartilhar conhecimentos e fornecer materiais indispensáveis para este trabalho. Agradeço, em especial, à professora Ruth, não apenas pela orientação, mas também pela dedicação, incentivo e troca de conhecimentos, que foram fundamentais em cada etapa deste processo.

REFERÊNCIAS

- Lambert, R. A., et al. 2017. “Mulching is an option for increasing watermelon productivity.” *Revista de Agricultura Neotropical*, [S. l.], v. 4, n. 1, 53-57. <https://doi.org/10.32404/rean.v4i1.118>.
- Silva, G. D. 2020. “Mulching e adubação de liberação controlada em lavoura cafeeira na região do cerrado mineiro.” Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) — Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, 30f.
- Avérous, L. 2004. “Biodegradable multiphase systems based on plasticized



- starch: A review.” *Journal of Macromolecular Science-Polymer*, [S. l.], v. C24 231-274.
- Sousa, J. W., Martins, D., Cunha, A. R., Escobedo, J. F., Galvani, E. 2002. “Alterações da temperatura e umidade relativa do ar em ambiente protegido com cobertura de polietileno difusor de luz.” *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, [S. l.], v. 10, n. 1, 1-9.
 - RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. *Painel do Agronegócio do Rio Grande do Sul – 2023*. Departamento de Economia e Estatística (DEE/SPGG), [s. l.], 2023.
 - Tiwari, E.; Sistla, S. 2024. “Agricultural plastic pollution reduces soil function even under best management practices.” *PNAS Nexus*, [S. l.], v. 3, n. 10, pgae433.
 - Liang, Y.; Lehmann, A.; Yang, G.; Leifheit, E. F.; Rillig, M. C. 2021. “Effects of microplastic fibers on soil aggregation and enzyme activities are organic matter dependent.” *Frontiers in Environmental Science*, [S. l.], v. 9, 650155.
 - Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. 2013. “Phase transitions in starch based films containing fatty acids: Effect on water sorption and mechanical behaviour.” *Food Hydrocolloids*, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 408–418.
 - COELHO, D. de B.; MARIANO, R. M.; ZINE, C. L. G.; NUNES, R. C. R.; VISCONTE, L. L. Y. Misturas NR/SBR: influência da ordem de adição dos aditivos da mistura e do tipo de carga sobre propriedades mecânicas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 21, n. 3, p. 204-209, 2011.
 - Medeiros, N. C. F. L. 2021. “Caracterização eletromagnética do compósito de carbetto de silício e negro de fumo em matriz polimérica.” *Matéria (Rio J.)*, [S. l.], v. 26, n. 2.
 - Martins, Andrea Bercini. 2015. “EFEITO DE ÁCIDOS CARBOXÍLICOS EM BLENDA DE POLIPROPILENO E AMIDO TERMOPLÁSTICO.” Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
 - Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
 - Helen, Koteckewis. 2025. “Blendas biodegradáveis de amido/PVA aditivadas com lignina e ácido málico para aplicação em embalagens sustentáveis.” Dissertação de mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 132.
 - Silva, C. V. F. de O. 2021. “Tendências e variabilidades climáticas em regiões com diferentes classes de uso e cobertura do solo no Rio Grande do Sul.” *Universidade Federal de Santa Catarina*, [S. l.], 13 set. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Agronomia.
 - Instituto Nacional de Meteorologia. 2025. “Dados meteorológicos históricos.” Ministério da Agricultura e Pecuária, [S. l.], 2025.m