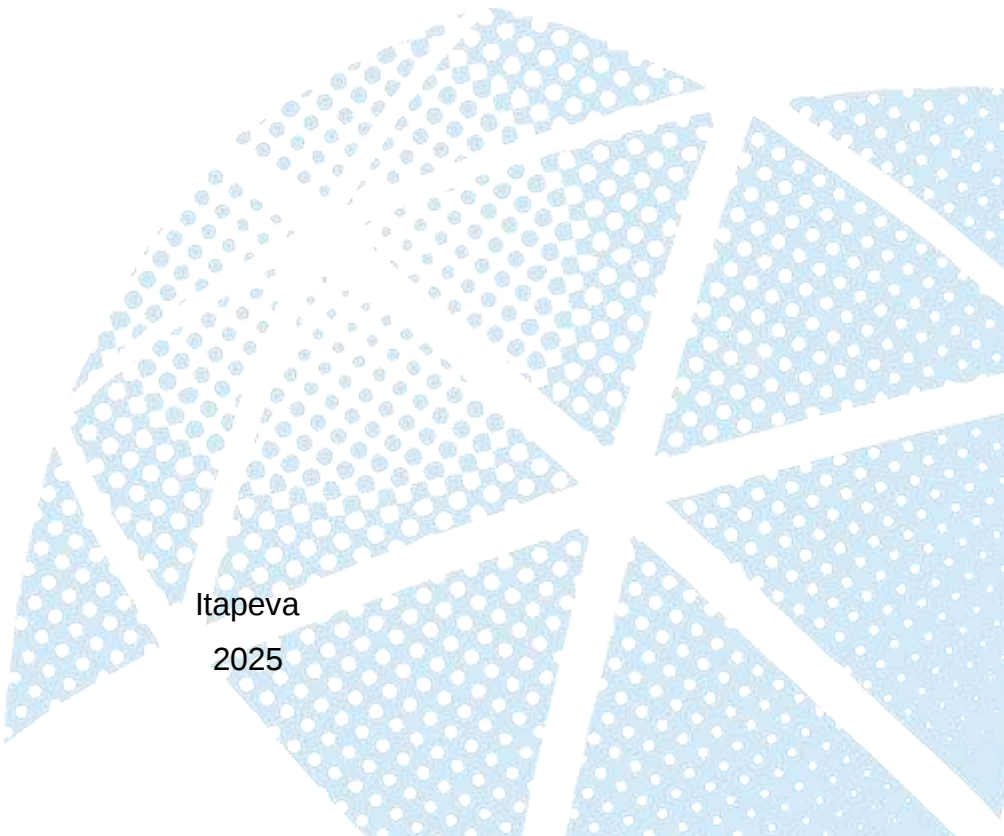


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Instituto de Ciências e Engenharia - Campus de Itapeva

MATEUS HENRIQUE DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM ADESIVO SUSTENTÁVEL À
BASE DE AMIDO DE TRIGO REFORÇADO COM FIBRAS DE ALGODÃO**

Itapeva
2025



MATEUS HENRIQUE DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM ADESIVO SUSTENTÁVEL À
BASE DE AMIDO DE TRIGO REFORÇADO COM FIBRAS DE ALGODÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e
Engenharia, Itapeva, para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de
Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Mérlin Cristina
dos Santos Fernandes

Itapeva

2025

L732d

Lima, Mateus Henrique de

Desenvolvimento e caracterização de um adesivo sustentável à base de amido de trigo reforçado com fibras de algodão / Mateus Henrique de Lima. -- Itapeva, 2025

49 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva

Orientadora: Mérilin Cristina dos Santos Fernandes

1. Biopolímeros. 2. Sustentabilidade. 3. Amido. I. Título.

MATEUS HENRIQUE DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM ADESIVO SUSTENTÁVEL
À BASE DE AMIDO DE TRIGO REFORÇADO COM FIBRAS DE ALGODÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Mérlin C. S. Fernandes

Orientador: Prof.^a Dr.^a Mérlin Cristina dos Santos Fernandes
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Bruno Santos Ferreira

2º Examinador: Prof. Dr. Bruno Santos Ferreira
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva

Augusto Batagin Neto

3º Examinador: Prof. Dr. Augusto Batagin Neto
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 19/11/2025.

Dedico este trabalho à minha mãe que,
embaixo de muito sol, me fez chegar até
aqui, na sombra.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, à Professora Mérlin pela orientação neste TCC e durante a disciplina de Laboratório de Materiais Poliméricos, onde realizamos o projeto acerca dos polímeros biodegradáveis. O projeto realizado na disciplina não apenas serviu como a semente inicial para esta pesquisa, mas também representou uma experiência prática fundamental para o meu aprendizado sobre os polímeros naturais e sintéticos.

Meu agradecimento especial aos meus colegas Clayton e Arthur que estiveram do meu lado durante o desenvolvimento deste trabalho. Foi um privilégio enorme ter vocês comigo nessa caminhada. A dedicação, o conhecimento compartilhado e o esforço de cada um fizeram toda a diferença e foram fundamentais para que este trabalho se tornasse possível.

À minha mãe, minha companheira de vida. Não há palavras que possam retribuir todo o seu apoio. Obrigado por ser meu alicerce, por sempre acreditar em mim e nunca medir esforços para que eu pudesse chegar até aqui. Seu incentivo para que eu sempre estudasse e buscasse um futuro melhor foi o combustível que me moveu nos momentos mais difíceis.

Gostaria de estender meus agradecimentos aos professores Bruno Santos Ferreira e Augusto Batagin Neto por aceitarem o convite para compor minha banca examinadora. Da mesma forma, expresso reconhecimento e gratidão à equipe técnica do laboratório, que não apenas cedeu o espaço para a pesquisa, mas também me instruiu durante todo o desenvolvimento prático deste projeto.

Por fim, agradeço a Deus pela vida, pela força e pela fé. Sou imensamente grato por cada oração atendida e pelas bênçãos que recebo a cada semana que se inicia. Encontrei em minha fé a paz e a resiliência necessárias para chegar até aqui.

RESUMO

A crescente preocupação ambiental tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis para materiais de base petroquímica, como os adesivos sintéticos. Neste contexto, no presente trabalho foi desenvolvido e avaliado um adesivo biodegradável à base de amido de trigo, reforçado com fibras de algodão em concentrações de 0%, 5%, 10% e 15% (em massa). O adesivo foi produzido por gelatinização e modificação ácida, e seu desempenho mecânico foi avaliado por ensaios de resistência ao cisalhamento em corpos de prova de MDF, sendo comparado a um adesivo comercial de poliacetato de vinila (PVA) por testes de resistência ao cisalhamento e biodegradabilidade em solo. Os resultados indicaram que todas as formulações do adesivo de amido, incluindo o controle (0% de fibras), apresentaram desempenho mecânico superior ao do adesivo PVA (0,32 MPa). A formulação com 15% de fibras atingiu a maior resistência ao cisalhamento média (0,47 MPa), porém, a análise de variância (ANOVA) revelou que a adição de fibras não produziu um efeito estatisticamente significativo ($P\text{-value} > 0,05$) no desempenho, o que é atribuído a desafios na dispersão do reforço. Adicionalmente, o ensaio de biodegradabilidade confirmou o perfil ecológico do material, com perdas de massa de 89,4% para a amostra sem fibras (0%) e 81,2% para a amostra com 15% de fibras após 7 dias de soterramento em solo, demonstrando elevada biodegradabilidade em ambas as formulações. Conclui-se que o adesivo de amido de trigo modificado é uma alternativa mecanicamente competitiva ao PVA e que o principal desafio para a otimização de seu desempenho via reforço reside no controle do processamento para garantir a dispersão homogênea das fibras.

Palavras-chave: biopolímeros; biocompósito; sustentabilidade; fibras naturais.

ABSTRACT

The growing environmental concern has driven the search for sustainable alternatives to petrochemical-based materials, such as synthetic adhesives. In this context, this work developed and evaluated a biodegradable adhesive based on wheat starch, reinforced with cotton fibers at concentrations of 0%, 5%, 10%, and 15% (by mass). The adhesive was produced by gelatinization and acid modification, and its mechanical performance was evaluated by shear strength tests on MDF specimens, being compared to a commercial polyvinyl acetate (PVA) adhesive by shear strength and biodegradability tests in soil. The results indicated that all formulations of the starch adhesive, including the control (0% fibers), showed superior mechanical performance compared to PVA adhesive (0.32 MPa). The formulation with 15% fibers achieved the highest average shear strength (0.47 MPa); however, the analysis of variance (ANOVA) revealed that the addition of fibers did not produce a statistically significant effect ($P\text{-value} > 0.05$) on performance, attributed to challenges in dispersion of reinforcement. Additionally, the biodegradability test confirmed the ecological profile of the material, with mass losses of 89.4% for the sample without fibers (0%) and 81.2% for the sample with 15% fibers after 7 days of burial in soil, demonstrating high biodegradability in both formulations. It is concluded that the modified wheat starch adhesive is a mechanically competitive alternative to PVA and that the main challenge for optimizing its performance via reinforcement lies in controlling the processing to ensure homogeneous fiber dispersion.

Keywords: biopolymers; biocomposite; sustainability; natural fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das geometrias de juntas coladas	20
Figura 2 – Esforços submetidos em determinados componentes	21
Figura 3 – Distribuição da tensão ao longo do comprimento de sobreposição	21
Figura 4 – Matérias-Primas para obtenção do adesivo	22
Figura 5 – Equipamentos e utensílios utilizados na obtenção dos adesivos	23
Figura 6 – Suspensão de amido de trigo e água preparada na chapa aquecedora	24
Figura 7 - Corpos de prova em MDF	25
Figura 8 - Modelo esquemático dos corpos de prova	25
Figura 9 - Corpo de prova fixado para teste de cisalhamento	26
Figura 10 - Amostra de adesivo envolvida em tecido de algodão	28
Figura 11 - Amostras soterradas em garrafa PET	28
Figura 12 - Amostra obtida após a gelatinização	30
Figura 13 - Adesivo de amido com 0%, 5%, 10% e 15% de fibras de algodão	30
Figura 14 - Corpo de prova após o teste de resistência ao cisalhamento	33
Figura 15 - Adesivo sem adição de fibras de algodão (a) antes e (b) após o teste de biodegradabilidade	34
Figura 16 - Adesivo com 15% de fibras de algodão (a) antes e (b) após o teste de biodegradabilidade	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento	31
Tabela 2 – Teste ANOVA	32
Tabela 3 – Perda de massa no ensaio de biodegradabilidade	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivos específicos	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 A HISTÓRIA DOS ADESIVOS.....	12
2.2 ADESIVOS NATURAIS.....	13
2.2.1 Biopolímeros	13
2.2.2 Amido.....	15
2.2.3 Biodegradabilidade	16
2.2.4 Limitações no uso de polímeros naturais	17
2.3 ALGODÃO COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS	18
2.4. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA	19
2.4.1 Juntas coladas	19
2.4.2 Ensaio mecânico de cisalhamento	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 MATÉRIAS-PRIMAS.....	22
3.2 EQUIPAMENTOS	22
3.3 PREPARO DO ADESIVO DE AMIDO DE TRIGO REFORÇADO	23
3.4 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA PARA TESTE DE CISALHAMENTO....	24
3.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	26
3.5.1 Análise anova.....	26
3.6 TESTES PRELIMINARES DE BIODEGRADABILIDADE EM SOLO	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 OBTENÇÃO DO ADESIVO DE AMIDO DE TRIGO	30
4.2 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	31

4.2.1 Discussão consolidada.....	32
4.3 ANÁLISE DA BIODEGRADABILIDADE	33
5 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	37
APÊNDICE A – MEDIDAS DAS AMOSTRAS	42
APÊNDICE B – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DO ADESIVO DE AMIDO E PVA.....	43

1 INTRODUÇÃO

Os adesivos são materiais poliméricos de fundamental importância em inúmeros setores industriais e domésticos. A grande maioria dos adesivos de alto desempenho disponíveis comercialmente é de origem sintética, produzida a partir de monômeros derivados do petróleo, o que acarreta desvantagens ambientais significativas (Pizzi; Mittal, 2003). Embora funcionais, o uso desses materiais acarreta sérios problemas ecológicos, como a dependência de fontes não renováveis e, principalmente, sua persistência no ambiente, uma vez que não são biodegradáveis.

Diante da crescente demanda por tecnologias e produtos com menor impacto ambiental, a pesquisa por materiais de fontes renováveis ganha destaque. Os biopolímeros, como o amido, surgem como uma alternativa promissora, por serem abundantes, de baixo custo, renováveis e intrinsecamente biodegradáveis. O amido, em particular, tem sido extensivamente estudado para a produção de adesivos, especialmente para substratos celulósicos como madeira e papel (Watcharakitti *et al.*, 2022; Oktay *et al.*, 2024).

Apesar de suas vantagens, os adesivos baseados em amido puro frequentemente exibem limitações, como baixa resistência coesiva e alta fragilidade após a secagem (Kaur *et al.* 2012; Zhu, 2005). Para contornar tais limitações, diversas estratégias de modificação podem ser empregadas. A hidrólise ácida, por exemplo, pode ser utilizada para diminuir a viscosidade e melhorar as propriedades de adesão do amido (Wang; Copeland, 2015).

A introdução de fibras naturais como agente de reforço é uma técnica eficaz para aprimorar as propriedades mecânicas, já que as fibras atuam na distribuição das tensões, aumentando a resistência do compósito. O uso de fibras de algodão, em especial, é vantajoso porque, além do algodão ser natural, renovável e biodegradável, a grande quantidade de grupos hidroxila em sua estrutura possibilita uma excelente interação com adesivos hidrofílicos, tais como os baseados em amido.

Neste contexto, este trabalho se insere na investigação de adesivos sustentáveis à base de amido de farinha de trigo reforçado com fibras naturais, avaliando simultaneamente a biodegradabilidade e o desempenho mecânico em juntas de MDF. A farinha de trigo foi escolhida por conter elevada quantidade de amido (cerca de 70%) e ter baixo custo.

O desempenho do adesivo foi quantificado por meio de ensaios mecânicos de cisalhamento em substrato de MDF, enquanto a biodegradabilidade foi avaliada por soterramento em solo. Os resultados obtidos foram comparados com um adesivo sintético convencional (PVA), buscando avaliar a viabilidade técnica desta alternativa de menor impacto ambiental. A avaliação da biodegradabilidade em solo, por sua vez, é um passo importante para validar o ciclo de vida sustentável desses novos materiais.

Diante disso, busca-se responder à seguinte questão de pesquisa: o reforço com fibras de algodão é capaz de melhorar significativamente o desempenho mecânico de um adesivo à base de amido de trigo, mantendo seu caráter biodegradável e competitivo em relação à cola de acetato de polivinila?

1.1 OBJETIVOS

Desenvolver e caracterizar, em escala laboratorial, um adesivo biodegradável à base de amido de trigo, reforçado com fibras de algodão, como alternativa sustentável aos adesivos sintéticos.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Preparar um adesivo à base de amido de trigo e incorporar fibras de algodão em diferentes concentrações (0%, 5%, 10% e 15%);
- Avaliar a influência da concentração das fibras de algodão na propriedade de resistência ao cisalhamento do adesivo quando aplicado em substrato de MDF;
- Comparar o desempenho de adesão da melhor formulação do adesivo desenvolvido com um adesivo de poliacetato de vinila (PVA) convencional;
- Realizar testes preliminares de biodegradabilidade em solo da formulação de melhor desempenho e do adesivo controle.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A HISTÓRIA DOS ADESIVOS

O uso de adesivos pela humanidade é muito antigo, e existem registros desde 3.000 anos antes da era comum. Os egípcios já usavam uma goma arábica retirada de essências florestais e uma cola feita com pasta de farinha na fabricação dos primeiros papiros de lâminas finas, justapostas e coladas (Azevedo, 2009).

Os antigos egípcios ainda utilizavam a resina de coníferas, extraída de árvores como o pinheiro, para variados fins, incluindo a fabricação de adesivos para fixação de objetos e o embalsamamento de corpos. As propriedades adesivas e impermeabilizantes da resina, semelhantes a um verniz natural, bem como sua ação antibacteriana, que ajudam a prevenir a decomposição, tornavam possíveis esses usos (Kulitch, 2023).

Segundo Liesa e Bilurbina (1990), o desenvolvimento industrial de adesivos teve início no final do século XVII, com a Holanda abrigando a primeira fábrica de colas de origem animal. Ao longo do século XVIII, o cenário evoluiu na Inglaterra, onde se registrou a primeira patente de cola derivada de pescados e, no final do mesmo século, a patente do uso da borracha natural como adesivo.

A evolução dos adesivos foi lenta até o início do século XX, sendo a maioria dos utilizados até a Primeira Guerra Mundial de origem proteica animal. Somente após esse período é que surgiram novas formulações, mais resistentes à umidade e aplicáveis em temperatura ambiente. Tais adesivos permanecem em uso até os dias atuais em diversos países para a colagem de peças estruturais de madeira em ambientes internos (Campos; Lahr, 2004).

Segundo Iwakiri (2005) e Azevedo (2009), na década de 1930, os adesivos sintéticos causaram uma verdadeira revolução na produção e no design de móveis. Em 1929, foi criado o fenol-formaldeído, o primeiro adesivo sintético; em 1931, surgiu o adesivo à base de ureia-formaldeído; em 1937, o químico alemão Otto Bayer criou os primeiros adesivos de poliuretano; em 1939, surgiu o adesivo de melamina-formaldeído; e em 1943, foi criado o adesivo de resorcina-formaldeído, que, apesar de mais caro, oferecia maior resistência à água.

O contínuo desenvolvimento dos adesivos ao longo dos anos consolidou sua presença em diversos setores. No alimentício, como destaca Souza (2015), o adesivo tem permitido a evolução dos envasamentos, utilizando sistemas mais eficientes, mais práticos e mais econômicos, sem apresentar os problemas de corrosão que apresentavam os produtos metálicos.

Souza (2015) ainda afirma que, nos tempos atuais, um dos setores que mais adotou o uso de adesivos foi o setor automobilístico, que utiliza os adesivos não só como elemento de união de alguns elementos como vidros, retrovisores, juntas em portas, capôs e revestimentos interiores, quanto em aplicações estruturais, desde a construção da carroceria dos veículos, baús de caminhões e compartimentos de caminhões frigoríficos.

A indústria aeroespacial também tem uma relação histórica com os adesivos. Essa trajetória teve início nos primórdios da aviação, com a colagem de materiais como madeira e tecido, e se consolidou como o principal método de união de metais leves, como alumínio e titânio, nas aeronaves modernas. Essa transição foi fundamental para a redução de peso, um fator crítico para a eficiência e o desempenho de veículos aeroespaciais, sejam eles comerciais, militares ou espaciais (Pizzi; Mittal, 2003).

2.2 ADESIVOS NATURAIS

2.2.1 Biopolímeros

A indústria de adesivos tradicional é predominantemente sustentada por resinas sintéticas que derivam de variados tipos de estruturas químicas, como fenólicos (à base de fenol e formaldeído), copolímeros de etileno, conhecidos como *hot-melt* de EVA, poliacetato de vinila, epóxis, acrílicos, poliamida, poliéster, silicone cianoacrilato e poliuretânicos (Marques, 2009). Impulsionados pelo avanço tecnológico, diversos setores industriais buscam materiais alternativos para melhorar o desempenho e reduzir custos de produção. Nesse contexto, pesquisas com polímeros das mais variadas fontes têm sido alvo de grande interesse no mercado (Cristino *et al.*, 2016).

Borschiver *et al.* (2008) afirmam que o petróleo foi, durante décadas, a principal fonte de matéria-prima para polímeros. Contudo, com o aumento de seu preço e a preocupação ambiental que ganhou espaço na sociedade, houve um impulso pela busca de novas fontes de polímeros.

Flieger *et al.* (2003) definem biopolímeros como polímeros produzidos a partir de recursos renováveis pela ação de micro-organismos, plantas e animais. É possível, ainda, sintetizá-los quimicamente a partir de matérias-primas como açúcares, óleos, amido e gorduras.

Segundo Pradella (2006), a literatura científica cita uma variedade de biopolímeros, dentre os quais se destacam:

a) o PLA (ácido polilático), um poliéster obtido por síntese química a partir do ácido lático, monômero derivado da fermentação de açúcares presentes no milho ou na cana-de-açúcar. Esse material apresenta potencial de aplicação na fabricação de embalagens, produtos de descarte único e fibras têxteis para vestuário e forrações;

b) o PHA (poli-hidroxialcanoato), que compreende uma extensa família de poliésteres de origem microbiana. Sua produção ocorre por biossíntese direta, na qual bactérias fermentam carboidratos da cana-de-açúcar ou do milho, ou mesmo óleos vegetais, como os de soja e palma;

c) os polímeros à base de amido, polissacarídeos modificados quimicamente ou não, extraídos de fontes como milho, batata, trigo ou mandioca. Suas aplicações incluem a produção de embalagens, itens de descarte rápido e, quando combinados com polímeros sintéticos na forma de *blendas*, a confecção de filmes flexíveis;

d) goma xantana, um exopolissacarídeo produzido por microrganismos a partir de carboidratos do milho ou da cana-de-açúcar. Sua utilização é consolidada na indústria de alimentos e possui aplicações promissoras nas áreas de cosméticos e na exploração de petróleo.

Dentre os biopolímeros citados, o amido se destaca pela ampla disponibilidade e pelo histórico de uso em adesivos para papel, madeira e embalagens, motivo pelo qual é adotado neste trabalho.

2.2.2 Amido

O amido é um dos polissacarídeos mais abundantes do reino vegetal; está presente em frutos, sementes e até em raízes. Possui ampla aplicabilidade industrial, especialmente na área de alimentos, onde atua na definição de textura, consistência, umidade e prazo de validade, é diretamente influenciada pelas suas propriedades físico-químicas, as quais variam conforme sua origem botânica (Raeker, 1998).

Em termos de estrutura, este homopolissacarídeo é constituído por dois tipos de moléculas: a amilose, formada por cadeias lineares de glicose conectadas por ligações α -1,4 e a amilopectina, de estrutura altamente ramificada devido às ligações α -1,4 e α -1,6. A proporção entre esses componentes não é fixa, podendo variar significativamente entre espécies, variedades e até mesmo com o estágio de maturação da planta (Eliasson, 2004; Tester *et al.*, 2004). O amido é encontrado na forma de grânulos nos amiloplastos da célula, e suas características morfológicas variam com sua fonte botânica (Sanguanpong *et al.*, 2002).

Os grânulos de amido são semicristalinos e seu grau de cristalinidade (entre 15% e 45%) está intimamente ligado à sua composição, sendo a região amorfa predominantemente associada à amilose e as zonas cristalinas à amilopectina (Matignon; Tecante, 2017; Rocha; Demiate; Franco, 2008).

Dentre as diversas fontes, o trigo se destaca como a principal matéria-prima para obtenção de amido em escala global. Devido a sua relevância econômica e à ampla utilização deste cereal, pesquisas são cada vez mais incentivadas, com o intuito de promover avanços específicos em nutrição, saúde e inovação tecnológica (Scheuer *et al.*, 2011).

O amido de trigo apresenta uma distribuição bimodal de grânulos, classificados em tipo A (diâmetro superior a 10 μ m) e tipo B (diâmetro igual ou inferior a 10 μ m). Essa diferença no tamanho depende da composição. Grânulos do tipo B possuem geralmente menor teor de amilose e maior concentração de lisofosfolipídeos, o que impacta diretamente propriedades funcionais, como o poder de inchamento e o comportamento durante a gelatinização (Shinde; Nelson; Huber, 2003).

O processo de gelatinização é uma das transformações mais significativas do amido e ocorre quando o amido é aquecido em meio aquoso. Caracteriza-se por ser uma sequência de eventos irreversíveis que incluem o inchamento dos grânulos, a

perda de birrefringência, a fusão dos cristais e um marcante aumento de viscosidade (Lineback; Rasper, 1988). Conforme definido por Atwell *et al.* (1988), a gelatinização é o colapso da estrutura molecular ordenada do grânulo. A temperatura em que se inicia esse processo depende de fatores como a concentração da dispersão, o método de análise e as características dos grânulos.

O fenômeno subsequente é conhecido como empastamento, que envolve um inchamento granular mais acentuado, exsudação dos componentes granulares moleculares e, por fim, o rompimento total dos grânulos. Após o resfriamento da pasta, ocorre a retrogradação, que é a reassociação das moléculas de amido em uma estrutura ordenada. Nas fases iniciais, essa reassociação pode levar à formação de géis e, sob condições favoráveis, ao desenvolvimento de uma nova ordem cristalina e à precipitação (Atwell *et al.*, 1988).

2.2.3 Biodegradabilidade

Flieger *et al.* (2003) afirmam que os biopolímeros, em sua maioria, são biodegradáveis e não são tóxicos ao meio ambiente. É possível definir como biodegradáveis materiais poliméricos capazes de sofrer decomposição na presença de dióxido de carbono, metano, água, compostos inorgânicos ou biomassa proveniente de uma ação enzimática de microrganismos (Franchetti; Marconato, 2006).

De acordo com Paoli (2008), a biodegradação é um processo no qual microrganismos, como bactérias, fungos e algas, utilizam um material como substrato nutritivo. Para que isso ocorra, é importante que esses organismos possuam enzimas capazes de quebrar algumas das ligações químicas da cadeia polimérica, sob condições ambientais favoráveis de temperatura, umidade, pH e disponibilidade de oxigênio.

Os métodos para avaliação da biodegradação, descritos na literatura, se baseiam no acompanhamento de alguns indicadores. Pode-se citar como exemplo o crescimento de micro-organismos, o consumo do polímero utilizado como substrato, a liberação de dióxido de carbono (CO₂) e as mudanças nas propriedades do material (Bastioli, 2005). Uma síntese de alguns deles é apresentada a seguir.

a) Avaliação do crescimento microbiano em contato com o polímero: De acordo com Fukushima *et al.* (2009), esse método consiste em isolar micro-organismos com potencial de degradação e expor amostras poliméricas a uma solução contendo esses organismos. Dessa forma, a taxa de biodegradação pode ser correlacionada diretamente com a velocidade de crescimento das colônias, permitindo avaliar a eficiência do processo.

b) Medição da liberação de CO₂: Nesta abordagem, o polímero é disposto em um ambiente propício à biodegradação, como solo ou solução, e a quantidade de dióxido de carbono liberada ao longo do tempo é monitorada. Essa taxa de emissão de CO₂ serve como um indicador direto da degradação do material (Itavaara; Karjomaa; Selin, 2002).

c) Ensaio em ambiente simulado (compostagem, solo ou aterro sanitário): Conforme Gattin *et al.* (2002), este método consiste em enterrar o material polimérico sob condições controladas de temperatura, pH, umidade e oxigênio. Em intervalos de tempo pré-definidos, as amostras são recuperadas e submetidas a caracterizações que incluem técnicas como microscopia, ensaios mecânicos, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e mensuração da variação de massa.

2.2.4 Limitações no uso de polímeros naturais

Apesar dos benefícios ao meio ambiente, a aplicação de polímeros naturais na produção de adesivos enfrenta algumas limitações. Conforme apontado por Jesus (2020), um dos principais desafios é a sua degradação acelerada em comparação com os polímeros sintéticos. Para contornar esse problema, é essencial incorporar aditivos que prolonguem a sua vida útil, como os agentes de reticulação. Compostos como ácidos orgânicos, enzimas, fungicidas e outros agentes antimicrobianos são fundamentais para aumentar a durabilidade desses materiais.

Outra limitação significativa está na baixa estabilidade hidrolítica desses adesivos. A sensibilidade à umidade torna sua aplicação frágil em ambientes úmidos, podendo deteriorar as propriedades físico-mecânicas de alguns materiais, como exemplo na aplicação de painéis, acarretando a redução da resistência e da vida útil do produto (Gonçalves *et al.*, 2021).

Adesivos sintéticos apresentam ainda maior resistência mecânica quando comparados aos de origem natural e são fabricados em larga escala, atendendo a múltiplas demandas. Além disso, uma das grandes vantagens dos polímeros sintéticos está na possibilidade de ajustar suas propriedades durante a síntese, criando assim materiais sob medida para aplicações específicas (Pais, 2016; Barros; Melo, 2020). Neste contexto, fibras naturais como o algodão têm sido estudadas como reforço em matrizes poliméricas biodegradáveis, combinando melhoria mecânica e caráter ambientalmente amigável.

2.3 ALGODÃO COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS

O algodão (*Gossypium hirsutum latifolium Hucth*) é reconhecido como uma das fibras naturais mais antigas da humanidade e teve sua domesticação registrada há mais de quatro mil anos no sul da Arábia. Evidências históricas apontam que civilizações antigas já utilizavam esta fibra por volta de 4500 AEC, documentando seu emprego como produto de primeira necessidade em regiões como Índia, Egito, Sudão e Ásia Menor (Coêlho, 2018).

O termo "algodão" é originário do árabe "al-quTum", idioma do povo que foi pioneiro na fabricação de tecidos e papéis com esta matéria-prima. Seu uso na Europa ocorreu durante o período das Cruzadas, com consolidação comercial a partir do século XVIII diante do surgimento de novas máquinas de descaroçamento e fiação. A partir desse período, a tecelagem de algodão dominou o mercado mundial de fios e tecidos de acordo com a Associação Matogrossense Dos Produtores De Algodão - AMPA (2017).

No cenário agrícola brasileiro, a cadeia do algodão tem alcançado cada vez mais relevância. Com produção de aproximadamente 5 milhões de toneladas em 2018, o país se posiciona como quarto maior produtor global, ficando atrás de China, Índia e Estados Unidos. Só no ano de 2019, as exportações de algodão em pluma geraram uma receita de R\$ 10,6 bilhões para o Brasil como informa a Food and Agriculture Organization of United Nations - FAOSTAT (2021).

O algodão é uma fibra branca de origem vegetal, extraída dos frutos de plantas do gênero *Gossypium* (Malvaceae) e atualmente é considerado uma das fibras mais importantes de todo o planeta. Sendo gerada ao redor das sementes do algodoeiro,

essa fibra possui produção massiva e ampla aplicação comercial (Carmona *et al.*, 2015). Com relação a sua morfologia, International [...] (2009) afirma que a fibra de algodão apresenta estrutura unicelular, é constituída majoritariamente por celulose e sua dimensão varia de 10 a 65 mm de comprimento e diâmetro médio na faixa de 11 a 22 μm .

Para trabalhar com a fibra de algodão, primeiro é necessário transformá-la em fio. A transformação da fibra de algodão em fio envolve etapas sequenciais de beneficiamento. Após a colheita, o algodão em caroço passa pelo descaroçamento, processo mecânico que utiliza serras e rolos para separar a pluma. A obtenção de uma pluma de qualidade depende do controle de fatores como umidade, limpeza da fibra e dos maquinários, precedendo o processo final de fiação (Almeida *et al.*, 2011).

A abundância, disponibilidade e preço acessível do algodão tornam a fibra atrativa para aplicação como reforço em materiais compósitos (Lima, 2019). Corradini *et al.* (2009) destacam que as fibras de algodão, quando utilizadas como reforço em compósitos poliméricos, conferem melhorias de desempenho para aplicações tecnológicas, aliadas a vantagens como baixo custo, ampla disponibilidade e caráter biodegradável.

Em estudo comparativo, Balaji *et al.* (2017) avaliaram compósitos de resina poliéster insaturada reforçados com fibras de algodão, coco e suas combinações híbridas (algodão e coco) mediante ensaios de tração, flexão e impacto. Os resultados mostraram que compósitos com maior teor de fibra de algodão apresentavam propriedades mecânicas superiores. Com isso, foi possível concluir que o algodão é uma fibra de reforço mais resistente que a fibra de coco para matriz em resina poliéster, fato atribuído a uma adesão maior do algodão para essa resina.

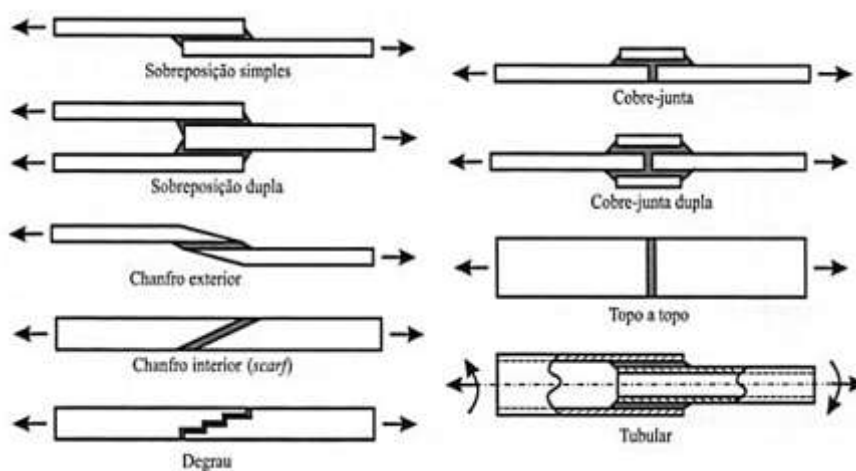
2.4. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

2.4.1 Juntas coladas

Juntas coladas são submetidas a ensaios de cisalhamento e podem apresentar geometrias diversas. A geometria da junta é selecionada de acordo com os critérios impostos pelo ensaio que variam entre magnitude das tensões aplicadas, intensidade do carregamento e viabilidade de fabricação. Conforme ilustrado na Figura 1, a

evolução dos projetos de junta buscou otimizar a distribuição de tensões com base em avanços teóricos em modelos de resistência. No entanto, no aspecto econômico, algumas geometrias de juntas possuem valor mais elevado quando comparadas a outras, em consequência, as juntas mais simples continuam sendo as mais utilizadas. As geometrias de junta mais comuns incluem as de sobreposição simples, dupla e com chanfro (Fucuhara, 2014).

Figura 1 – Evolução das geometrias de juntas coladas



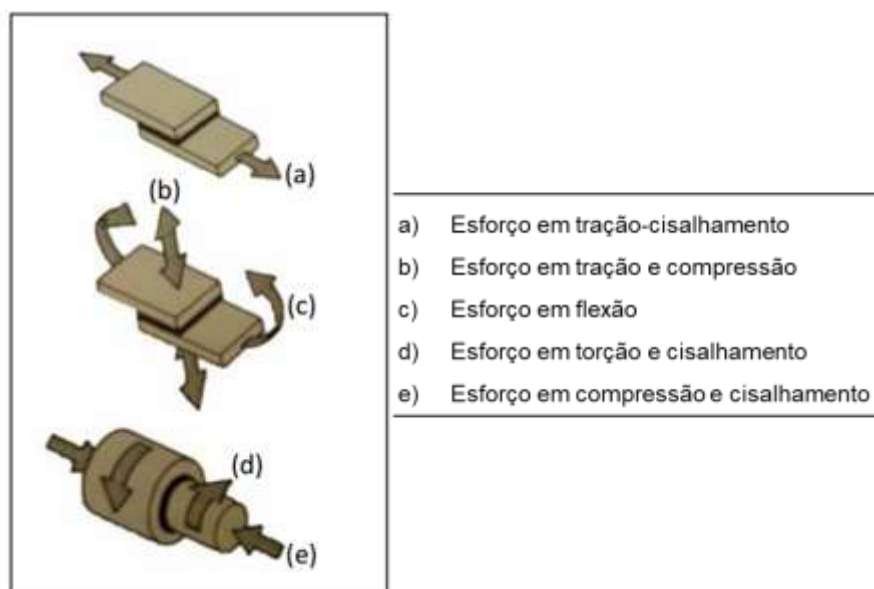
Fonte: Fucuhara (2014)

2.4.2 Ensaio mecânico de cisalhamento

Os ensaios mecânicos simulam forças físicas reais que atuam sobre os materiais. Por serem essenciais para calcular a resistência de estruturas, estes testes exigem uma análise minuciosa. No caso específico das juntas coladas, as principais forças aplicadas são tração, compressão e cisalhamento, como mostra a Figura 2 (Fauner; Endlich, 1984).

Como explicam Bodig e Jayne (1993), para avaliar a resistência de um adesivo com reforço mecânico é aplicado o ensaio de cisalhamento. Esse tipo de ensaio simula o efeito de forças paralelas e opostas que atuam tangencialmente sobre o material. Essa ação provoca deformações internas nas fibras do material. Quando submetido a esse esforço, o material reage desenvolvendo em cada ponto de sua estrutura uma resistência interna ao cisalhamento, uma resposta natural contra a separação das partes unidas pelo adesivo.

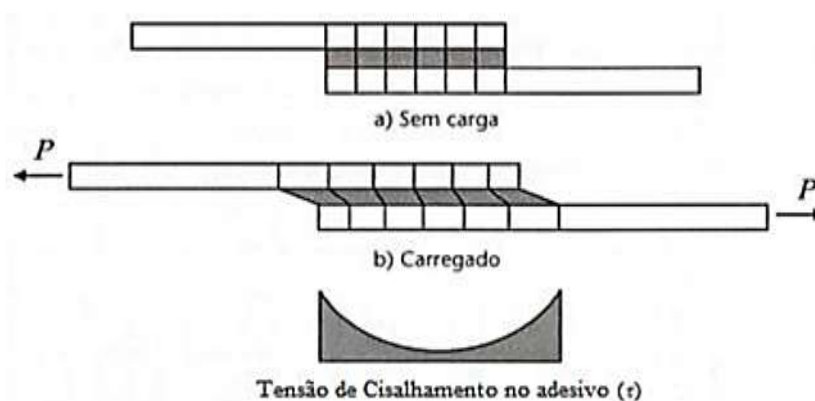
Figura 2 – Esforços submetidos em determinados componentes



Fonte: Fauner e Endlich (1984)

Silva *et al.* (2007) destacam que as tensões de cisalhamento surgem quando forças paralelas à superfície colada tentam deslizar os materiais unidos em direções opostas. As juntas geralmente apresentam maior resistência ao cisalhamento porque toda a área colada trabalha para manter os substratos alinhados. No entanto, é observado que a distribuição de tensões não é uniforme; as extremidades da sobreposição concentram a maior parte do esforço, enquanto a região do centro contribui pouco para suportar a carga. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 3, que mostra como as tensões se concentram nas bordas da junta colada.

Figura 3 – Distribuição da tensão ao longo do comprimento de sobreposição



Fonte: Silva *et al.* (2007)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATÉRIAS-PRIMAS

Para o desenvolvimento do adesivo foram utilizados farinha de trigo, algodão e vinagre branco (4 a 5% de ácido acético) comerciais e água destilada. A Figura 4 apresenta as matérias-primas utilizadas.

Figura 4 – Matérias-primas para a obtenção do adesivo



Fonte: Autoria própria (2025)

A farinha de trigo, que contém amido em sua composição, foi peneirada para evitar grumos. O algodão foi triturado em *mixer* doméstico até a obtenção de fibras curtas, sem tratamento químico adicional. O vinagre branco (4 a 5% de ácido acético) foi utilizado sem diluição para promover a modificação ácida do amido. A água destilada foi selecionada para evitar interferências de íons durante a gelatinização.

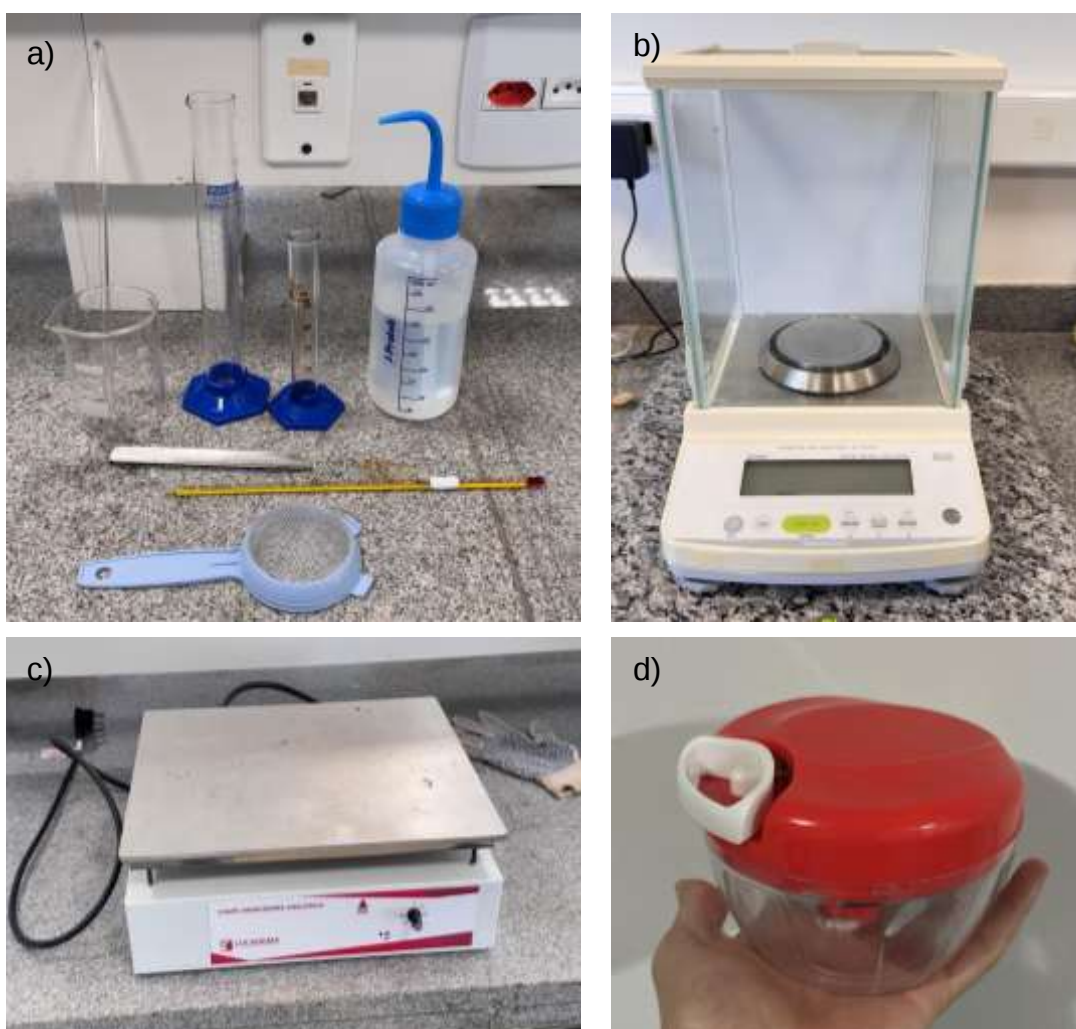
3.2 EQUIPAMENTOS

Todos os equipamentos e utensílios utilizados (Figura 5a, b e c) são de uso padrão do Laboratório de Materiais Poliméricos do ICE - Itapeva, com exceção da

peneira de uso caseiro e do mixer doméstico (Figura 5d), que foram utilizados para complementar o processo.

Os equipamentos e utensílios utilizados foram a balança analítica para pesagem dos materiais, béquer e bastão de vidro para realização da mistura, chapa aquecedora com controle de temperatura e termômetro para a realização e controle do processo de gelatinização, mixer doméstico para trituração das fibras de algodão e peneira de uso caseiro para separação das fibras de algodão.

Figura 5 – Equipamentos e utensílios utilizados na obtenção dos adesivos



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3 PREPARO DO ADESIVO DE AMIDO DE TRIGO REFORÇADO

Para o preparo do adesivo, uma suspensão de 20 g de farinha de trigo em 100 mL de água destilada foi aquecida em chapa aquecedora sob agitação constante, a

uma temperatura controlada de aproximadamente 70°C por 20 minutos (Figura 6), até a completa gelatinização do amido. Em seguida, com a mistura ainda quente, mas fora da chapa aquecedora, foram adicionados 5 mL de vinagre branco, para promover uma leve hidrólise ácida.

Figura 6 – Suspensão de amido de trigo e água preparada na chapa aquecedora



Fonte: Autoria própria (2025)

Para as formulações reforçadas, as fibras de algodão, previamente trituradas, foram adicionadas sob agitação nas proporções de 5%, 10% e 15%, calculadas com base na massa seca de farinha de trigo. A mistura final foi homogeneizada por mais 5 minutos ainda com a mistura quente, mas fora da chapa aquecedora. Logo após o preparo, o adesivo foi colado nos corpos de prova feitos a partir de MDF. O adesivo sem adição de fibras (0%) foi utilizado como controle.

3.4 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA PARA TESTE DE CISALHAMENTO

Para os testes de resistência ao cisalhamento, corpos de prova de MDF com dimensões de 8,26×2,54cm foram projetados no software AutoLaser com especificações técnicas detalhadas e, posteriormente, cortados com auxílio de uma máquina de corte a laser disponível no ICE, garantindo precisão dimensional aos

corpos de prova utilizados nos ensaios. O MDF utilizado tinha espessura de 3 mm e não foi lixado. As amostras cortadas em MDF são mostradas na Figura 7.

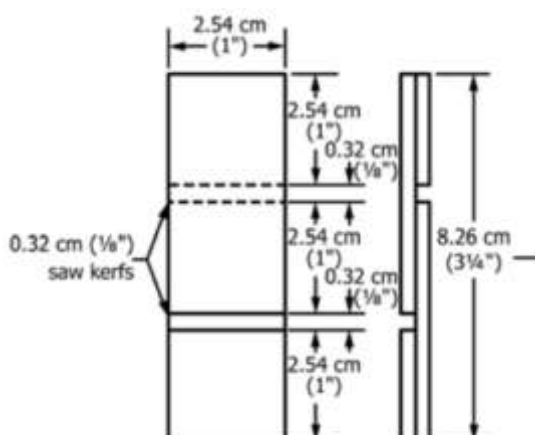
Figura 7 – Corpos de prova em MDF



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a montagem da junta sobreposta, uma área de 25,4mm x 25,4mm foi delimitada em uma das extremidades de cada corpo de prova. Uma quantidade controlada de adesivo, suficiente para formar uma camada fina, foi aplicada uniformemente sobre a área delimitada. Após a aplicação do adesivo, os corpos de prova foram mantidos em condições ambiente do laboratório por um período de cura de 48 horas. Foram preparados 4 corpos de prova para cada formulação. Os corpos de prova foram feitos segundo a norma ASTM D2339-20 (2020) como mostra a Figura 8 e suas medidas são apresentadas no Apêndice A.

Figura 8 – Modelo esquemático dos corpos de prova



Fonte: Norma ASTM D2339-20 (2020)

3.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os ensaios de resistência da junta colada foram realizados pelo método de cisalhamento por sobreposição (*lap shear*), um dos testes mais utilizados na indústria para avaliar a força de adesivos em substratos rígidos (Pizzi; Mittal, 2003). Foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC, equipada com uma célula de carga de 100 kN.

Como mostra a Figura 9, cada corpo de prova foi fixado verticalmente pelas extremidades livres nas garras da máquina, de modo que a força de tração aplicada gerasse um esforço de cisalhamento na junta colada. A força máxima de ruptura (F_{max}) foi registrada pelo software do equipamento para cada ensaio (Apêndice B), sendo este valor utilizado posteriormente para o cálculo da resistência ao cisalhamento.

Figura 9 – Corpo de prova fixado para teste de cisalhamento



Fonte: Autoria própria (2025)

3.5.1 Análise anova

Para verificar se as diferenças observadas nas resistências médias ao cisalhamento entre as formulações (0%, 5%, 10% e 15% de fibras) eram

estatisticamente significativas, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) unidirecional (One-Way). O teste foi aplicado considerando um nível de significância de 5% (P-value = 0,05). A análise foi conduzida utilizando-se o software Microsoft Excel, com os dados de resistência ao cisalhamento de cada corpo de prova como entrada.

A análise de variância (ANOVA) utiliza parâmetros específicos para avaliar a significância das diferenças entre grupos. A coluna Source of Variation indica a origem da variação, que pode ocorrer *Between Groups* (diferenças entre as médias dos grupos) ou *Within Groups* (variação interna dentro dos grupos). Essa variação é quantificada pelo SS (Sum of Squares), que representa a soma dos quadrados das diferenças em relação à média geral. Para ajustar essa medida ao tamanho da amostra, são considerados os df (Degrees of Freedom), que correspondem aos graus de liberdade disponíveis para cada fonte de variação.

A partir desses valores, calcula-se o MS (Mean Square), obtido dividindo SS pelo respectivo df, expressando a variância média associada a cada fonte. Com base nos quadrados médios, é determinada a estatística F, que compara a variabilidade entre os grupos com a variabilidade interna, sendo fundamental para verificar se as diferenças são significativas.

A interpretação do teste é feita por meio do P-value, que indica a probabilidade de se observar um valor de F igual ou maior ao obtido, assumindo que a hipótese nula (todas as médias são iguais) é verdadeira; quando esse valor é inferior ao nível de significância adotado (geralmente 0,05), rejeita-se a hipótese nula. Por fim, utiliza-se o F crit (F crítico) como referência para a estatística F, permitindo confirmar se a diferença observada é estatisticamente relevante: quando F calculado é maior que F crit, conclui-se que há diferença significativa entre os grupos.

3.6 TESTES PRELIMINARES DE BIODEGRADABILIDADE EM SOLO

Para o teste preliminar de biodegradabilidade, a metodologia descrita por Leite *et al.* (2010) foi utilizada. Os testes foram realizados em uma amostra sem adição de fibras de algodão (0%) e uma amostra com máxima concentração testada (15%), a fim de comparar a influência das fibras no processo de degradação. Foram utilizadas garrafas PET cortadas ao meio, que serviram como recipientes para o experimento.

Inicialmente, as amostras foram pesadas em balança analítica para determinação da massa inicial (m_i). Para contenção do material durante o teste, cada amostra foi cuidadosamente envolvida em tecido de algodão (Figura 10) que, por ser permeável a micro-organismos e água, garante o ambiente favorável ao processo de biodegradação, ao mesmo tempo que garante a integridade física da amostra, sem dispersão da cola.

Figura 10 – Amostra de adesivo envolvida em tecido de algodão



Fonte: Autoria própria (2025)

Em seguida, as amostras foram individualmente enterradas em garrafas PET contendo terra úmida retirada de jardim, sendo posicionadas a uma profundidade padronizada de 10 cm. Os recipientes contendo terra não foram fechados e ficaram expostos à temperatura ambiente, sendo diariamente umidificados com água. A Figura 11 mostra os recipientes nos quais foi conduzido o teste de biodegradabilidade.

Figura 11 – Amostras soterradas em garrafa PET



Fonte: Autoria própria (2025)

Após um período de 7 dias, as amostras foram cuidadosamente removidas, lavadas com água destilada para remover o excesso de solo, secas e pesadas para obtenção da massa final (mf). Os tecidos de algodão utilizados para envolver as amostras foram previamente pesados para se obter a massa e posteriormente subtraídos da massa final do adesivo para que não interferissem no processo. A porcentagem de perda de massa foi calculada pela Equação 1.

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

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 OBTENÇÃO DO ADESIVO DE AMIDO DE TRIGO

Após o aquecimento da mistura de farinha de trigo e água durante 20 minutos a 70°C, observaram-se mudanças físicas na mistura, que se tornou mais espessa e viscosa. O aumento da viscosidade e o inchamento do amido são esperados durante o processo de gelatinização, o que indica que a etapa foi bem-sucedida. A Figura 12 mostra a aparência da mistura após o processo de gelatinização.

Figura 12 - Amostra obtida após a gelatinização



Fonte: Autoria própria (2025)

A adição do vinagre branco, para a hidrólise ácida, e das fibras de algodão foi realizada em seguida. As fibras foram adicionadas nas proporções de 5%, 10% e 15% e as misturas resultantes podem ser vistas na Figura 13.

Figura 13 – Adesivo de amido com 0%, 5%, 10% e 15% de fibras de algodão



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento para cada formulação são apresentados individualmente no Apêndice B, por meio dos relatórios gerados pelo software da máquina de ensaios. Para cada formulação, foram testados 4 corpos de prova. Os valores de resistência ao cisalhamento obtidos (em MPa) e as médias calculadas estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento.

Corpo de Prova	Controle (MPa)	5% (MPa)	10% (MPa)	15% (MPa)	PVA (MPa)
1	0,42	0,61	0,34	0,53	0,34
2	0,44	0,34	0,42	0,55	0,3
3	0,38	0,44	0,37	0,38	—
4	—	—	0,47	0,43	—
Média	0,41	0,46	0,40	0,47	0,32
Desvio Padrão	0,03	0,14	0,06	0,08	0,03

Fonte: Autoria própria (2025)

No caso do adesivo controle, três dos quatro corpos de prova foram ensaiados com sucesso, resultando em uma resistência média de 0,41 MPa. Um corpo de prova descolou antes do início do ensaio, indicando uma possível falha pontual na adesão ou no preparo.

A resistência média do adesivo preparado com 5% de fibras de algodão foi de 0,46 MPa. Notou-se uma alta variabilidade nos resultados, com um corpo de prova (CP3) apresentando falha com tensão muito baixa (0,07 MPa), sendo descartado da análise de média final por ter apresentado falha no substrato e não no adesivo.

A formulação preparada com 10% de fibras de algodão apresentou uma resistência média de 0,40 MPa, valor ligeiramente inferior ao do controle, sugerindo que nesta concentração o efeito de reforço das fibras não foi eficaz. Já a mistura preparada com 15% de fibras atingiu a maior resistência média entre todos os grupos testados, com um valor de 0,47 MPa.

Por fim, o adesivo de PVA comercial, utilizado como referência, mostrou uma resistência ao cisalhamento no MDF menor do que as misturas preparadas, resultando num valor médio de 0,32 MPa.

4.2.1 Discussão consolidada

Os dados mostrados na Tabela 1 evidenciam que todas as formulações do adesivo de amido, incluindo o controle, apresentaram desempenho mecânico superior ao do adesivo PVA. Este resultado inicial é notável, sugerindo que a formulação base já possui uma excelente afinidade com o substrato de MDF (Gadhawe; Mahanwar; Gadekar, 2021).

A adição de fibras de algodão, que deveria atuar como reforço (Debiagi; Mali; Grossmann, 2021), mostrou um comportamento inconsistente. Embora a formulação com 15% de fibras tenha apresentado a maior média de resistência ao cisalhamento (0,47 MPa), a análise estatística ANOVA (Tabela 2) revelou que não há uma diferença significativa entre os grupos ($P\text{-value} > 0,05$). As principais hipóteses para essa inconsistência é a aglomeração das fibras de algodão durante a mistura, criando pontos de defeito que concentram a tensão, ao invés de distribuí-la, e a pouca quantidade de corpos de prova ensaiados, fazendo com que a distribuição dos dados das amostras não tenha sido normal, o que é um pré-requisito para a ANOVA.

Tabela 2 – Teste ANOVA

<i>Fonte de Variação</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Entre Grupos	0,038	4	0,0096	1,52	0,26	3,36
Dentro de Grupos	0,069	11	0,0063			
Total	0,11	15				

Fonte: Autoria própria (2025).

A análise do modo de falha, apresentada na Figura 14, corrobora essa interpretação. A tecnologia de adesivos diferencia a falha adesiva (na interface) da falha coesiva (no interior do adesivo) (Pizzi; Mittal, 2003). Nos grupos com 0% e 5% de fibras, a ocorrência de falhas prematuras na interface sugere uma falha predominantemente adesiva. Em contrapartida, na concentração de 15%, a fratura ocorreu no corpo do adesivo, caracterizando uma falha coesiva. Isso indica que a

adição de fibras aumentou a força interna do compósito, mesmo que limitada pela má dispersão.

Figura 14 – Corpo de prova após o teste de resistência ao cisalhamento



Fonte: Autoria própria (2025)

Em suma, embora o potencial de reforço das fibras não tenha sido plenamente alcançado, o estudo demonstra de forma conclusiva a superioridade do adesivo de amido (reforçado ou não) em relação ao PVA, com a melhor formulação (15%) sendo aproximadamente 47% mais resistente. O resultado destaca a viabilidade do adesivo e aponta o controle da dispersão do reforço como fator crítico para futuros trabalhos.

4.3 ANÁLISE DA BIODEGRADABILIDADE

Para validar o perfil ecológico do adesivo desenvolvido, foi conduzido um ensaio de biodegradabilidade em solo. Conforme descrito na metodologia, amostras do adesivo de controle (0% de fibras) e da formulação com maior desempenho mecânico (15% de fibras) foram soterradas em solo por um período de 7 dias.

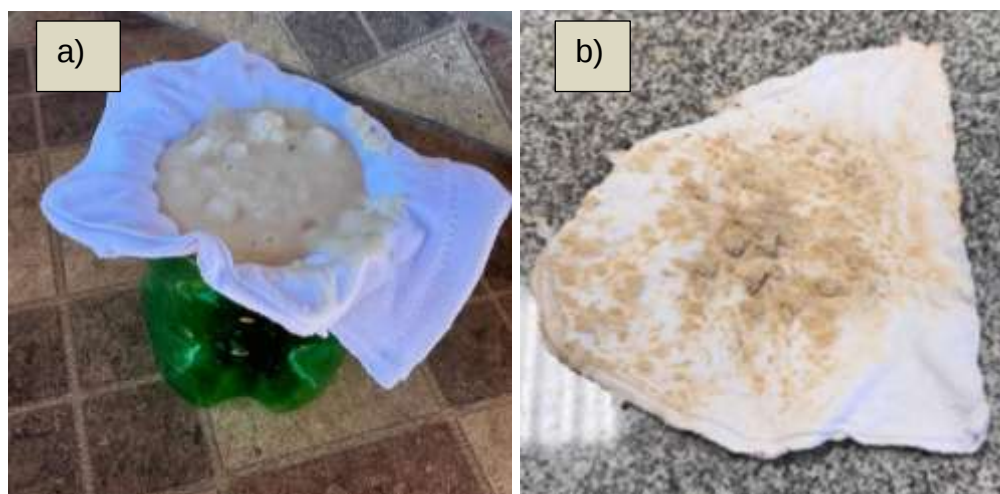
Após o período de soterramento, as amostras foram removidas e inspecionadas visualmente. As Figuras 15 e 16 mostram os adesivos antes e após o soterramento em solo.

O ensaio foi exploratório, com apenas uma amostra por formulação, o que impossibilita análise estatística. Contudo, em uma prévia inspeção visual, os resultados indicam tendências preliminares de degradação, como:

- a) Escurecimento das amostras, indicando possível oxidação e atividade microbiana, como mostram as Figuras 15b e 16b;

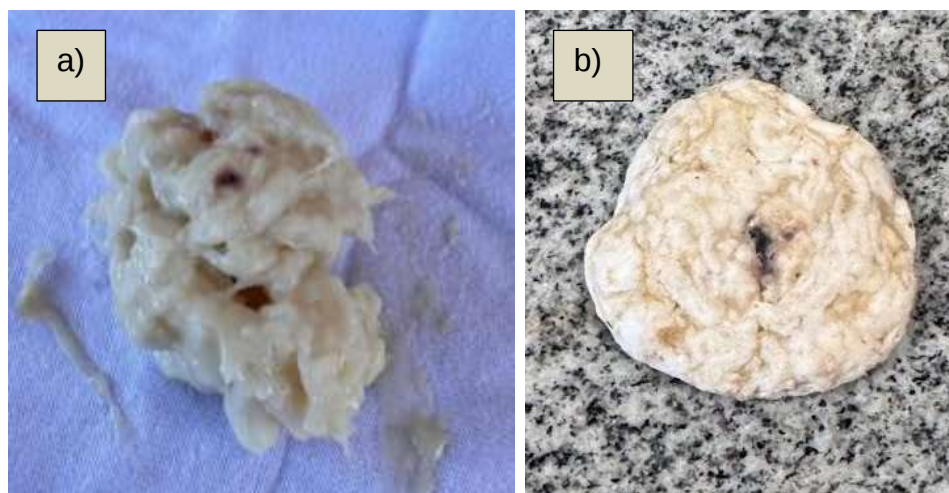
- b) Na amostra sem fibras de algodão (0%), houve perda da integridade estrutural, com fissuras e fragmentação parcial do material (Figura 15b);
- c) Colonização por fungos filamentosos (mofo) na amostra com 15% de fibras, evidenciada por manchas esverdeadas, sugerindo que as fibras podem ter criado microambientes favoráveis ao crescimento fúngico (Figura 16b).
- d) Perda de massa.

Figura 15 – Adesivo sem adição de fibras de algodão (a) antes e (b) após o teste de biodegradabilidade



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 16 – Adesivo com 15% de fibras de algodão (a) antes e (b) após o teste de biodegradabilidade



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise quantitativa da degradação foi realizada através da medição da perda de massa das amostras após secagem. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Perda de massa no ensaio de biodegradabilidade

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (%)
0%	66,44	7,0565	89,37
15%	23,7912	4,4702	81,21

Fonte: Autoria própria (2025)

A perda de massa observada nas amostras confirma a susceptibilidade do material à degradação pela ação de microrganismos presentes no solo. Este resultado é consistente com a natureza química do amido e da celulose, que são polissacarídeos facilmente metabolizados por bactérias e fungos, servindo como fonte de carbono para estes decompositores.

Ao comparar as duas formulações, a amostra de controle (0% de fibras) apresentou uma perda de massa de 89,4%, enquanto a amostra reforçada com 15% de fibras exibiu uma perda de 81,2%. A partir disso, observa-se que a amostra com fibras apresentou uma taxa de degradação ligeiramente menor (8,2% menos que a amostra pura), sugerindo que as fibras de algodão retardaram, mas não impediram, o processo de biodegradação. Esse comportamento pode ser atribuído à maior resistência da celulose à degradação microbiana em comparação com o amido, bem como à possível formação de uma estrutura mais coesa que limitou parcialmente o acesso dos microrganismos à matriz polimérica. Contudo, a presença de mofo na amostra com fibras indica que a celulose também serviu como substrato para colonização fúngica, mantendo uma biodegradabilidade significativa.

Independentemente da pequena variação entre as amostras, o resultado principal valida o ciclo de vida sustentável proposto para o adesivo. A sua capacidade de se decompor em um curto período o diferencia fundamentalmente dos adesivos sintéticos de origem petroquímica, que persistem no ambiente por centenas de anos, alinhando o projeto aos objetivos de sustentabilidade e redução do impacto ambiental.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho indicou a viabilidade da produção de um adesivo sustentável à base de amido advindo da farinha de trigo e alcançou os objetivos de sintetizar e avaliar mecanicamente as formulações.

Conclui-se que, sob as condições testadas, todas as formulações do adesivo de amido, incluindo a de controle (0% de fibras) com resistência média de 0,41 MPa, apresentaram desempenho mecânico superior ao do adesivo PVA comercial (0,32 MPa).

A adição de fibras de algodão mostrou uma influência complexa; embora a formulação com 15% de fibras tenha atingido o valor máximo de resistência média (0,47 MPa), a análise de variância (ANOVA) indicou que a diferença entre os grupos reforçados e o de controle não foi estatisticamente significativa ($P\text{-value} > 0,05$).

A ausência de uma tendência clara de reforço é atribuída à dificuldade experimental em garantir a dispersão homogênea das fibras, cuja aglomeração atuou como ponto de defeito. Apesar disso, a mudança no modo de falha para coesiva na maior concentração sugere um aumento na força de adesão com o substrato.

O ensaio de biodegradação indicou caráter ecológico do material, com perdas de massa significativas de 89,4% (0% de fibras) e 81,2% (15% de fibras) após 7 dias em solo, demonstrando que mesmo a formulação reforçada mantém elevada biodegradabilidade, reforçando seu ciclo de vida sustentável.

Portanto, o adesivo de amido de trigo se mostrou uma alternativa promissora e competitiva ao PVA para colagem de MDF. O estudo destaca que, embora o reforço com fibras seja teoricamente benéfico, o controle do processamento e da dispersão é um fator crítico e determinante para otimizar o desempenho de biocompósitos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. A. C.; ARAÚJO, M. E. R.; SILVA, O. R. R. F.; SANTOS, J. F.; GOMES, J. P. Desenvolvimento e avaliação de descaroçador para o beneficiamento do algodão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 15, n. 6, p. 607-614, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2339-20**: standard test method for strength properties of adhesives in Two-Ply wood construction in shear by tension loading. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: <https://www.astm.org/d2339-20.html>. Acesso em: 17 set. 2025.

ASSOCIAÇÃO MATOGROSSENSE DOS PRODUTORES DE ALGODÃO. **História do algodão**. 2017. Disponível em: http://www.ampa.com.br/site/qs_historia.php. Acesso em: 22 set. 2025.

ATWELL, W. A. *et al.* The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. **Cereal Foods World**, v.33, p.306-311, 1988.

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/21519/TESE%20EA%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 out. 2025.

BALAJI, V. *et al.* Mechanical characterization of coir fiber and cotton fiber reinforced unsaturated polyester composites for packaging applications. **Journal of Applied Packaging Research**, v. 9, n.2, p.2, 2017.

BARROS, A. S.; MELLO, I. S. **Polímeros naturais e sintéticos: diferenças e aplicações**. Revista Brasileira de Ensino de Química, v. 27, n. 3, p. 463-475, 2020.

BASTIOLI, C. **Handbook of biodegradable polymers**. Shawbury: Rapra Technology Limited, 2005. Disponível em: <https://stxip.org/books/19.pdf>. Acesso em: 26 out. 2025.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. 2. ed., Florida. Krieger Publishing Company, 1993, 712p.

BORSCHIVER, S.; ALMEIDA, L.F.M.; ROITMAN, T. Monitoramento tecnológico e mercadológico de biopolímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 3, p. 256-261, 2008.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. **Estudo comparativo dos resultados de ensaio de tração perpendicular para MDF produzido em laboratório com fibras de pinus e de eucalipto utilizando uréia-formaldeído**. Matéria, São Paulo, v. 1, n. 9, p. 32-42, 2004.

CARMONA, V. N.; TRINDADE, J. A.; ROSA, D. S. Avaliação do tratamento alcalino em fibras de algodão. **Anais do 13º Congresso Brasileiro de Polímeros**. Natal – RN, 2015.

COÊLHO, J. D. Produção de algodão. **Caderno setorial etene**, Fortaleza, v3, n.56, dez., 2018. Disponível em: <https://bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/988>. Acesso em 30 out. 2025.

CORRADINI, E.; ITO, E. N.; MARCONCINI, J. M.; RIOS, C. T.; AGNELLI, J. A. M.; MATTOSO, L. H. C. – **Polym test.**, 28, p.183 (2009). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.11.014>. Acesso em 30 out. 2025.

CRISTINO, J. H. S.; FARIAS, S. S.; ROCHA, J. M.; SIQUEIRA, S. M. C. Biopolímeros: uma alternativa para promoção do desenvolvimento sustentável. **Revista Geonorte**, Amazonas, v.7, n.26, p.61-77, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2759>. Acesso em: 26 out. 2025.

DEBIAGI, F.; MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E. Efeito de fibras vegetais nas propriedades de compósitos biodegradáveis de amido de mandioca produzidos via extrusão. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 45, e012521, 2021.

ELIASSEN, A. C. **Starch in food – structure, function and applications**. New York: Boca Raton, CRC, 2004. 605p. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Justyna_Rosicka/publication/322184588_The_Functionality_of_Wheat_Starch/links/5ec1701ea6fdcc90d67c0451/The-Functionality-of-Wheat-Starch.pdf?__cf_chl_tk=MkMaEBcfin3tuh4BYbOEJX9ggjuoH0_6ynPNRc0XNBY-1774119905-1.0.1.1-nXB_D2dQj4TE5wDnduaCyzjevQ7raiTkALMTxHd8p.4. Acesso em: 31 out. 2025.

FAUNER, G.; ENDLICH, W. **Manuel de techniques de collage**. Paris: Soproge SA, 1984.

FLIEGER, M.; KANTOROVÁ, M.; PRELL, A.; ŘEZANKA, T.; VOTRUBA, J. Biodegradable plastics from renewable sources. **Folia Microbiol** 48, 27–44 (2003). DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02931273>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02931273#citeas>. Acesso em: 31 out. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS. **Data: Crops and livestock products**. Roma, 2021. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>. Acesso em: 30 out. 2025.

FRANCHETTI, S. M. M.; MARCONATO, JC. Polímeros biodegradáveis-uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. **Química Nova**, v. 29, n. 4, p. 811, 2006.

FUCUHARA, K. A. **Aplicação de adesivos estruturais em painéis de carros**. 2014. 102 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Materiais) -

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/123058>. Acesso em: 30 out. 2025.

FUKUSHIMA, K.; ABBATE, C.; TABUANI, D.; GENNARI, M.; CAMINO, G. Biodegradation of poly(lactic acid) and its nanocomposites. **Polymer Degradation and Stability**. V.94, n.10, p. 1646-1655, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391009002419>. Acesso em: 26 out. 2025.

GADHAVE, R.; MAHANWAR, V.; PRAKASH, A.; GADEKAR, P. T. Adesivos à base de amido para colagem de madeira/compósitos de madeira. **Journal of Sustainable Materials**, [S.l.], 2021.

GATTIN, R.; COPINET, A.; BERTRAND, C.; COUTURIER, Y. Biodegradation study of a starch and poly(lactic acid) coextruded material in liquid, composting and inert mineral media. **International Biodeterioration & Biodegradation**. V. 50, n.1, p. 25-31, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00039-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830502000392?via%3Dihub>. Acesso em: 26 out. 2025.

GONÇALVES, D; BORDADO, J.M; MARQUES, A.C; SANTOS, R.G. Nonformaldehyde, bio-based adhesives for use in wood-based panel manufacturing industry—a review. **Polymers**. v. 13, p.4086, 2021.

INTERNATIONAL year of natural fibres, 2009. Disponível em: https://faravelsforbundet.se/wp-content/uploads/IYNF-natural_fibres.pdf. Acesso em 30 out. de 2025.

ITAVAARA, M.; KARJOMAA, S.; SELIN, J. F. Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions. **Chemosphere**. v.46, n.6, p. 879-885, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653501001631>. Acesso em: 26 out. 2025.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. 2. ed. Curitiba: FUPEF, 2005. 254p. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/893454673/Paineis-de-madeira-reconstituída>. Acesso em: 20 out. 2025.

JESUS, G. L. de. **Obtenção, caracterização e comparação de filmes à base de proteínas do soro de leite**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

KAUR, B.; ARIFFIN, F.; BHAT, R.; KARIM, A. A. Progress in starch modification in the last decade. **Food Hydrocolloids**, v, 26, p.398-404, 2012.

KULITCH, A. Estudo histórico da sustentabilidade dos polímeros naturais em suas aplicações humanas e industriais. **Conhecimento Interativo**, São José dos Pinhais, PR, v. 17, n. 1, p. 22-31, 2023.

LEITE, M. C. A. M.; FURTADO, C. R. G.; COUTO, L. O.; OLIVEIRA, F. L. B. O.; CORREIA, T. R. Avaliação da biodegradação de compósitos de poli(ϵ -caprolactona)/fibra de coco verde. **Polímeros**, v. 20, p. 339-344, 2010.

LIESA, F.; BILURBINA, L. **Adesivos industriales**, Barcelona, Espanha: Marcombo S.A, 1990.

LIMA, D. O. **Desenvolvimento e caracterização física e mecânica de compósitos cimentícios reforçados com tecido têxtil de fibras de algodão**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade De Tecnologia, Universidade Federal Do Amazonas, Manaus, 2019. Disponível em: https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/7303/5/Disserta%c3%a7%c3%a3o_DanielaLima_PPGEC.pdf. Acesso em: 30 out. 2025.

LINEBACK, D. R.; RASPER, V. P. Wheat carbohydrates In: pomeranz,y. wheat: chemistry and technology. **American Association of Cereal Chemists**, 1988. cap.6, p.277-372, v.1.

MARQUES, J. L. S.; **Desenvolvimento de adesivos nanocompósitos de poliuretano à base de óleo de mamona**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2009.

MATIGNON, A.; TECANTE, A. Starch retrogradation: from starch components to cereal products. **Food Hydrocolloids**, v. 68, p. 43-52, 2017.

OKTAY, S.; PIZZI, A.; KÖKEN, N.; BENGÜ, B. Chemical modification techniques of corn starch for synthesis wood adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, V. 128, 2024, 103545

PAIS, L. R. S. **Sistemas adesivos para substratos dissimilares**. 2016. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

PAOLI, M. A. **Degradação e estabilização de polímeros**. 2. Ed. São Paulo: Editora Artliber, 2008. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/degradao-e-estabilizao-de-polmerospdf/252824094>. Acesso em: 26 out. 2025.

PIZZI, Antonio; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology**. 2. ed. New York: CRC Press, 2003.

PRADELLA, J. G. C. **Biopolímeros e intermediários químicos**. Centro de Tecnologia de Processos e Produtos. Laboratório de Biotecnologia Industrial – LBI/CTPP. São Paulo, 2006. (Relatório técnico n. 84396-205)

RAEKER, M. *et al.* Granule size distribution and chemical composition of starches from 12 soft wheat cultivars. **Cereal Chem.**, v. 75, n. 5, p. 721-728, 1998.

ROCHA, T. S.; DEMIATE, I. M.; FRANCO, C. M. L. Características estruturais e físico-químicas de amidos de mandioca-salsa (*Arracacia xanthorrhiza*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 3, p. 620-628, 2008.

SANGUANPONG, V. *et al.* Hydration and physicochemical properties of smallparticle cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.83, p.123-132, 2002.

SCHEUER, P M.; DE FRANCISCO, A.; DE MIRANDA, M. Z.; Limberger, V. M. Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.13, n.2, p.211-222, 2011.

SHINDE, S. V.; NELSON, J. E.; HUBER, K. C. Soft wheat starch pasting behavior in relation to A- and B-type granule content and composition. **Cereal Chem.**, v. 80, n. 1, p. 91-98, 2003.

SILVA, L. F. M.; DE MAGALHAES, A. G.; DE MOURA, M. F. S. F. **Juntas coladas estruturais**. Editora Publindústria, FEUP, Universidade do Porto, 2007.

SOUZA, E. M. M. **Adesivo de contato de policloropreno base aquosa nanoaditivado e condicionado magneticamente**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo São Paulo, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-21062016-113107/publico/Edith_Marie_Malateaux_de_Souza_PPGEMet_Corrigida_2015.pdf. Acesso em: 27 out. 2025.

TESTER, R.F. *et al.* Starch – composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**, v.39, p.151-165, 2004.

WANG, S.; COPELAND, L. (2015). Effect of acid hydrolysis on starch structure and functionality: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, n. 8, p. 1081-1097, 2015.

WATCHARAKITTI, J.; WIN, E.E.; NIMNUAN, J.; SMITH, S.M. Modified starch-based adhesives: a review. **Polymers**, v. 14(10), 1-16, 2023.

ZHU, F. Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. **Carbohydrate Polymers**. v.122, p.456-480, oct, 2015.

APÊNDICE A - MEDIDAS DAS AMOSTRAS

Tabela 1 - Disposição das medidas das amostras coladas com fibra de algodão e PVA

Concentração	Corpo de Prova	Largura (mm)	Altura (mm)
0%	1	25,55	24,96
	2	26,10	25,43
	3	25,75	25,37
	4	28,40	25,29
10%	5	26,40	25,93
	6	25,85	25,37
	7	25,55	25,48
	8	24,20	25,61
15%	9	26,15	25,47
	10	26,60	25,26
	11	26,60	25,45
	12	28,10	25,54
5%	13	25,15	25,02
	14	24,90	25,51
	15	24,90	25,64
	16	24,70	25,60
PVA	17	26,10	25,00
	18	26,80	25,45

Fonte: Autoria própria (2025)

