



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia

Juliana Martins Farias da Silva

**Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos laminados
de resina epóxi modificada com fibras naturais**

Rio de Janeiro

2023

Juliana Martins Farias da Silva

Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos laminados de resina epóxi modificada com fibras naturais.

Projeto de graduação apresentado, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais, à Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Alex da Silva Siqueira

Coorientadora: Prof. Dra. Bluma G. Soares

Rio de Janeiro

2023

Ficha elaborada pelo autor através do
Sistema para Geração Automática de Ficha Catalográfica da Rede Sirius - UERJ

S586 Silva, Juliana Martins Farias da.
 Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos laminados de resina epóxi modificada... / Juliana Martins Farias da Silva. - 2023.
 52 f.

 Orientador: Alex da Silva Siqueira.
 Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Materiais.

 1. Resina Epóxi - Monografias. 2. Fibras naturais - Monografias. 3. Propriedades mecânicas - Monografias. I. Siqueira, Alex da Silva. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias. III. Título.

CDU 620.1

Juliana Martins Farias da Silva

**Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos laminados de resina
epóxi modificada com fibras naturais**

Projeto de graduação apresentado,
como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
de Materiais, à Faculdade de
Ciências Exatas e Engenharia, da
Universidade do Estado do Rio de
Janeiro.

Aprovado em 21 de julho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Alex da Silva Siqueira
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dra. Daniele Cruz Bastos
Faculdade de Engenharia - UERJ

Dra. Elisangela Pereira Cordeiro

Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me permitido chegar até aqui, por ter me concedido sabedoria, saúde e acima de tudo resiliência para não desistir dos desafios que surgiram na minha vida nos últimos anos.

Um agradecimento especial a minha mãe, Maria da Penha, minha maior incentivadora, amiga e conselheira, sem seu amor e apoio não chegaria a mais essa conquista.

Aos meus irmãos, Jose Renato e Beatriz, mesmo que na maioria das vezes eu não tenha muito tempo, tentam me distrair de toda a minha loucura acadêmica.

Agradeço também a todos os professores e professoras que me concederam um dos maiores presentes que o ser humano pode receber, o conhecimento.

Agradeço a todos os meus colegas de laboratório, por todo apoio, ajuda e incentivo. Um agradecimento especial a Jéssica, Elisangela, Elaine e Loan por todas as conversas e momentos em que fizeram o trabalho mais divertido.

Agradeço a professora Bluma G. Soares, por toda a sua contribuição na minha formação acadêmica, pelo apoio e orientação, além é claro de sua paciência durante longas horas de laboratório.

Ao meu orientado Profº. Drº. Alex Siquera que aceitou me orientar e auxiliou de forma imensurável nas conquistas acadêmicas que obtive até este momento.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.”

Henry Ford

RESUMO

SILVA, Juliana Martins Farias da. *Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos laminados de resina epóxi modificada com fibras naturais*. 52f. Projeto Final (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

A utilização de fibras naturais vem chamando a atenção nos últimos anos devido a necessidade da geração de novas formas de desenvolvimento tecnológico por rotas sustentáveis. Desta forma, o uso de resíduos agroindustriais, para a preparação de compósitos laminados foi avaliado no presente estudo, utilizando a fibra de pupunha (*Bactris gasipaes Kunth*) uma palmeira muito utilizada no Brasil para a obtenção de palmito e resina epóxi (ER) modificada com E29 (pré-polímero de poliisocianato baseado em difenil metano diisocianato) e o EPI (polibutadieno modificado com isocianato - PBNCO). A modificação da matriz teve por objetivo melhorar a adesão fibra matriz, bem como, melhorar as propriedades mecânicas uma vez que a ER apresenta uma grande deficiência na resistência ao impacto. Foram então preparados compósitos laminado com aproximadamente 30 % em massa de fibra de pupunha, utilizando como agente de cura uma amina cicloalifática. Os compósitos resultantes foram caracterizados por ensaio de tração, flexão, impacto, análise dinâmico-mecânica (DMA) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A capacidade de absorção de água e a morfologia das fibras também foram estudadas. Com relação as propriedades mecânicas, a resistência a tração e flexão apresentaram uma leve melhora no módulo de Young e no módulo de flexão quando utilizadas mais camadas de fibra de pupunha. Com relação a morfologia a adesão das fibras de pupunha nas matrizes modificadas foram foi superior à da matriz epóxi pura. Com relação a absorção de água, os compósitos com matriz epóxi modificadas apresentaram menor absorção de água do que a matriz epóxi pura, demonstrando assim que a modificação da matriz epóxi favorece a preparação de compósitos com fibras naturais, pois gera uma melhor interação entre fibra e matriz.

Palavras-chave: Resina Epóxi. Fibras naturais. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The use of natural fibers has drawn attention in recent years due to the need to generate new forms of technological development through sustainable routes. Thus, the use of agro-industrial residues for the preparation of laminated composites was evaluated in the present study, using peach palm fiber (*Bactris gasipaes* Kunth), a palm tree widely used in Brazil to obtain heart of palm and epoxy resin (ER) modified with E29 (polyisocyanate prepolymer based on diphenyl methane diisocyanate) and EPI (isocyanate-modified polybutadiene - PBNCO). The modification of the matrix aimed to improve adhesion to the matrix fiber, as well as to improve the mechanical properties, since the ER has a great deficiency in impact resistance. Laminated composites were then prepared with approximately 30% by mass of peach palm fiber, using a cycloaliphatic amine as curing agent. The resulting composites were characterized by tensile, bending, impact, dynamic-mechanical analysis (DMA) and scanning electron microscopy (SEM). The water absorption capacity and the morphology of the fibers were also studied. Regarding the mechanical properties, the tensile and flexural strength showed a slight improvement in the Young's modulus and in the flexural modulus when more layers of peach palm fiber were used. Regarding the morphology, the adhesion of peach palm fibers to the modified matrices was superior to that of the pure epoxy matrix. Regarding to water absorption, the composites with modified epoxy matrix showed less water absorption than the pure epoxy matrix, thus demonstrating that the modification of the epoxy matrix favors the preparation of composites with natural fibers, as it generates a better interaction between fiber and headquarters.

Keywords: Epoxy resin. Natural fibers. Peach fiber. Mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Estrutura química do grupo epoxídico.....	16
Figura 2. Estrutura química da DGEBA.....	17
Figura 3.Comportamento reológico de pré-polímeros ER e ER.PNBCO.	18
Figura 4. Curvas tensão-deformação representativas de testes de tração em juntas de cisalhamento coladas com nanocompósitos baseados em ER.PNBCO como uma função do conteúdo de CNT.....	19
Figura 5. Identificação das principais partes do estipe (tronco) da <i>Bactris gasipaes Kunth</i>	22
Figura 6. Resistência ao impacto para os compósitos ER/Sisal-Juta.....	23
Figura 7. Resistência ao impacto de compósitos epóxi-fibra de pupunha em função da composição e funcionalização das fibras. (a) PPF; (b) PPF-GPTMS e (c) PPF-E29.	25
Figura 8. (a) Placa de fibra de pupunha e (b) Molde para confecção das placas.....	30
Figura 9. Placa de Fibra de Pupunha pós curada.	30
Figura 10. Imagem do (a) corte dos corpos de prova e (b) placa após o corte na fresa.	31
Figura 11. Esquema das reações/interações envolvidas nos compósitos preparado com ER modificado com precursor do tipo isocianato.....	36
Figura 12. Gráfico do ensaio de impacto das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP, a resistência ao impacto dos materiais é dada em J/m.	37
Figura 13. Microscopia óptica da placa de fibra de pupunha não tecida.	38
Figura 14. (a) Fotografia de uma das placas de FP e (b) Microscopia óptica das placas de fibra de pupunha não tecidas com a medida do tamanho das fibras.	38
Figura 15. Micrografia da amostra ER-4FP com ampliação de 500x, obtidas da fratura do ensaio de tração.....	39
Figura 16. Micrografia da amostra EPI-4FP com ampliação de 500x, obtidas da fratura do ensaio de tração.....	39
Figura 17. Micrografia da amostra E29-4FP com ampliação de 500x, obtidas da fratura do ensaio de tração.....	40

Figura 18. Gráfico da Tan delta pela temperatura das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP	41
Figura 19. Gráfico do módulo de armazenamento (E') obtido a partir da análise dinâmico-mecânica (DMA) para as amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP	43
Figura 20. Gráfico do ensaio de fluência flexural com a deformação (%) pelo tempo (min) das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP	44
Figura 21. Gráfico do ensaio de fluência, com a recuperação da deformação (%) pelo tempo (min) das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP.	45
Figura 22. Gráfico do ensaio de absorção de água das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química de diferentes tipos de fibra natural.	20
Tabela 2. Propriedades físico-químicas e propriedades mecânicas de fibras naturais vegetais.	21
Tabela 3. Porcentagem de radiação absorvida, refletida e transmitida de compósitos condutivos baseados em PBAT em 9 GHz.	24
Tabela 4. Amostras, código da amostra, tipo de matriz utilizada e quantidades em massa de matriz e endurecedor.	29
Tabela 5. Massa das placas pós-curadas, massa de fibra de pupunha (FP), percentual de fibra nas placas, espessura, comprimento e largura das placas ER-3FP, ER-4FP, E29-3FP, E29-4FP, EPI-3FP e EPI-4FP.	31
Tabela 6. Tabela do ensaio de tração para as amostras: ER-3FP, ER-4FP, E29-3FP, E29-4FP, EPI-3FP e EPI-4FP.	34
Tabela 7. Dados obtidos a partir do ensaio de flexão para as amostras: ER-3FP, ER-4FP, E29-3FP, E29-4FP, EPI-3FP e EPI-4FP.	35
Tabela 8. Temperatura de transição vítrea (T_g) das amostras FP, ER-3FP, ER-4FP, E29-3FP, E29-4FP, EPI-3FP e EPI-4FP.	42
Tabela 9. Tabela do inchamento (%) em água das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP em cada dia.	46

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1. OBJETIVO	15
1.1. Objetivo Geral.....	15
1.2. Objetivos específicos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	16
2.1. Resina Epóxi	16
2.2. Resina Epóxi modifica	17
2.3. Fibras Naturais	19
2.1.1. Fibra de Pupunha.....	21
2.4. Compósitos com fibras naturais	23
3. MATERIAIS E METODOS	26
3.1. Materiais utilizados	26
3.2. Equipamentos e vidrarias	27
3.3. Metodologia aplicada.....	27
3.3.1. Síntese das matrizes modificadas.....	27
3.3.1.1. Síntese do E29	27
3.3.1.2. Síntese do EPI10.....	28
3.3.2. Montagem das Placas.....	29
3.3.3. Corte das Placas.....	31
3.4. Caracterizações.....	32
3.4.1. Resistência ao Impacto.....	32
3.4.2. Resistência a Tração.....	32
3.4.3. Resistência a Flexão.....	32
3.4.4. DMA.....	32
3.4.4.1. 3-point-bending test.....	32
3.4.4.2. Resistencia à Fluência (Creep test).....	32
3.4.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	33
3.4.6. Microscopia óptica.....	33
3.4.7. Absorção de água.....	33

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1.	Resistência a Tração	34
4.2.	Resistência a Flexão	35
4.3.	Resistencia ao Impacto	36
4.4.	Morfologia	37
4.4.1.	Microscopia Óptica.....	37
4.4.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	38
4.5.	Análise Dinâmico-mecânica (DMA)	40
4.5.1.	Resistência a Fluência (Creep Test).....	43
4.6.	Absorção de água.....	44
5.	SUGESTÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	46
	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS.....	48

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável atraiu a atenção da comunidade científica nos últimos anos devido a necessidade de tecnologias que agredam menos o meio ambiente. Assim os materiais compósitos chamam a atenção pela sua versatilidade, pois através da combinação de diferentes materiais resultam novos materiais com propriedades únicas em substituição aos materiais convencionais.

Desta forma compósitos são materiais fascinantes, compostos por pelo menos duas fases distintas: a matriz, que é a fase contínua, e a fase dispersa. O que torna esses materiais ainda mais interessantes é que suas propriedades finais são resultado de uma interação complexa entre diversos fatores. Em primeiro lugar, as características individuais de cada constituinte desempenham um papel fundamental. Ademais, as proporções relativas dos componentes na composição do compósito têm um impacto significativo nas propriedades finais. A morfologia da fase dispersa também é um fator importante a ser considerado, pois influencia a forma como a fase dispersa está distribuída dentro da matriz. Além disso, a distribuição e a orientação das partículas dispersas desempenham um papel crucial na determinação das propriedades do material compósito. Portanto, a combinação desses diversos elementos resulta em um material com propriedades únicas e personalizadas (MATOS; GALEMBECK; ZARBIN, 2017; CHIU et al., 2021).

A preparação de compósitos com fibras naturais chama a atenção devido a seu baixo custo, baixa densidade, recuperação de energia, reciclabilidade de resíduos agroindustriais, propriedades específicas aceitáveis e biodegradabilidade aprimorada (BATISTA et al., 2010) quando comparadas com as fibras sintéticas, tais como a fibra de vidro e a fibra de carbono (MITTAL; SAINI; SINHA, 2016; SENTHILKUMAR et al., 2019). De modo geral compósitos com fibras naturais são utilizados nas indústrias automobilística e de construção civil. Na indústria automobilística ocorre um aumento ano a ano da utilização de fibras naturais. Por exemplo a empresa Mercedes-benz, tem utilizado fibras de sisal, cânhamo e linho para o painel interno da porta, enquanto a Audi utilizou compósitos reforçados com sisal e linho para os painéis de decoração das portas no ano 2000 (PREMNATH, 2019).

As fibras naturais atualmente chamam a atenção da comunidade científica e tem sido amplamente utilizadas como reforço em compósitos de matriz polimérica,

contudo estes tipos de fibras apresentam algumas desvantagens em relação as fibras sintéticas, sendo a principal delas a baixa adesão entre a matriz polimérica e a fibra (GEORGE; SREEKALA; THOMAS, 2001).

A resina epóxi (ER) é um polímero que apresenta excelentes propriedades mecânicas, como rigidez e resistência, resistência a fluência e resistência química, o que resulta em um material para aplicar em revestimentos, adesivos, compósitos entre diversos outros. Contudo a resina epóxi apresenta uma baixa resistência a trincas, e resistência ao impacto. Desta forma, a modificação da ER com borracha líquida tem por objetivo melhorar as propriedades de resistência ao impacto, bem como reduzir a temperatura de transição vítrea (T_g) (BARCIA; ABRAHÃO; SOARES, 2001).

Deste modo, a preparação de compósitos de matriz epóxi e epóxi modificados com fibra de pupunha se tornam de grande interesse, pois dá destino a um resíduo agroindustrial bem como, gera um material com propriedades mecânicas melhoradas para substituição de polímeros de commodities em diversos setores industriais.

1. OBJETIVO

1.1. Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho foi preparar compósitos utilizando resíduo agroindustrial (fibra de pupunha) com matriz termorrígida (resina epóxi / resina epóxi modificada) visando obter um compósito com boas propriedades químicas, térmicas e mecânicas.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso foram:

- Avaliar a influência da modificação da resina epóxi com polibutadieno modificado com isocianato (PBNCO) e Desmodur E29 nas propriedades mecânicas;
- Avaliar a morfologia das fibras e dos compósitos a partir da utilização de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV);

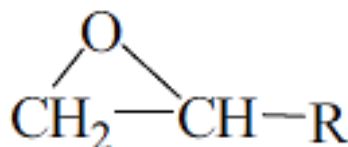
- Avaliar a propriedade de resistência à flexão, com objetivo de conhecer a capacidade de reforço da fibra de pupunha nas matrizes termorrígidas;
- Avaliar as propriedades dinâmico-mecânicas, pela análise dinâmico-mecânica (DMA) e;
- Avaliar a resistência ao impacto dos compósitos.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Resina Epóxi

A resina epóxi foi descoberta em 1909 por Prileschajew, e podem ser definidas como um pré polímero de baixo peso molecular contendo mais de um grupo epoxídico conforme Figura 1 (JIN; LI; PARK, 2015).

Figura 1. Estrutura química do grupo epoxídico.

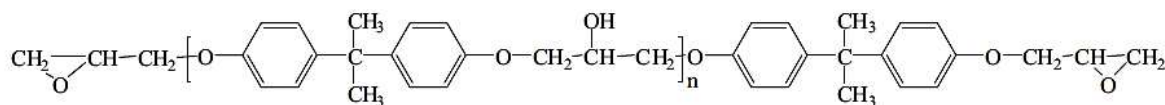


Fonte: Adaptado de JIN; LI; PARK, (2015).

As resinas epóxi são amplamente utilizadas para aplicações como pintura, revestimento, materiais de isolamento, construção e compósitos devido as suas propriedades térmicas, mecânicas, de adesão e resistência química, se destacando então como um dos principais polímeros termoendurecíveis (MIMURA; ITO, 2002; KUMAR et al., 2018).

O termo resina epóxi abrange um vários compostos químicos diferentes, tais como: diglicidil éter de bisfenol-F, 3',4'-epoxiciclohexilmetil 3,4-epoxiciclohexanocarboxilato (CHE), trimetilolpropano triglicidil éter (TMP), 4,4'-tetradiglicidil diaminodifenil metano, resinas epóxi novolac (ésteres glicidílicos de resinas fenólicas novolac), éter glicidil fenílico (GPE), óleo de soja epoxidado (ESO), óleo de rícino epoxidado (ECO) e diglicidil éter de bisfenol-A (DGEBA) que é a mais utilizada comercialmente, cuja estrutura química é apresentada na Figura 2 (CHEN et al., 2020).

Figura 2. Estrutura química da DGEBA.



Fonte: Adaptado de (JIN; LI; PARK, 2015).

A resina epóxi quando curada origina um material rígido, porém altamente quebradiço, devido principalmente a alta densidade de ligações cruzadas (rede tridimensional) e suas propriedades são determinadas pela estrutura química, bem como pela natureza do agente endurecedor (OZTURK; KAYNAK; TINCER, 2001). O processo de formação de ligações cruzadas (rede tridimensional) é um processo irreversível em que a composição química do endurecedor influencia a cinética de cura e a temperatura de transição vítrea (T_g) das resinas epóxis. Os agentes de cura ou endurecedor, podem ser divididos em agentes do tipo amina, agentes de cura alcalinos, anidridos e catalíticos de acordo com a composição química e os grupos funcionais presentes (JIN; LI; PARK, 2015; CHEN et al., 2020).

A resina epóxi apresenta propriedades muito interessantes, tais como a propriedade adesiva, que é gerada devido a presença de grupos epóxi e hidroxila. A resistência química e tenacidade se devem a presença de ligações éter e a rigidez se deve à presença do bisfenol A (MOHAN, 2013).

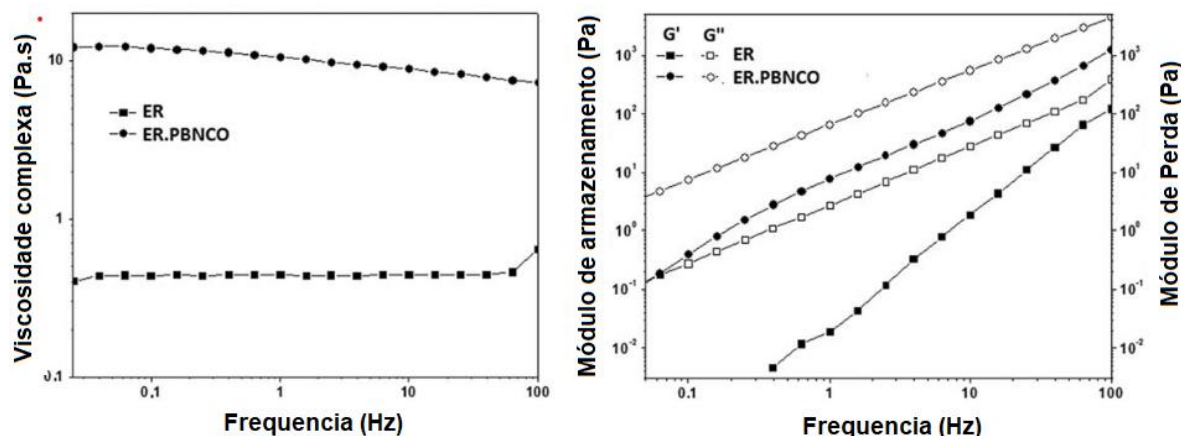
2.2. Resina Epóxi modifica

A resina epóxi embora seja um material de excelentes propriedades, apresenta deficiência quando se trata da resistência ao impacto. Desta forma, modificações podem ser realizadas para que se obtenha uma ER com as melhores propriedades para as aplicações desejadas.

Uma das modificações mais estudadas para superar a fragilidade inerente da ER é a incorporação de borracha líquida. SOARES e ALVES (2018), realizaram a modificação da ER com polibutadieno modificado com isocianato (PBNCO) com objetivo de preparar compósitos / nanocompósitos de ER modificada com CNT. Os autores observaram nas propriedades reológicas que a matriz modificada com borracha (ER.PBNCO) apresentaram um aumento significativo da viscosidade

complexa (η^*), do módulo de armazenamento (G') e módulo de perda (G'') conforme demonstrado na Figura 3. Segundo os autores, esse aumento se deve as partículas de borracha aderidas a matriz epóxi através de ligações covalentes, proporcionando uma efetiva adesão interfacial entre borracha-matriz que contribuem para um aumento da resistência ao fluxo das cadeias epóxi.

Figura 3. Comportamento reológico de pré-polímeros ER e ER.PBNCO.



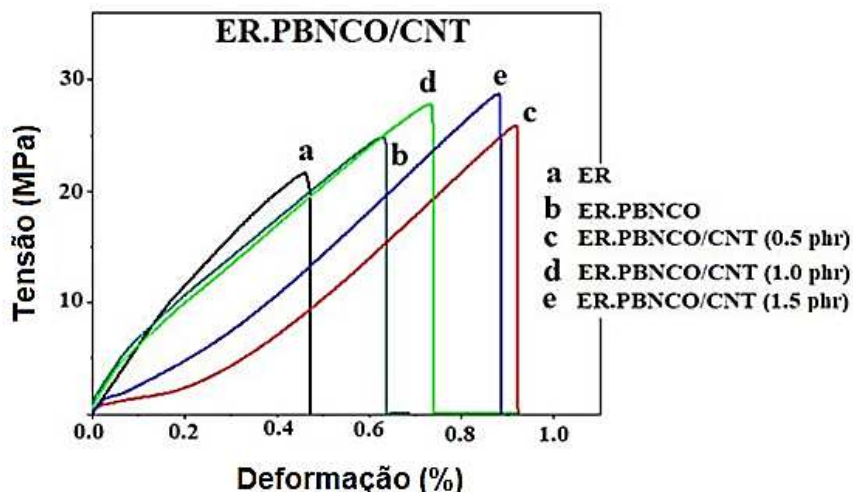
Fonte: Adaptado de SOARES; ALVES (2018).

Conforme citado anteriormente a matriz ER.PBNCO foi utilizada para a preparação de nanocompósitos com nanotubo de carbono em diferentes proporções. Na Figura 4 são apresentadas curvas tensão-deformação para avaliar as propriedades de adesão de placas metálicas com a utilização dos nanocompósitos. E observou-se que o ER.PBNCO puro apresentou melhores propriedades de adesão do que a ER devido à presença de grupos uretano na interface borracha-ER, o que melhora a adesão. Desta forma, a resistência ao cisalhamento e a tenacidade dessas amostras aumentaram 14 e 16% com 10% de borracha funcionalizada.

A modificação de ER por 3-aminopropiltrimetoxissilano (APTES) foi realizada com o objetivo de melhorar as propriedades de tração para compósitos com tecidos de viscose tricotados. Os autores relataram que a modificação da ER foi realizada com 1, 3 e 5% em peso de APTES a temperatura ambiente e de 70 °C e eles concluíram que a resistência à tração dos compósitos diminuiu com o aumento do teor de APTES (1% de APTES 72±0,5 MPa, 3% 69±2,1 MPa e 5% de APTES 67±1,6 MPa), e que esse comportamento também se repetiu para as amostras modificadas com temperatura (1% de APTES 70±2,8 MPa, 3% de APTES 67±1 e 5% 62±2,1 MPa).

Com relação aos compósitos houve um aumento de 14% na resistência a tração e de 41% no alongamento na ruptura com a resina modificada com 3% em peso do APTES e os autores concluíram que essa melhora nas propriedades de tração se deve a melhor adesão fibra-matriz (RAJAN et al., 2018).

Figura 4. Curvas tensão-deformação representativas de testes de tração em juntas de cisalhamento coladas com nanocompósitos baseados em ER.PBNCO como uma função do conteúdo de CNT.



Fonte: Adaptado de SOARES; ALVES, (2018).

2.3. Fibras Naturais

Recentemente diversos tipos de fibras naturais veem sendo estudadas e utilizadas pela comunidade científica com o objetivo de substituir os materiais clássicos, tais como os metais, fibras sintéticas, ligas metálicas entre diversos outros. Desta forma, as fibras de seda, cânhamo, sisal, folha de abacaxi, madeira, bambu, rami, banana, coco, linho entre diversas outras vem sendo estudadas para as mais diversas aplicações por causa das suas propriedades (ALHIJAZI et al., 2020; KEERTHIVEETIL RAMAKRISHNAN et al., 2022).

As fibras naturais são basicamente constituídas por microfibrilas de celulose em uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose. A parede celular composta por hemicelulose pode ser considerada como uma estrutura natural de diversos compostos químicos orientados em espiral. Dependendo do tipo de fibra natural, a composição química, o teor de umidade, pectina, cinzas, cera, lignina, hemicelulose e celulose varia com os vários tipos de fibra. Além disso, o local de crescimento da

planta, taxa de crescimento e o tecido da planta tendem a influenciar na composição química. Ademais, a rigidez e resistência das plantas e das fibras vegetais acabam dependendo do teor de celulose (CHOKSHI et al., 2022). Na Tabela 1 são apresentadas as composições de algumas das principais fibras naturais atualmente utilizada.

Tabela 1. Composição química de diferentes tipos de fibra natural.

Fibra Natural	Celulose (%)	Lignina (%)	Hemicelulose (%)	Pectina (%)	Cera (%)	Umidade (%)	Cinzas (%)
Juta	58,00–63,00	12,00–14,00	21,00–24,00	-	-	-	-
Cânhamo	70,20–74,40	3,70–5,70	17,990–22,40	0,90	0,80	6,20–12,00	0,80
Linho	64,10–71,90	2,00–2,20	18,60–20,60	13,80–14,30	1,70	8,00–12,00	-
Agave	68,42	4,85	4,85	-	0,26	7.69	-
Bambu	26,00–43,00	1,00–31,00	30,00	-	-	9.16	-
Algas marinhas	57,00	5,00	38,00	10.00	-	-	-
Rami	68,60–91,00	0,60–0,70	5,00–16,70	1,90	-	-	-
Sisal	78,00	8,00	10.00	-	2,00	11,00	1,00
fibra de coco	37,00	42,00	-	-	-	11,36	-
Banana	83,00	5,00	-	-	-	10,71	-
Óleo de palma	65,00	29,00	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de CHOKSHI et al., (2022).

As fibras naturais já são consideradas um material compósito devido a seus componentes, onde fibrilas de celulose são envolvidas por uma matriz de hemicelulose e lignina, que são o que determina as propriedades mecânicas da fibra conforme Tabela 2. Outra coisa que deve ser levada a em consideração é a razão de aspecto (relação entre comprimento e largura) pois é ela juntamente com as diferentes

proporções de celulose, hemicelulose e lignina que conferem as fibras diferentes propriedades (CORDEIRO, 2016; SUN, 2019).

Tabela 2. Propriedades físico-químicas e propriedades mecânicas de fibras naturais vegetais.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Diâmetro (µm)	Resistencia a tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Linho	1,5	40–600	345–1500	27.6	2.7-3.2
Cânhamo	1.47	25–500	690	70	1.6
Juta	1,3–1,49	25–200	393–800	13–26,5	1.16-1.5
Rami	1,55	–	400–938	61,4–128	1.6
Sisal	1,45	50–200	468–700	9.4–22	1.6-7.0
Óleo de palma	0,7–1,55	150–500	248	3.2	25
Algodão	1,5–1,6	12–38	287–800	5,5–12,6	7,0–8,0
Coco	1.15–1.46	100–460	131–220	4–6	15–40

Fonte: Adaptado de SUN, (2019).

As fibras naturais vegetais são de extraídas de plantas ou rejeitos agroindustriais. Um rejeito agroindustrial é a fibra de pupunha.

2.1.1. Fibra de Pupunha

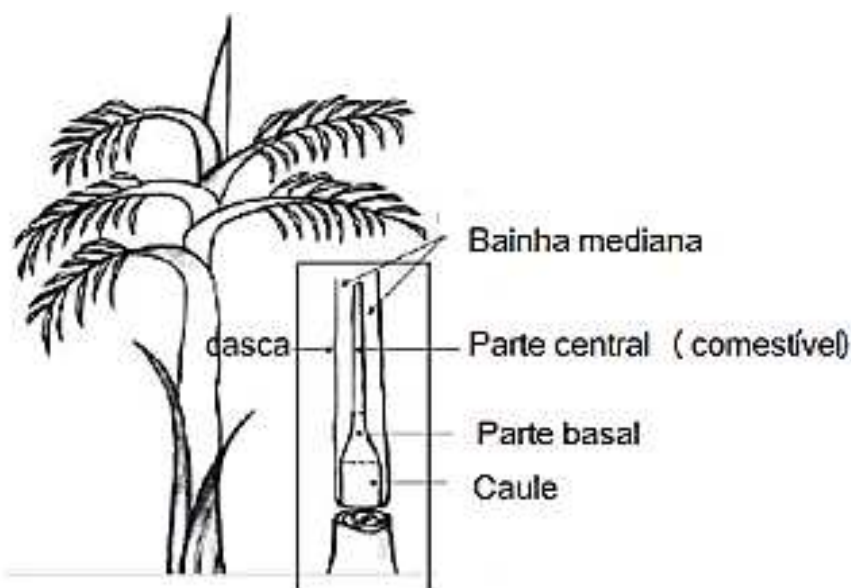
O Brasil é um dos maiores produtores de palmito do mundo. Dentre as principais palmeiras da quais o palmito pode ser obtido, a pupunheira (*Bactris gasipaes Kunth*) é uma palmeira multicaule de até 20 m de altura e de 15 a 25 cm de diâmetro e produz duas culturas alimentares, o fruto e o palmito (DA SILVA et al., 2006; BOLANHO; DANESI; BELÉIA, 2015). Contudo para a obtenção dos produtos de interesse gera-se muitos resíduos agroindustriais devido a necessidade do corte no tronco (estipe) da pupunheira para a obtenção do palmito.

A *Bactris gasipaes Kunth* é uma espécie de pupunheira que vem sendo cultivada por tribos indígenas das Américas do Sul e Central. É uma planta da família das *Arecaceas* e natural de áreas com precipitações entre 1500 e 6000 mm/ano, porém apresenta melhores resultados onde a precipitação está entre 2000 e 3000

mm/ano de precipitação. Este dado é extremamente importante pois esta planta não tolera períodos secos superiores a 3 meses e não tolera bem solos encharcados. Na Amazônia brasileira, é uma espécie nativa conhecida e utilizada para a produção de frutos que são a base alimentar dos habitantes dessa região a séculos (RAMOS, 1998).

A extração do palmito requer a remoção de dois envoltórios externos do tronco colhido, deixando mais dois envoltórios internos que protegem o palmito. Esses envoltórios protetores consistem em aproximadamente 59,6% do peso total e são compostos pelas bainhas. A parte basal contribui com 14,6% da massa total, enquanto as folhas abertas, também conhecidas como "ponta", representam 10,7%. Portanto, apenas 15% do peso total corresponde ao palmito aproveitável para alimentação, como ilustrado na Figura 5 (SPACKI et al., 2021).

Figura 5. Identificação das principais partes do estipe (tronco) da *Bactris gasipaes* Kunth.



Fonte: SPACKI et al., (2021).

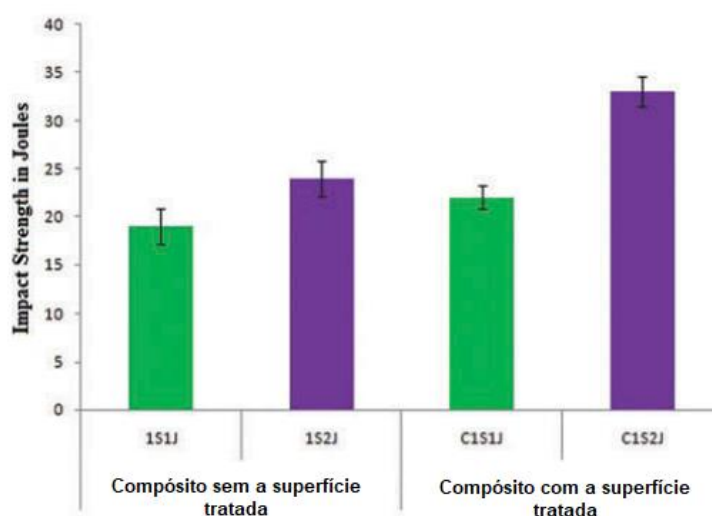
Conforme citado acima e representado pela Figura 5, para a obtenção da parte comestível, o palmito gera-se uma grande quantidade de rejeito agroindustrial, seja ele lenhoso, obtido de palmeiras adultas, seja ele material fibroso lignocelulósico, oriundo do caule não aproveitável ao qual os agricultores necessitam dar destino. Estima-se que para cada 1 Kg de palmito, sejam produzidos 10 Kg de resíduos fibrosos concentrados em regiões de produção e beneficiamento (TEMER, 2010).

2.4. Compósitos com fibras naturais

As fibras naturais desempenham um papel de suma importância no reforço de compósitos e isso depende principalmente da relação de aspecto, propriedades mecânicas e de carregamento destas fibras. As fibras vegetais são muito utilizadas devido a possuir fonte abundante, fácil extração, custo baixo e propriedades superiores (SUN, 2019). Nesta sessão do presente trabalho serão apresentados alguns exemplos de compósitos com fibras naturais.

Com objetivo de analisar as propriedades mecânicas, compósitos de ER com fibra de juta e sisal foram preparados. As fibras foram tratadas com uma solução de 10% de hidróxido de sódio (NaOH) por 24h durante 3 ou 4 horas. Os compósitos foram preparados pelo método lay-up manual. A proporção de fibra de sisal foi fixada em 20% e a fibra de juta variou entre 10 e 20 %. Os autores observaram que a resistência a tração aumentou em 20 % a resistência a flexão em 25 %, a dureza em 5 % e a resistência ao impacto aumentou 27, 27% para os compósitos com a superfície tratada. A Figura 6 apresenta os resultados de resistência ao impacto e os autores argumentam que a melhora na resistência ao impacto se deve ao tratamento previamente realizado nas fibras. E que com o aumento da camada de juta, há um aumento na capacidade de absorção de energia dos compósitos, desta forma as fibras atuam como um meio dissipador de carga e resistem à propagação de trincas. (PREMNATH, 2019).

Figura 6. Resistência ao impacto para os compósitos ER/Sisal-Juta.



Fonte: Adaptada de PREMNATH, (2019)

Compósitos condutores híbridos de fibra natural (fibra de pupunha - PPF) com polianilina (Pani) em matriz de poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT) foram estudados por Pontes e colaboradores, 2018. A síntese da PANi foi realizada *in situ* na presença da fibra e após foi realizada a mistura no estado fundido com o PBAT. Os autores relataram que a fibra híbrida que consistia em fibra natural revestida pela PANi, sintetizadas com líquido iônico (PANi.IL.PPF) apresentou condutividade elétrica superior ($1.2 \times 10^{-1} \text{ Scm}^{-1}$) a das fibras foram uniformemente revestidas com cadeias de PANi ($7.8 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$) dando origem a matérias com condutividade ligeiramente superior. Os compósitos com as fibras híbridas com PBAT foram avaliados para eficiência de blindagem eletromagnética e os percentuais de energia transmitidos, absorvidos e refletidos na frequência de 9 Hz são apresentados na Tabela 3. Nenhuma mudança significativa foi observada para o poder de absorção dos compósitos na faixa de frequência estudada, contudo em todas as composições estudadas a absorção foi o principal mecanismo, atenuando entre 70-80% da radiação incidente. A transmissão ficou na faixa de 5 a 10 % o que é considerado um comportamento satisfatório. Um melhor poder de absorção é muito importante para proteger os dispositivos eletrônicos e militares (PONTES et al., 2018)

Tabela 3. Porcentagem de radiação absorvida, refletida e transmitida de compósitos condutivos baseados em PBAT em 9 GHz.

Composição do compósito (%m)		T [%]		A [%]		R [%]	
PBAT	Fibra condutora	a	b	a	b	a	b
90	10	8	9	82	78	10	11
80	20	6	8	87	77	7	15
70	30	8	9	77	73	15	18
60	40	8	6	71	68	21	26

a = PANi-PPF; b = PANi.IL-PPF

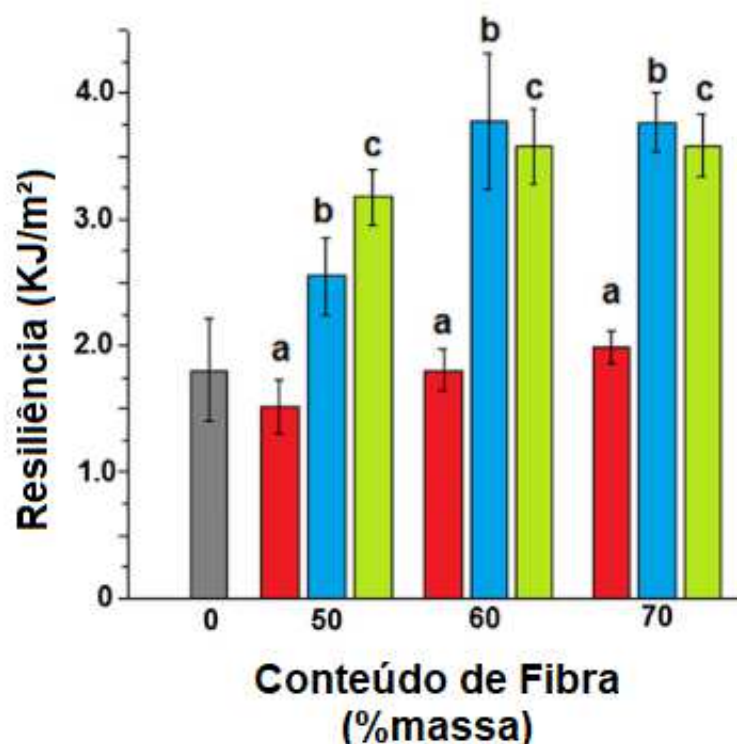
Fonte: Adaptado de PONTES et al., (2018).

Compósitos híbridos de cinza de banana (BA) com fibra de sisal/abacaxi (SP) foram preparados com matriz de resina epóxi e os autores observaram por microscopia eletrônica de varredura que uma alta adição de fibras híbridas na matriz

polimérica resulta em arrancamento de fibras da matriz epoxídica para compósitos com 1% de BA e 50% de fibra SP. Os autores relatam que esta má adesão gera uma redução de propriedade e uma alta taxa de desgaste dos compósitos naturais (KEERTHIVEETIL RAMAKRISHNAN et al., 2022).

Cordeiro e colaboradores, 2017 estudaram compósitos de resina epóxi com fibra de pupunha modificadas com um silano a base de epóxi (PPF-GPTMS) ou com um pré-polímero à base de poliol funcionalizado com diisocianato de difenil metano (PPF-E29) utilizando uma alta quantidade de fibras naturais (50 -70% em massa). Os autores observaram que os compósitos com fibras tratadas exibem uma melhoria significativa para a resistência ao impacto em comparação com as fibras não tratadas. Este comportamento, segundo os autores se deve a adesão interfacial conferida pela presença de grupos epóxi silano ou isocianato na superfície da fibra conforme observado na Figura 7.

Figura 7. Resistência ao impacto de compósitos epóxi-fibra de pupunha em função da composição e funcionalização das fibras. (a) PPF; (b) PPF-GPTMS e (c) PPF-E29.



Fonte: Adaptado de CORDEIRO; PITA; SOARES, (2017).

Com base no exposto nesta breve revisão bibliográfica, compósitos com fibra de pupunha são preparados com a modificação da superfície da fibra em matrizes não

modificadas, contudo no presente trabalho, a preparação de compósitos com fibra de pupunha na forma de placas não tecidas, sem modificação química, será utilizada para preparação de compósitos com matriz epóxi, epóxi modificada com borracha líquida com grupos isocianato e com pré-polímero de poliol funcionalizado com difenil metano-4,4'-diisocianato.

3. MATERIAIS E METODOS

Neste capítulo são apresentados os reagentes, equipamentos e metodologias utilizadas para a preparação dos compósitos

3.1. Materiais utilizados

Nesta sessão serão apresentados os reagentes utilizados para a preparação dos compósitos.

- Placas de fibra da Pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth var. *gasipaes* Henderson), fornecida pela fazenda Kaapora situada em Silva Jardim - R.J;
- Resina epoxídica do tipo éter diglicidílico de bisfenol A (DGEBA) fornecida pela Shell Chemical, Inc; cujo nome comercial é EPON 828. Equivalente epoxidico 188-198;
- O polibutadieno terminado em hidroxí (PBLH) foi gentilmente fornecido pela Petroflex Ind. Com. S.A;
- O diisocianato de tolueno (TDI), utilizado para funcionalizar o PBLH fornecido pela Bayer do Brasil;
- O polibutadieno funcionalizado com NCO (PBNCO) com teor de NCO de 10% foi preparado de acordo com a literatura, por meio da reação de PBLH com TDI na presença de dilaurato de dibutilestanho;
- Desmoldur E29 - Contém difenilmetano-4,4'-diisocianato; Pré-polímero com base em poliisocianato aromático; difenilmetano-2,4-diisocianato; 2,2'-metilenodifenil de diisocianato; difenilmetano-di-isocianato, isômeros e homólogos- fornecido pela Bayer;
- Desmoldante FD13, fornecido pela EpoxyFiber.

- O dibutil dilaurato de estanho (DBTL) fornecido pela Sigma-Aldrich

3.2. Equipamentos e vidrarias

- Balança Bioprecisa jh 2102 eletronic balance;
- Agitador mecânico modelo RW 20.n da IKA Labortechnik;
- Misturador modelo SppedMixer DAC 150.1FVZ da Flack Tek Ink;
- Fresa modelo EGX-300 Desktop Engraver – Roland
- Prensa fria da M. S. Mistura;
- Balão de três bocas de 500 mL;
- Molde de ferro com dimensões de 24,9cm x 15,6cm;

3.3. Metodologia aplicada

Nesta sessão será apresentada a metodologia para a modificação da resina epóxi, a preparação das placas de fibra de pupunha, bem como a obtenção dos corpos de prova para os diferentes ensaios.

Para a confecção dos compósitos foi utilizada a resina epóxi como matriz de controle denominada ER. E abaixo são apresentados os métodos de obtenção das matrizes modificadas.

3.3.1. Síntese das matrizes modificadas

Os procedimentos utilizados para a modificação da resina epóxi com PBLH e com o Desmodur E29 serão apresentados abaixo.

3.3.1.1. Síntese do E29

A fim de modificar a resina epóxi com o Desmodur E29, foram pesados 200g de resina epóxi seca sob vácuo em um balão de 3 bocas de 500 ml, sob agitação mecânica em um sistema reacional à 60 °C. Em seguida adicionou-se 4 gotas do catalizador dibutil dilaurato de estanho (DBTL) e homogeneizou-se o sistema por 10 minutos. Logo após foi adicionado 21,5g de Desmodur E29, e deixou-se reagir por 2

horas sob atmosfera de nitrogênio (N₂). Decorridas as duas horas foi então retirado do aquecimento e então secou-se a vácuo a resina modificada com o E29 até completa remoção de bolhas. Esta matriz foi denominada E29.

3.3.1.2. Síntese do EPI10

A síntese do EPI10 é realizada em duas etapas conforme descrito na literatura (BARCIA; ABRAHÃO; SOARES, 2001; BARCIA; AMARAL; SOARES, 2003; SOARES et al., 2011).

A primeira etapa consistiu na síntese da funcionalização do PBLH com grupos isocianato, com objetivo de produzir o PBNCO, onde inicialmente foi realizado o seguinte cálculo para a preparação do PBNCO:

$$\frac{(100 * 10) + (7,5 * 46)}{48 - 10} = 35,39g * 1,1 = 38,9g \text{ de TDI para cada } 100g \text{ de PBLH}$$

Foi realizado a partir do cálculo apresentado acima o seguinte cálculo para obtenção do valor de TDI a ser adicionado ao PBLH para produzir PBNCO com 10 % de NCO livre:

$$38,9g \text{ de TDI} = 100g \text{ de PBLH}$$

$$X g \text{ de TDI} = 25g \text{ de PBLH}$$

$$X = \mathbf{9,95g}$$

Converteu-se o valor em gramas para volume de diisocianato de tolueno (TDI) onde adicionou-se 8,12 mL de TDI em um balão de 3 bocas de 500 mL, em seguida adicionou-se lentamente o PBLH sob agitação. Logo após, aqueceu-se o sistema até 60 °C por 1 hora, sob atmosfera de N₂ gasoso e agitação.

A segunda etapa consistiu na reação do PBNCO com a resina epóxi.

Decorrido o tempo para a produção do PBNCO, foi adicionado ao sistema reacional 250g de resina epóxi previamente seca sob vácuo, na proporção de 100g de ER para cada 10g de PBNCO lentamente e 4 gotas do DBTL, utilizado como

catalizador da reação. Após a adição dos reagentes, a reação foi mantida à 60 °C, por 1 hora.

Após 1 hora de reação, removeu-se a epóxi modificada com PBNCO 10%, denominado EPI10 do aquecimento e da atmosfera inerte e secou-se a vácuo a temperatura de 70 °C.

3.3.2. Montagem das Placas

Segundo o fornecedor das placas de fibra de pupunha não tecidas, elas foram confeccionadas da seguinte maneira: os troncos da pupunheira são prensados para a retirada dos líquidos, após a prensagem as fibras são lavadas em água corrente e levadas a um molde de tela onde são prensados para dar forma da placa e remover a água, por fim são secas em estufa com temperatura constante.

Para a preparação dos compósitos com forma de placa inicialmente foi realizando o cálculo para obtenção das quantidades de matriz, agente de cura e fibra de pupunha (FP) a serem utilizados. O agente de cura utilizado foi amina cicloalifática, na proporção de 45 phr. A nomenclatura, os valores de matriz e agente de cura utilizados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Amostras, código da amostra, tipo de matriz utilizada e quantidades em massa de matriz e endurecedor.

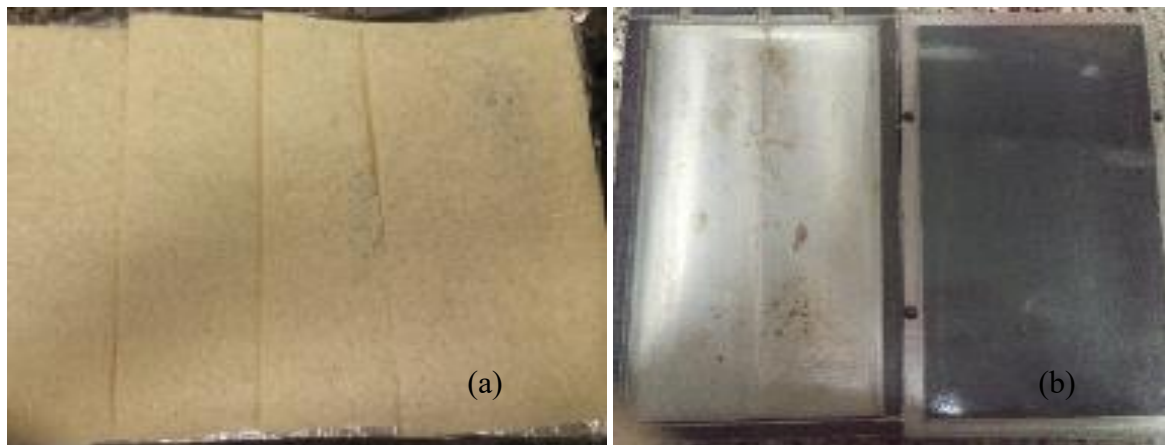
Amostra	Matriz	Massa de Resina(g)	Massa de Endurecedor (g)
ER-3FP	ER	62,12	27,96
ER-4FP	ER	70,00	31,5
EPI-3FP	EPI10	60,13	27,06
EPI-4FP	EPI10	70,72	31,82
E29-3FP	E29	21,68	9,76
E29-4FP	E29	80,03	36,01

Fonte: Elaborado pelo autor

O processo para a confecção das placas foi iniciado com a desmontagem do molde de metal (24,9cm x 15,6cm) e a limpeza com álcool, em sequência foi aplicado desmoldante (FD13 EpoxyFiber). A seguir foi homogeneizado a matriz com o agente de cura no misturador (Flack Tek Ink – SpedMixer DAC 150.1FVZ) por 5 minutos a

3500 rpm. Na Figura 8 são apresentadas as placas de fibra de pupunha e o molde utilizado para a montagem da placa.

Figura 8. (a) Placa de fibra de pupunha e (b) Molde para confecção das placas



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente aplicou-se uma camada de matriz e a seguir uma placa de fibra, as camadas de fibra e matriz foram intercaladas e a matriz distribuída uniformemente no molde até completar a montagem. A seguir fechou-se o molde e levou-se para a prensa fria por 24 horas para a cura das placas. Completado o período de cura das amostras foram levadas a estufa para a realização da pós-cura a 130 °C por 2 horas. Na Figura 9 é apresentada a placa já pós-cura.

Figura 9. Placa de Fibra de Pupunha pós curada.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada uma das matrizes foram preparados 2 compósitos nas quais variou-se a quantidade de placas de fibra de pupunha não tecidas (3 ou 4), na Tabela 5 são

apresentadas as nomenclaturas dos compósitos, quantidade de fibra (em massa) e qual a matriz utilizada.

Tabela 5. Massa das placas pós-curadas, massa de fibra de pupunha (FP), percentual de fibra nas placas, espessura, comprimento e largura das placas ER-3FP, ER-4FP, E29-3FP, E29-4FP, EPI-3FP e EPI-4FP.

Amostra	Massa da amostra (g)	Massa de FP (g)	% de FP	Espessura média das amostras (mm)	Comprimento (cm)	Largura (cm)
ER-3FP	101,18	22,52	22	3,20	24,9	15,6
ER-4FP	100,52	29,75	30	2,96	24,9	15,6
EPI-3FP	104,79	26,18	35	3,14	24,9	15,6
EPI-4FP	114,04	30,93	25	2,90	24,9	15,6
E29-3FP	89,26	31,44	25	3,07	24,9	15,6
E29-4FP	117,97	29,31	27	3,08	24,9	15,6

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.3. Corte das Placas

As placas de fibra foram cortadas em uma fresa (EGX-300 Desktop Engraver - Roland) para a obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração, impacto e DMA, na Figura 10 é apresentada uma placa após o corte na fresa.

Figura 10. Imagem do (a) corte dos corpos de prova e (b) placa após o corte na fresa.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.4. Caracterizações

3.4.1. Resistência ao Impacto

O ensaio de impacto tags tipo izod, foi realizado no equipamento de marca Ceast, modelo Resil impacto. A velocidade do ensaio foi de 1,73, o martelo 2, o ângulo utilizado foi 58 °. A dimensão dos corpos de prova foi de 64 mm x 12 mm x 3,2 mm.

3.4.2. Resistência a Tração

O ensaio de tração segundo a ASTM D638, foi realizado na máquina de ensaio EMIC DL3000. Corpo de prova tipo 1, velocidade de 1mm/min, carga de 10 kN.

3.4.3. Resistência a Flexão

O ensaio de flexão foi realizado na máquina de ensaio EMIC DL3000, segundo a norma ASTM D790, utilizando corpos de prova com dimensão de 64mm x 12 mm x 3 mm, método de flexão em 3 pontos com L/D=16 e espaçamento das barras de 48 mm e velocidade de ensaio de 1,28mm/min.

3.4.4. DMA

3.4.4.1. 3-point-bending test

A análise dinâmico-mecânica dos materiais foi realizada no equipamento TA Q800, a garra utilizada foi a 3-point bending, com frequência de 1Hz, na faixa de temperatura de 20 a 170 °C a taxa de aquecimento de 3°C/min., e os corpos de prova apresentavam dimensões aproximadas de 35 mm x 12 mm x 3,2 mm.

3.4.4.2. Resistencia à Fluência (Creep test)

A análise foi realizada no equipamento TA Q800, a garra utilizada foi a 3-point bending, a temperatura 35 °C, a força aplicada foi de 3,5 MPa, o tempo de aplicação

da força foi de 30 minutos e o tempo de recuperação foi de 15 minutos. Os corpos de prova apresentavam dimensões aproximadas de 35 mm x 12 mm x 3,2 mm.

3.4.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em um microscópio TESCAN SEM modelo VEGA III, operando a 20 kV, utilizando detector de elétrons secundário. As matrizes foram criofraturadas e a superfície foi coberta com uma fina camada de ouro para observação. As micrografias dos compósitos foram obtidas da fratura após os ensaios de tração, com aumento de 500x.

3.4.6. Microscopia óptica

As micrografias ópticas foram feitas em um microscópio AXIO da ZEISS, equipado com um software AXIOVISION SE64, com escala de 200 µm.

3.4.7. Absorção de água

As medidas de absorção de água foram realizadas de acordo com a norma ASTM D570-98, que versa sobre o procedimento de imersão de longa duração. Para esta metodologia, as amostras foram imersas em água deionizada à 25 °C por 15 dias. A variação de peso foi aferida todos os dias, seguindo o seguinte método: as amostras foram retiradas do recipiente de água, secas com papel de filtro e pesadas em balança analítica. A quantidade de água absorvida foi calculada de acordo com a equação abaixo:

$$W(\%) = \frac{w_t - w_0}{w_0} \times 100$$

Onde W_0 e W_t são a massa inicial e a massa total após o tratamento de absorção, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão do presente trabalho serão apresentados os resultados e a discussão para os compósitos utilizando matriz epóxi e epóxi modificada com EPI e E29.

4.1. Resistência a Tração

O efeito da modificação das matrizes nas propriedades de resistência a tração é apresentado na Tabela 06, onde é possível observar que a modificação da resina epóxi com E29 ou EPI (PBNCO) não apresentou uma grande influência nas propriedades de resistência a tração para os compósitos. Dentre as propriedades analisadas um pequeno aumento no módulo é observado para a amostra E29-4FP indicando uma melhora na capacidade de reforço conferida pela interação entre fibra e matriz polimérica.

Tabela 6. Tabela do ensaio de tração para as amostras: ER-3FP, ER-4FP, E29-3FP, E29-4FP, EPI-3FP e EPI-4FP.

Amostra	% de fibra de pupunha	Tensão máxima (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)
ER-3FP	22	13 ± 1	2 ± 0,3	1450 ± 109
ER-4FP	30	17 ± 1	2 ± 0,8	1766 ± 76
EPI-3FP	35	14 ± 1	1 ± 0,1	1432 ± 274
EPI-4FP	25	16 ± 2	1 ± 0,2	1786 ± 19
E29-3FP	25	9 ± 1	1 ± 0,2	1034 ± 303
E29-4FP	27	18 ± 2	2 ± 0,1	1971 ± 135

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o fornecedor o precursor do E29 (Desmodur E29®) apresenta 24% de grupos NCO que foram convertidos em grupos uretano por meio da reação entre os grupos OH da ER. Desta forma, a quantidade de grupos uretano capazes de interagir com os grupos OH presente nas fibras tende a ser maior nos compósitos com E29 do que nos compósitos com matriz EPI, o que explica um aumento da adesão

entre as fibras e as matrizes aumentando assim a rigidez e o módulo dos compósitos estudados (ASUMANI; REID; PASKARAMOORTHY, 2012).

4.2. Resistência a Flexão

Na Tabela 7, são apresentados os resultados do ensaio de resistência a flexão. Foi possível observar que as propriedades de flexão foram influenciadas pela modificação da matriz e os melhores resultados em termos de módulo de flexão foram observados para os compósitos com E29-3FP e E29-4FP, devido a maior quantidade de grupos funcionais no precursor Desmodur E29[®]. Contudo, o compósito EPI-4FP que apresentou a maior resistência a flexão. Esta característica pode ser explicada devido ao aumento das interações entre a matriz polimérica e a fibra de pupunha, através dos grupos uretanos presentes na matriz modificada, formando grupos uretano na matriz e os grupos OH presentes na superfície da fibra.

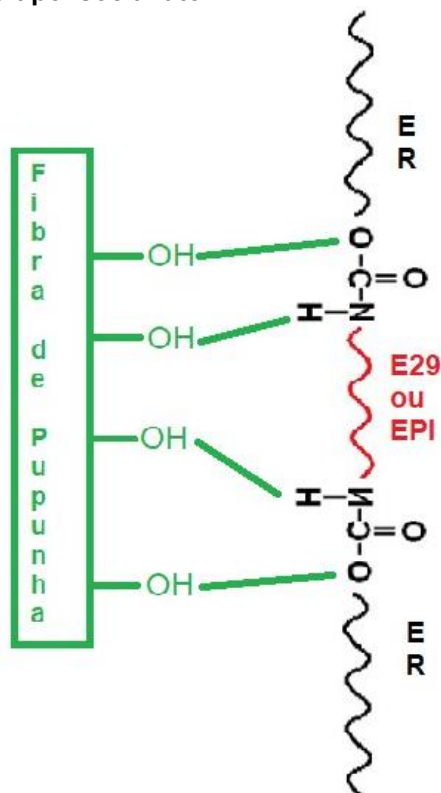
Tabela 7. Dados obtidos a partir do ensaio de flexão para as amostras: ER-3FP, ER-4FP, E29-3FP, E29-4FP, EPI-3FP e EPI-4FP.

Amostra	Força (N)	Tensão (MPa)	Módulo de Flexão (MPa)
ER-3FP	49 ± 9	29 ± 2	1961 ± 165
ER-4FP	49 ± 3	31 ± 3	2185 ± 131
EPI-3FP	42 ± 5	27 ± 3	1840 ± 116
EPI-4FP	54 ± 6	40 ± 5	2380 ± 106
E29-3FP	46 ± 9	30 ± 5	1879 ± 188
E29-4FP	44 ± 10	34 ± 4	2500 ± 98

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 11 representa o esquema das reações e possíveis interações entre as matrizes poliméricas modificadas e conforme previamente explicado.

Figura 11. Esquema das reações/interações envolvidas nos compósitos preparado com ER modificado com precursor do tipo isocianato.



Fonte: Elaborado pelo autor

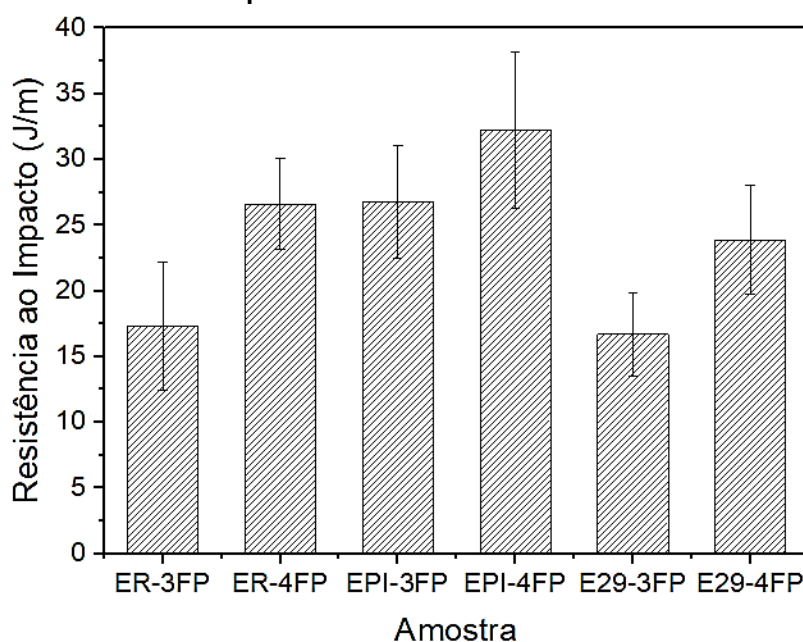
4.3. Resistencia ao Impacto

Na Figura 12 pode-se observar o resultado do ensaio de impacto dos compósitos. É possível observar que a matriz EPI apresentou o melhor resultado na resistência ao impacto, tanto com 3 placas de fibra de pupunha bem como o com 4 placas de fibra. Este resultado pode estar relacionado com ao aumento das interações entre fibra e matriz polimérica. Além disso, a natureza elastomérica do polibutadieno utilizado na modificação da resina epóxi para a produção do EPI que contribui para a o aumento da tenacidade dos materiais analisados. De acordo com a literatura, a modificação da resina epóxi com PBNCO resultou em um aumento significativo da resistência ao impacto, o que foi atribuído pelos autores ao tamanho nanométrico das partículas de borracha distribuídas homogeneamente dentro da matriz epoxídica (BARCIA; AMARAL; SOARES, 2003; SOARES et al., 2011, 2021).

A morfologia de fase dispersa de polibutadieno na matriz epóxi produz uma grande área interfacial que acarreta uma transferência da carga entre a resina e epóxi

e a borracha. Ao considerar a que a fibra não foi modificada, sugere-se que a melhora na resistência ao impacto se deve principalmente as propriedades melhoradas que a matriz modificada propicia aos compósitos. Vale destacar que tanto a tenacidade quanto a rigidez dos compósitos com matriz EPI foram melhoradas. Este comportamento não é comum para resina epóxi modificadas com borracha líquidas, porém torna estes materiais muito interessantes para diversas aplicações.

Figura 12. Gráfico do ensaio de impacto das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP, a resistência ao impacto dos materiais é dada em J/m.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4. Morfologia

4.4.1. Microscopia Óptica

Para conhecer a morfologia das placas de fibra de pupunha não tecidas, bem como, o tamanho e a interação das fibras com o aglutinante (dextrina) foram realizados microscopias ópticas. Na Figura 13, é apresentada a micrografia da placa de fibra de pupunha não tecida onde é possível observar que dextrina (aglutinante) reveste a fibra totalmente, e que as placas são formadas por várias fibras de diferentes tamanhos reunidas umas sobre as outras.

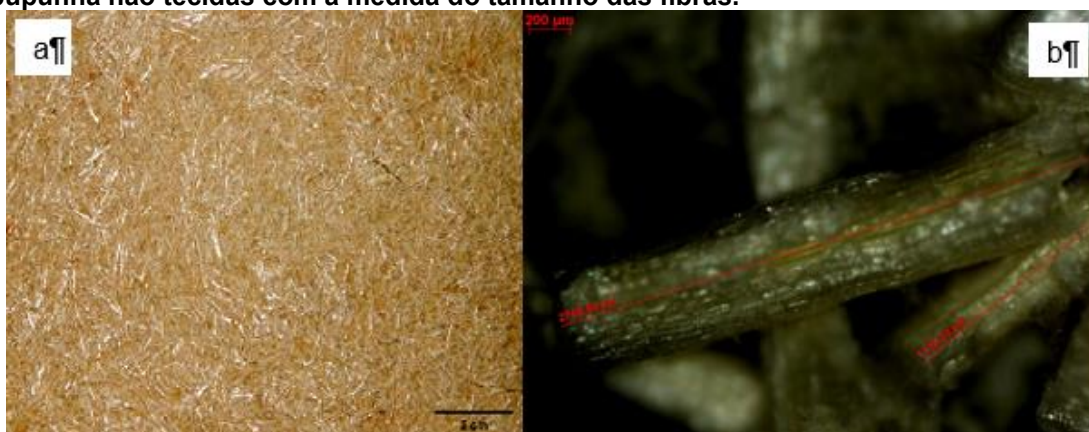
Figura 13. Microscopia óptica da placa de fibra de pupunha não tecida.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 14a, observa-se que a FP podem ser consideradas fibras longas, a grande maioria delas não foi possível medir por microscopia óptica. Na Figura 14b é apresentada uma microscopia óptica de FP na qual foi possível medir o tamanho de algumas fibras de pupunha na placa que apresentaram tamanhos de 2748 µm e outra com 1116 µm. Outro dado importante é que as fibras mesmo sem tratamentos, são fibras bem limpas e com poucas imperfeições.

Figura 14. (a) Fotografia de uma das placas de FP e (b) Microscopia óptica das placas de fibra de pupunha não tecidas com a medida do tamanho das fibras.



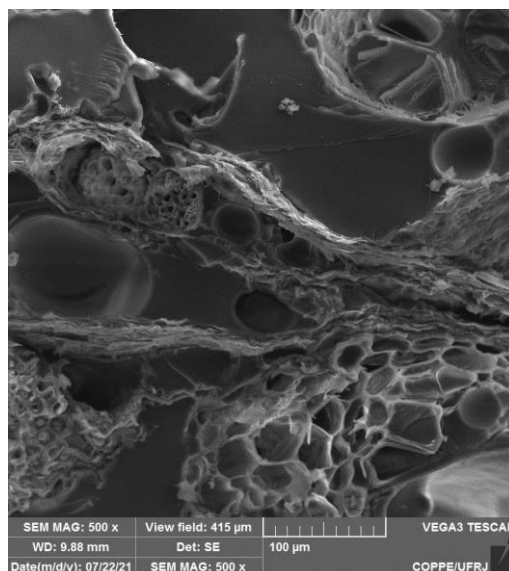
Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

As morfologias dos compósitos foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a partir da fratura do ensaio de tração. Na Figura 15, foi analisada a

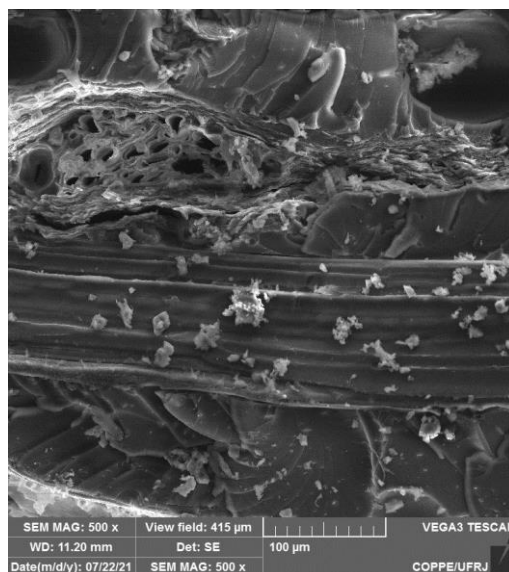
adesão da fibra na matriz para o compósito com matriz resina epóxi (ER-4FP) que apresentou vários vazios, demonstrando a baixa adesão entre fibra e matriz.

Figura 15. Micrografia da amostra ER-4FP com ampliação de 500x, obtidas da fratura do ensaio de tração.



A Figura 16 apresenta a morfologia da amostra EPI-4FP, e a partir dela foi possível observar uma morfologia mais compacta demonstrando uma melhor adesão entre a fibra e a matriz epoxídica modificada com PBNCO. A adesão da fibra na matriz foi aprimorada, pois não apresenta vazios aparentes.

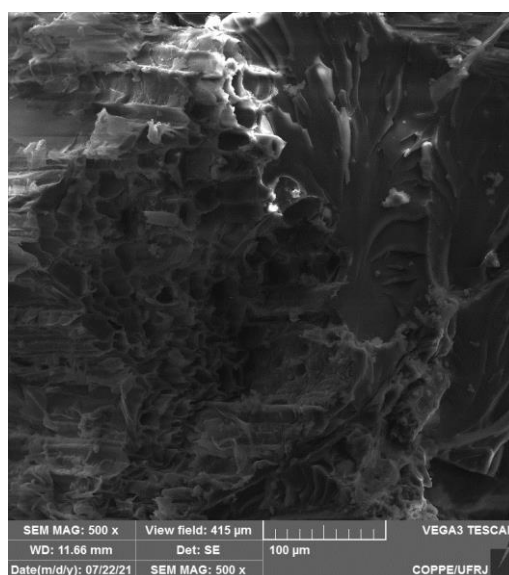
Figura 16. Micrografia da amostra EPI-4FP com ampliação de 500x, obtidas da fratura do ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 17 apresenta a morfologia da amostra E29-4FP, obtida a partir da fratura do ensaio de tração. Foi possível observar a ausência de vazios, a fibra bem aderida na matriz polimérica modificada com o E29, demonstrando que a modificação da resina epoxídica favorece a adesão fibra-matriz. em um estudo anterior foi observado que o uso do E29 para a modificação da fibra de pupunha melhorou a adesão apresentando uma morfologia em que a matriz polimérica envolve a fibra (CORDEIRO; PITA; SOARES, 2017).

Figura 17. Micrografia da amostra E29-4FP com ampliação de 500x, obtidas da fratura do ensaio de tração.

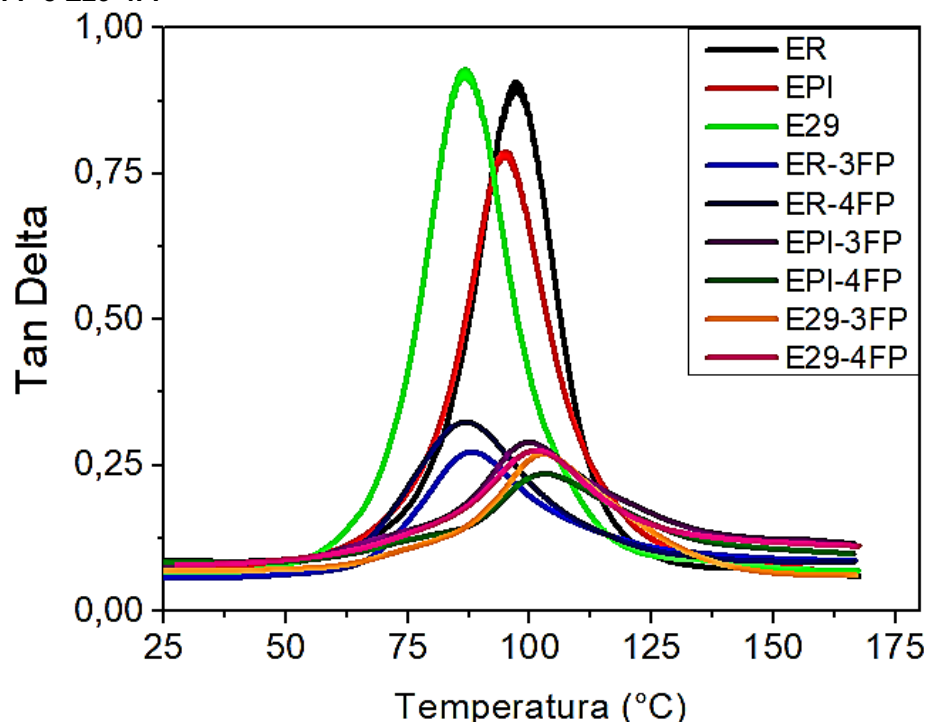


4.5. Análise Dinâmico-mecânica (DMA)

O pico de Tan Delta ou amortecimento é definido como a razão entre o módulo de perda (E'') e o módulo de armazenamento (E'). Na Figura 18 é apresentado o gráfico de Tan delta em função da temperatura para as matrizes ER, E29 e EPI, bem como os compósitos com fibra de pupunha. A altura da curva de tan delta pode estar relacionada com a natureza elástica do material. Um baixo amortecimento pode corresponder a um material mais rígido. Assim na Figura 18 pode-se observar uma diminuição significativa do amortecimento para os compósitos analisados quando comparado com as matrizes correspondentes pode ser atribuída a uma diminuição da fração de volume da matriz e a uma restrição de movimento da cadeia polimérica devido ao efeito de reforço da fibra, que contribui para um aumento do E' . Em relação aos compósitos, o compósito EPI-4FP apresentou o menor amortecimento, embora a

quantidade de fibra seja uma das maiores neles. Este comportamento confirma um aumento da restrição de movimento da cadeia polimérica devido a interação entre matriz e fibra (CORDEIRO, 2016).

Figura 18. Gráfico da Tan delta pela temperatura das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 8 são apresentados os valores da temperatura de transição vítrea (T_g) obtidos a partir do pico máximo da Tan delta. A presença de 10 % de E29 na matriz E29 resultou em uma diminuição significativa da T_g devido ao efeito plastificante que o E29 gerou para material. Ao contrário, a rede construída pelo EPI não apresentou alteração significativa do valor de T_g quando comparada com a rede formada pela ER. Esse comportamento já foi relatado e foi atribuído a imiscibilidade entre o ER e o polibutadieno presente no EPI, devido a grande diferença estrutural entre eles (SOARES et al., 2011, 2021).

Os compósitos ER-3FP e ER-4FP apresentam valores de T_g inferiores ao da ER pura, provavelmente devido a presença de vazios na interface entre fibra e matriz, aumentando assim a mobilidade da cadeia polimérica. Quanto aos compósitos com matrizes modificadas (EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP) os picos se deslocaram para temperaturas mais altas, podendo-se concluir que a adesão

interfacial entre matriz e fibra afetaram a mobilidade da cadeia polimérica devido a melhor compatibilidade entre a matriz modifica e a fibra de pupunha.

Tabela 8. Temperatura de transição vítrea (T_g) das amostras FP, ER-3FP, ER-4FP, E29-3FP, E29-4FP, EPI-3FP e EPI-4FP.

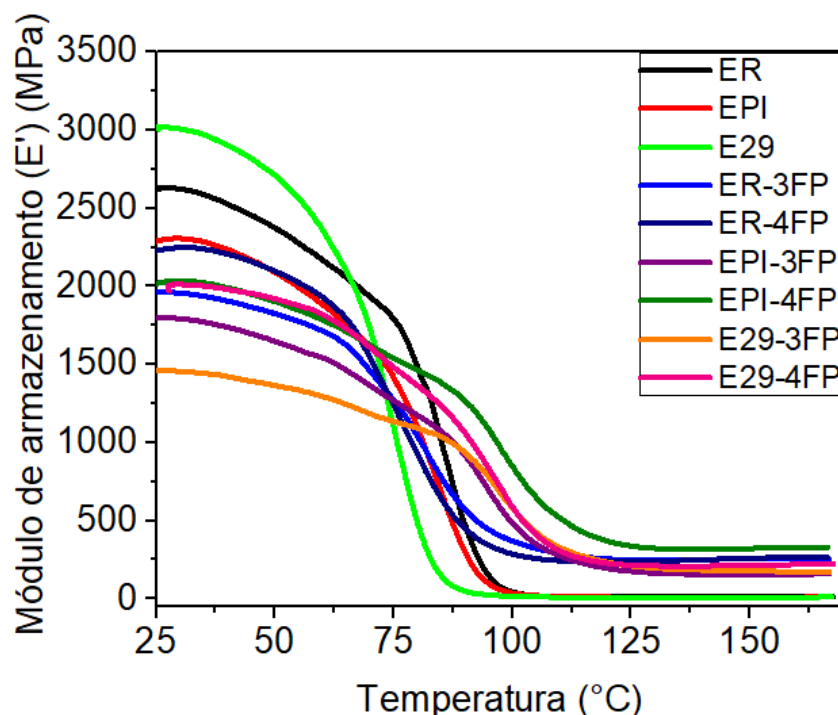
Amostra	T_g (°C)
ER	97
EPI	95
E29	87
ER-3FP	88
ER-4FP	87
E29-3FP	100
E29-4FP	103
EPI-3FP	102
EPI-4FP	101

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 19 são apresentados os dados relativos ao módulo de armazenamento (E') em função da temperatura para os compósitos com fibra de pupunha. Os valores de E' dos compósitos foram menores na região da transição vítrea (T_g) do que o das matrizes termoendurecíveis puros, provavelmente devido a presença do aglutinante (dextrina) utilizado para a formação das placas de fibra. Este componente tem uma massa molar relativamente baixa, e tende a atuar como um plastificante, diminuindo assim a o modulo de elasticidade dos compósitos como um todo (SIKORA et al., 2002; MILOTSKYI; BLIARD, 2018).

Contudo, observa-se ainda na Figura 19 um aumento significativo do E' na região acima da T_g (região borrachosa) para os compósitos. Este comportamento foi observado para outros sistemas compósitos e pode ser explicado pela natureza rígida da fibra natural, que assim permanece mesmo em temperaturas superiores a transição vidro-borracha (SENG CHUA, 1987; POTHAN; THOMAS; GROENINCKX, 2006; ORNAGHI et al., 2010; ROMANZINI et al., 2012). A presença da fibra de pupunha restringe a movimentação das cadeias poliméricas no compósito, contribuindo assim para um aumento significativo do E' na região borrachosa, desta forma, caracterizando um efeito de reforço (ORNAGHI et al., 2010).

Figura 19. Gráfico do módulo de armazenamento (E') obtido a partir da análise dinâmico-mecânica (DMA) para as amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP.

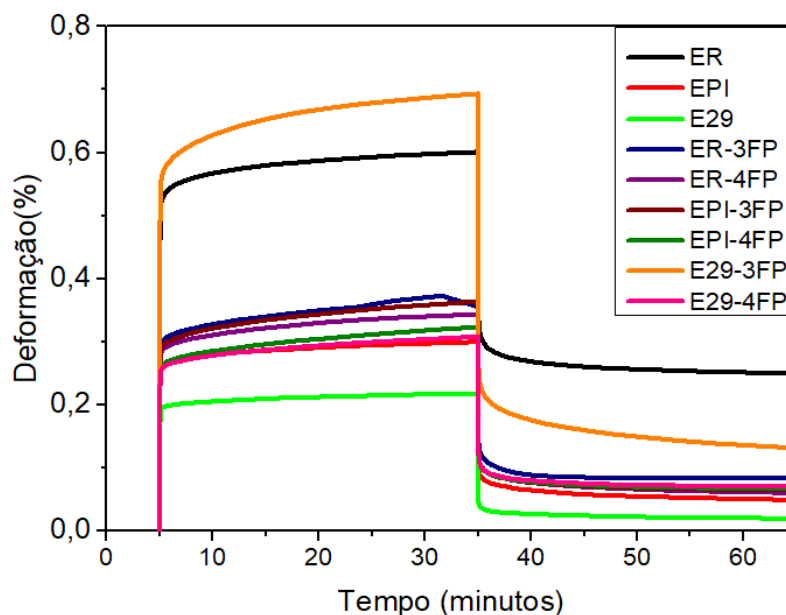


Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.1. Resistência a Fluência (Creep Test)

A resistência a fluência pode ser considerado um dos requisitos mais importantes para compósitos de fibras naturais a serem utilizados em aplicações para moveis. Na Figuras 20 são apresentadas as curvas de fluência flexural para as matrizes puras e seus respectivos compósitos com FP. O compósito E29-3FP apresentou a maior deformação elástica instantânea (ϵ_0), indicando uma baixa resistência a fluência, esse resultado pode ser explicado devido a essa placa ter apresentado um alto vazamento de matriz, o que propiciou pontos em que a FP pouco interagiu com a matriz E29. A ER também apresentou um alto ϵ_0 . É possível observar também que os demais compósitos apresentam uma significativa resistência à fluência. A modificação da resina epóxi com 10% de PBNCO ou E29 resultou em uma melhora significativa da resistência a fluência. Quando observados os compósitos com as matrizes modificadas é possível observar uma ótima resistência a fluência.

Figura 20. Gráfico do ensaio de fluência flexural com a deformação (%) pelo tempo (min) das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP.



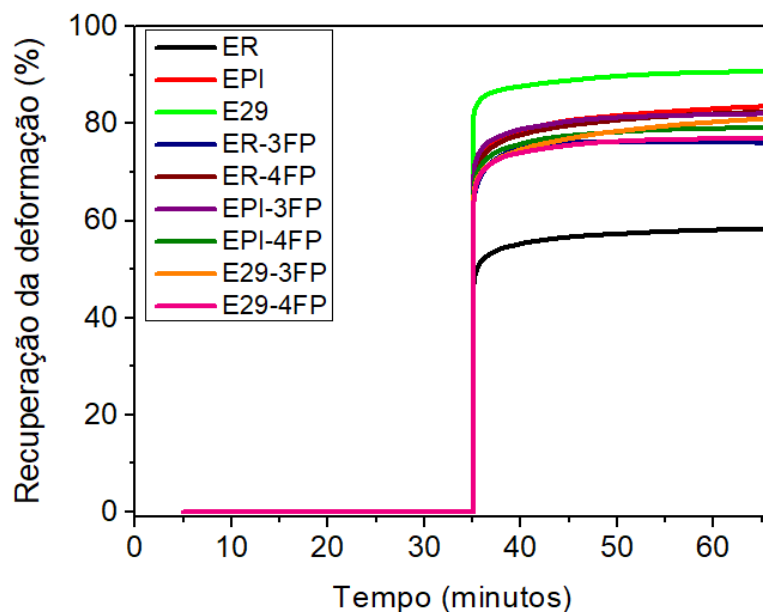
Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação a recuperação da deformação apresentada na Figura 21, foi possível observar que a ER a menor recuperação de deformação. Levando-se em conta as matrizes modificadas com PBNCO e E29, observa-se uma recuperação da deformação muito boa, cerca de 83% para o EPI e 91% para o E29. Esta evolução pode estar relacionada com a melhora da tenacidade dos materiais devido a presença da borracha covalentemente ligada a matriz ER, como relatado anteriormente para o EPI (SOARES et al., 2011, 2021). Com relação aos compósitos com FP foi possível observar que todos eles apresentam recuperação superior a 70% e que esses valores estão bem próximos ao das matrizes modificadas.

4.6. Absorção de água

Na Figura 22 e na Tabela 9 são apresentados os resultados para o ensaio de absorção de água, realizado durante 15 dias. Neste ensaio foi possível observar que a amostra E29 3FP apresentou 102% de absorção de água, isso pode estar relacionado ao fato de esta amostra ter a distribuição da matriz na superfície do compósito inferior à dos demais compósitos durante a preparação dos compósitos com fibra, deixando ter mais fibra na superfície, sem a proteção fornecida pela matriz polimérica.

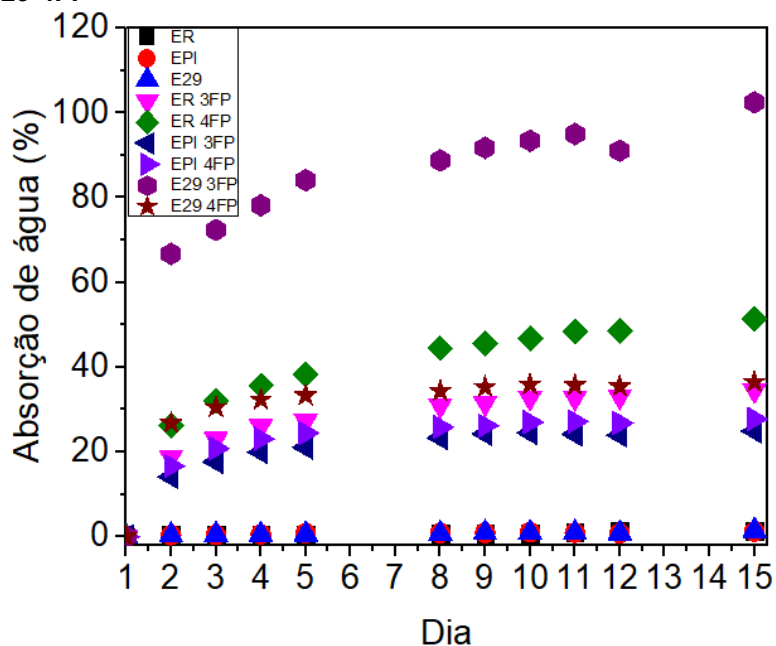
Figura 21. Gráfico do ensaio de fluência, com a recuperação da deformação (%) pelo tempo (min) das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação aos demais compósitos é possível concluir que eles apresentam maior absorção de água quando comparada com as matrizes puras, como esperado devido à natureza hidrofílica das fibras lignocelulósicas.

Figura 22. Gráfico do ensaio de absorção de água das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao compósito ER-4PF, cerca de 32% de água foi absorvida após 3 dias de imersão em água, chegando a absorver cerca de 50% após 15 dias de imersão.

Tabela 9. Tabela do inchamento (%) em água das amostras ER-3FP, ER-4FP, EPI-3FP, EPI-4FP, E29-3FP e E29-4FP em cada dia

Dia	Amostras								
	ER	EPI	E29	ER-3FP	ER-4FP	EPI-3FP	EPI-4FP	E29-3FP	E29-4FP
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,44	0,39	0,34	18,82	26,29	14,14	16,68	66,75	26,79
3	0,5	0,4	0,49	23,05	31,95	17,67	20,82	72,37	30,58
4	0,47	0,54	0,56	26,11	35,65	19,97	23,06	78,21	32,32
5	0,57	0,78	0,6	27,35	38,3	21,09	24,45	84,12	33,28
8	0,7	0,88	0,76	31,06	44,44	23,34	25,85	88,8	34,35
9	0,77	0,9	0,94	31,58	45,62	24,27	26,21	91,8	35,29
10	0,81	1,03	0,98	32,81	46,8	24,53	27	93,43	35,89
11	1,02	0,93	0,97	32,80	48,27	24,17	27,14	95,30	35,77
12	1,32	0,8	0,85	33,09	48,59	23,97	26,84	91,09	35,43
15	1,27	1,22	1,5	34,59	51,43	24,91	27,76	102,5	36,46
Seca	-0,07	-0,34	-0,21	-5,25	-5,95	-5,62	-5,74	-4,82	-7,56

Fonte: Elaborado pelo autor

Quando observados os compósitos preparados com matrizes EPI e E29 apresentaram menor absorção de água, sendo os melhores resultados observados para os compósitos com matriz EPI. Este comportamento pode ser atribuído a uma melhor interação entre fibra e matriz devido também a presença na matriz epóxi do polibutadieno, um componente apolar.

5. SUGESTÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

- Realização da análise termogravimétrica para avaliação da degradação das fibras e compósitos.
- Preparar compósitos com diferentes fibras naturais com as matrizes modificadas.
- Avaliar as propriedades de cisalhamento dos compósitos com fibra de pupunha.

CONCLUSÃO

Diante do exposto no presente trabalho, pode-se concluir que a modificação da resina epóxi (ER) com 10% de polibutadieno à base de isocianato (EPI) ou poliálcool-poliéster (E29) materiais promissores para o desenvolvimento de compósitos de fibras naturais com melhor desempenho mecânico. O uso de placas de fibra de pupunha não tecidas, oriundas de resíduos agroindustriais, intercaladas com as matrizes modificadas resultam em compósitos laminados com propriedades de flexão e resistência ao impacto superiores aos compósitos com matriz ER pura. Com relação a transição vítrea (T_g) dos materiais analisados, mesmo com o grande efeito de reforço, um aumento significativo da T_g foi observado com a presença de FP e matriz epóxi modificada. Resumindo, ao utilizar fibra não tecida de pupunha para preparação de compósitos laminados, evitam-se várias etapas de modificação e funcionalização observadas para fibras naturais e contribui para o desenvolvimento de placas de baixo custo que podem ser amplamente utilizados na indústria da construção civil.

REFERÊNCIAS

ALHIJAZI, M. et al. Recent Developments in Palm Fibers Composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 28, n. 12, p. 3029–3054, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10924-020-01842-4>>.

ASUMANI, O. M. L.; REID, R. G.; PASKARAMOORTHY, R. The effects of alkali-silane treatment on the tensile and flexural properties of short fibre non-woven kenaf reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 43, n. 9, p. 1431–1440, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.04.007>>.

BARCIA, F. L.; ABRAHÃO, M. A.; SOARES, B. G. Modification of epoxy resin by isocyanate-terminated polybutadiene. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 83, n. 4, p. 838–849, 2001.

BARCIA, F. L.; AMARAL, T. P.; SOARES, B. G. Synthesis and properties of epoxy resin modified with epoxy-terminated liquid polybutadiene. *Polymer*, v. 44, n. 19, p. 5811–5819, 2003.

BATISTA, K. C. et al. Soil Biodegradation of PHBV/Peach Palm Particles Biocomposites. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 18, n. 3, p. 346–354, 24 set. 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10924-010-0238-4>>.

BOLANHO, B. C.; DANESI, E. D. G.; BELÉIA, A. D. P. Carbohydrate composition of peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth) by-products flours. *Carbohydrate Polymers*, v. 124, p. 196–200, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.02.021>>.

CHEN, J. et al. Synthesis and application of thermal latent initiators of epoxy resins: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 137, n. 48, p. 1–20, 2020.

CHIU, F. C. et al. Polycarbonate/poly(Vinylidene fluoride)-blend-based nanocomposites—effect of adding different carbon nanofillers/organoclay. *Polymers*, v. 13, n. 16, 2021.

CHOKSHI, S. et al. Chemical Composition and Mechanical Properties of Natural Fibers. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 10, p. 3942–3953, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848738>>.

CORDEIRO, E. P. *COMPÓSITOS DE RESINA EPOXÍDICA E FIBRA DE PUPUNHA (Bactris gasipaes Kunth)*. 2016. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2016.

CORDEIRO, E. P.; PITA, V. J. R. R.; SOARES, B. G. Epoxy–Fiber of Peach Palm Trees Composites: The Effect of Composition and Fiber Modification on Mechanical and Dynamic Mechanical Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 25, n. 3, p. 913–924, 2017.

DA SILVA, V. L. et al. Morphology and evaluation of inicial growth of *Bactris gasipaes* Kunth. seedlings in different substrata. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 28, n. 3, p. 477–480, 2006.

GEORGE, J.; SREEKALA, M. S.; THOMAS, S. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering and Science*, v. 41, n. 9, p. 1471–1485, 2001.

JIN, F. L.; LI, X.; PARK, S. J. Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 29, p. 1–11, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>>.

KEERTHIVEETIL RAMAKRISHNAN, S. et al. The effect of various composite and operating parameters in wear properties of epoxy-based natural fiber composites. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 24, n. 2, p. 667–679, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10163-022-01357-1>>.

KUMAR, S. et al. Synthesis and characterization of petroleum and biobased epoxy resins: a review. *Polymer International*, v. 67, n. 7, p. 815–839, 2018.

MATOS, C. F.; GALEMBECK, F.; ZARBIN, A. J. G. Multifunctional nanocomposites of natural rubber latex and carbon nanostructures. *Revista Virtual de Quimica*, v. 9, n. 1, p. 73–96, 2017.

MILOTSKYI, R.; BLIARD, C. Carboxymethylation of Plasticized Starch by Reactive Extrusion (REX) with High Reaction Efficiency. *Starch/Staerke*, v. 70, n. 11–12, p. 1–7, 2018.

MIMURA, K.; ITO, H. Characteristics of epoxy resin cured with in situ polymerized curing agent. *Polymer*, v. 43, n. 26, p. 7559–7566, 2002.

MITTAL, V.; SAINI, R.; SINHA, S. Natural fiber-mediated epoxy composites - A review. *Composites Part B: Engineering*, v. 99, p. 425–435, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.051>>.

MOHAN, P. A Critical Review: The Modification, Properties, and Applications of Epoxy Resins. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, v. 52, n. 2, p. 107–125, 2013.

ORNAGHI, H. L. et al. Mechanical and dynamic mechanical analysis of hybrid composites molded by resin transfer molding. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 116, n. 5, p. n/a-n/a, 2010. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.32388>>.

OZTURK, A.; KAYNAK, C.; TINCER, T. Effects of liquid rubber modification on the behaviour of epoxy resin. *European Polymer Journal*, v. 37, n. 12, p. 2353–2363, 2001.

PONTES, K. et al. The Effect of Ionic Liquid on the Development of Polyaniline/Natural Fibers and Biodegradable Conductive Composites Based on Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate). *Macromolecular Symposia*, v. 380, n. 1, p. 1–7, 2018.

POTHAN, L. A.; THOMAS, S.; GROENINCKX, G. The role of fibre/matrix interactions on the dynamic mechanical properties of chemically modified banana fibre/polyester composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 37, n. 9, p. 1260–1269, 2006.

PREMNATH, A. A. Impact of surface treatment on the mechanical properties of sisal and jute reinforced with epoxy resin natural fiber hybrid composites. *Journal of Natural Fibers*, v. 16, n. 5, p. 718–728, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1432002>>.

RAJAN, R. et al. Modification of epoxy resin by silane-coupling agent to improve tensile properties of viscose fabric composites. *Polymer Bulletin*, v. 75, n. 1, p. 167–195, 2018.

RAMOS, A. *DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DA PUPUNHEIRA (Bactris gasipaes Kunth) IRRIGADA POR GOTEJAMENTO E A FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO*. 1998. Universidade de São Paulo, 1998.

ROMANZINI, D. et al. Influence of fiber hybridization on the dynamic mechanical properties of glass/ramie fiber-reinforced polyester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 31, n. 23, p. 1652–1661, 2012.

SENG CHUA, P. Dynamic Mechanical Analysis Studies of the Interphase. *Polymer Composites*, v. 8, n. 5, 1987.

SETHILKUMAR, K. et al. Effect of Alkali Treatment on Mechanical and Morphological Properties of Pineapple Leaf Fibre/Polyester Composites. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 27, n. 6, p. 1191–1201, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10924-019-01418-x>>.

SIKORA, M. et al. Dextrin plasticizers for aqueous colloidal processing of alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, n. 5, p. 625–628, 2002.

SOARES, B. G. et al. Characterization of nanostructured epoxy networks modified with isocyanate-terminated liquid polybutadiene. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 358, n. 2, p. 338–346, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2011.03.030>>.

SOARES, B. G. et al. Toughened epoxy-liquid polybutadiene networks cured with anhydride with outstanding thermal and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 138, n. 14, p. 14–15, 2021.

SOARES, B. G.; ALVES, F. F. Nanostructured epoxy—rubber network modified with mwcnt and ionic liquid: Electrical, dynamic-mechanical, and adhesion properties. *Polymer Composites*, v. 39, p. E2584–E2594, 2018.

SPACKI, K. de C. et al. PUPUNHA (BACTRIS GASIPAES KUNTH): UMA REVISÃO. Em: *Agricultura e Agroindústria no contexto do desenvolvimento rural sustentável*. [s.l.] Editora Científica Digital, 2021. p. 332–350.

SUN, Z. Hyperbranched Polymers in Modifying Natural Plant Fibers and Their Applications in Polymer Matrix Composites - A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 67, n. 32, p. 8715–8724, 2019.

TEMER, B. *Desenvolvimento e caracterização de chapas de fibras de palmeira de Pupunha (Bactris Gasipaes)*. 2010. Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0821581_10_pretextual.pdf>.