CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM REFORÇOS DE FIBRAS NATURAIS

Daniel Kioshi Kawasaki Cavalcanti

Dissertação apresentada ao Programa/Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais - PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título/certificado de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Orientadora: Doina Mariana Banea

Rio de Janeiro
Agosto de 2018

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM REFORÇOS DE FIBRAS NATURAIS

Dissertação apresentada ao Programa/Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais - PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título/certificado de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Daniel Kioshi Kawasaki Cavalcanti

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professora PhD. Doina Mariana Banea (CEFET/RJ) (orientadora)

_____

Professor D.Sc Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ)

_____

Professor D.Sc André Rocha Pimenta (IFRJ)

Rio de Janeiro
Agosto de 2018

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

C376 Cavalcanti, Daniel Kioshi Kawasaki
Caracterização mecânica de compósitos híbridos com reforços de fibras naturais / Daniel Kioshi Kawasaki Cavalcanti.—2018.
64f. : il. (algumas color.) , grafs., tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 61-64
Orientadora : Doina Mariana Banea

1. Nanocompósitos (Materiais). 2. Tecnologia de materiais. 3. Engenharia mecânica. 4. Fibras naturais. I. Banea, Doina Mariana (Orient.). II. Título.

CDD 688.9

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Marcio Jansen Cavalcanti e Maria Madalena Tomoko Kawasaki Cavalcanti, que ao longo de todos esses anos sempre me mantiveram no caminho certo e moldaram meu caráter e personalidade para melhor, por sua inabalável confiança em minhas capacidades sempre estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Aos meus primos, tios e avós, que com seu apoio constante e amor que me dedicaram. À memória de meus avos que estariam orgulhosos das minhas conquistas.

Aos meus amigos que me acompanharam durante todos esses anos, em especial Rosemere Lima, Jorge Neto, Felipe Eiras, Carlos Renato, Breno Duarte, Yuri Salles, Guilherme Calazans, Júlia Bonaldo, Gabriel Watanabe, Rafael Lavalle, Gabriel Brasil, Diogo Vasconcellos e todos os demais que não nomeei, mas que sempre estarão comigo em todas as minhas empreitadas, muito obrigado por tudo!

Ao grupo de pesquisa da Universidade do Porto, em especial ao Professor Lucas F. M. da Silva por sua excelente apresentação e apoio durante o período em que estive sob sua tutela. Aos meus amigos lusitanos Ricardo Carbas, José Machado, Guilherme Viana, Eduardo Marques, Marcelo Costa, Ana Loureiro e Ana Queirós que demostraram carinho e companheirismo. Por tudo que me ensinaram e pelas amizades que levarei comigo, obrigado.

Ao CNPq e ao CEFET/RJ pelo financiamento da minha bolsa de estudo e das pesquisas realizadas.

Aos alunos de iniciação cientifica do CEFET/RJ, Matheus Fernandes, Lucas Medina e José Lucas pelo apoio e convivência durante todo o decorrer da pesquisa.

A minha orientadora Doina Mariana Banea que me ajudou a melhorar e crescer como profissional e pessoa, me apoiando nas minhas escolhas acadêmicas e me orientando de forma brilhante. Agradeço por tudo que me ensinou e as oportunidades que me deu, mas em especial gostaria de agradecer por sua amizade, levarei suas lições e companheirismo comigo sempre.

Finalmente, agradeço a todos os professores, pesquisadores e profissionais que me ajudaram nesta jornada, sem vocês nada disso seria possível. Em especial gostaria de agradecer aos Professores Hector Reynaldo, Ricardo A. Amar, Luiz Felipe G.

Souza e Juliana Basílio que contribuíram para a execução deste e de muitos outros trabalhos.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM REFORÇOS DE FIBRAS NATURAIS

A necessidade de materiais mais leves e renováveis bota em foco o estudo de reforços alternativos para compósitos reforçados com fibras. As fibras naturais têm potencial de cobrir essas necessidades, oferecendo um reforço com boas propriedades mecânicas com um baixo gasto energético, tanto para produzir quanto para reciclar. Porém estes materiais apresentam claras limitações quanto ao seu uso, em especial quando se aplicando a matrizes poliméricas, devido a propriedades inerentes, comprometendo aplicações em áreas estruturais. A fim de mitigar tais características limitantes se faz uso de tratamentos químicos superficiais e configuração das lâminas. O objetivo principal deste trabalho foi investigar o efeito da hibridação intralaminar, uma configuração pouco comum na literatura, e o efeito de tratamentos químicos nas propriedades mecânicas de compósitos híbridos intralaminares de fibras naturais. As fibras de juta, sisal, curauá e rami foram selecionadas como reforços naturais. Os compósitos híbridos (juta + sisal, juta + curauá, juta + rami, juta pura e juta + fibra de vidro) com matriz epóxi foram produzidos por *Hand layup*. Testes de tração, flexão e impacto foram realizados de acordo com os padrões da ASTM. Verificou-se que o compósito híbrido natural de juta + sisal apresentou melhores propriedades mecânicas, em geral, do que o compósito híbrido juta + fibra de vidro, tornando o sisal uma opção viável na substituição de fibra de vidro em compósitos híbridos. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi usada para estudar a superfície da fratura dos espécimes testados, confirmando falhas por delaminação e ruptura das fibras. Finalmente, as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos foram determinadas por métodos analíticos teóricos e semi-empíricos e comparadas com os resultados experimentais.

Palavras-chave: Tratamento químico, compósito natural híbrido, caracterização mecânica, MEV, métodos analíticos.

ABSTRACT

Mechanical characterization of natural hybrid reinforced composites.

The need for lighter and renewable materials puts emphasis on the study of alternative reinforcements for fiber-reinforced composites. Natural fibers have the potential to cover these needs, offering a reinforcement with good mechanical properties with a low energy expenditure, both to produce and to recycle. However, these materials have clear limitations on their use, especially when applied to polymer matrices due to inherent properties, compromising applications in structural areas. In order to mitigate such limiting characteristics, one makes use of superficial chemical treatments and layer configuration. The main objective of this work was to investigate the effect of hybridization and the effect of chemical treatments on the mechanical properties of intralaminar natural fibres hybrid composite. Jute, sisal, curauá and ramie fibres were selected as natural reinforcements. The hybrid composites (jute + sisal, jute+ curauá, jute + ramie, plain jute and jute + fibreglass) with an epoxy-based matrix were produced by hand layup. Tensile, flexural and impact tests were carried out according to ASTM standards. It was found that jute + sisal natural hybrid composite presented better overall mechanical properties then the jute + fibreglass hybrid composite, making the sisal a viable option in substituting fibreglass in hybrid composites. A scanning electron microscopy (SEM) was used study the fracture surface of the tested specimens, confirming failure through delamination and fibre fracture. Finally, the mechanical properties of the hybrid composites were determined by theoretical and semi-empirical analytical methods and compared to the experimental results.

Keywords: Chemical treatment, hybrid natural composite, mechanical characterization, SEM, analytical methods.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Importância de materiais ao longo do tempo..... 13
Figura 2: Classificação dos compósitos em relação ao tipo de reforço. 18
Figura 3: Tipos de fibras, com foco nas utilizadas, rami, juta, curauá e fibra de vidro.. 23
Figura 4: Gasto energético necessário para produzir uma tonelada de material. 24
Figura 5: Produção Brasileira de fibras naturais..... 25
Figura 6: Classificação dos tipos de matrizes..... 26
Figura 7: Relação de propriedades por comprimento de fibra. 28
Figura 8: Configurações hibridas para reforços em compósitos. 30
Figura 9: O efeito da hibridização em compósitos:(a). Compósito composto de 50/50% de cada elemento. (b) Efeito sobre outras propriedades mecânicas. 31
Figura 10: Padrão twill: a) Juta + sisal; b) juta+ fibra de vidro..... 34
Figura 11: Corpo de prova para testes de tração, ASTM D638. 37
Figura 12: Configuração do teste de flexão..... 39
Figura 13: Amostra de juta+sisal na máquina de impacto. 40
Figura 14: (a) Microscópio eletrônico de varredura (MEV), FEI Inspect (b) Máquina de teste universal Instron 5966..... 41
Figura 15: compósito de juta + fibra de vidro (a) corpo de prova rompido (b) corpos de prova rompidos. 45
Figura 16: Curvas de tensão / deformação para compósito (a) não tratado, (b) tratamento alcalino, e (c) tratamento misto. 46
Figura 17: Tensão de ruptura dos compósitos em função do tratamento..... 47
Figura 18: Dados de modulo de Young. 48
Figura 19: Alongamento dos compósitos estudados..... 49
Figura 20: Curvas de resistência à flexão para compósitos híbridos com tratamentos: (a) não tratados, (b) alcalino e (c) mistos. 52
Figura 21: Dados experimentais de flexão. 53
Figura 22: Amostras após testes de impacto. 54
Figura 23: Absorção de energia dos compósitos híbridos..... 56
Figura 24: Imagens SEM dos espécimes híbridos. (a) juta + rami (b) juta + curauá (c) juta + fibra de vidro..... 59
Figura 25: Imagens SEM dos espécimes de juta + curauá. (a) Amostra do tratamento alcalino (NaOH) (b) Tratamento misto (NaOH + silanização). 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Processo de fabricação de compósitos com matrizes poliméricas (modificado de GIBSON (2011). 19
Tabela 2: Dados das fibras (MARINELLI, 2008, *et al.*) 25
Tabela 3: Tipo de tratamentos químicos 29
Tabela 4: Propriedades resina AR260/AH260 35
Tabela 5: Corpos de prova e normas. 36
Tabela 6: Dados de tração 50
Tabela 7: Absorção de energia de compósitos híbridos. 55
Tabela 8: Comparação dos dados analíticos e experimentais. 57

SUMÁRIO

Capítulo 1 12
Introdução 12
1.1. Motivação 13
1.2. Objetivos geral e específicos 14
1.3. Metodologia 14
1.4. Organização do trabalho 16
Capítulo 2 17
Revisão Bibliográfica 17
2.1 Materiais compósitos 17
2.2.1. Processos de fabricação de compósitos 18
2.2.2. Aplicação de compósitos 21
2.3. Fatores que influenciam a resistência dos materiais compósitos 22
2.3.1. Fibras 22
2.3.2. Fibras vegetais 23
2.3.3. Resinas 26
2.3.4. Sequência de disposição de camadas de reforço no compósito 26
2.3.5. Tamanho de fibra 27
2.3.6. Tratamentos superficiais 28
2.4. Compósitos híbridos 30
Capítulo 3 33
Metodologia 33
3.1 Materiais 33
3.2. Produção do tecido 33
3.3. Tratamentos químicos de superfície 34
3.4. Produção dos compósitos 35
3.5. Fabricação dos corpos de prova 35
3.6. Ensaios (testes) 36
3.6.1. Ensaio de tração 37
3.6.2. Ensaio de flexão de três pontos 38
3.6.3. Impacto 39
3.6.4. MEV 40
3.7. Maquinário 41
3.8. Estudos analíticos 41

3.8.1. ROM 42
3.8.2. ROMM 43
3.8.3. Chamis 44
Capítulo 4 45
Resultados e discussão 45
4.1 Ensaio de tração 45
4.2. Ensaio de flexão 51
4.3. Ensaios de impacto 54
4.4. Modelos analíticos 56
4.5. MEV 58
Capítulo 5 61
Conclusão 61
5.1 Conclusões 61
5.2. Sugestões para trabalhos futuros 62
Referências 63

Capítulo 1

Introdução

A cada dia aumenta o interesse da indústria automotiva, de design, de construção civil e da aviação na utilização de materiais e processos que não agridam o meio ambiente e apresentem baixo custo de produção e reciclagem. Neste contexto, ampliam-se as pesquisas sobre aplicação de fibras de reforço de origem natural em substituição das fibras artificiais como, a fibra de vidro, fibras de carbono e de aramida.

Como esses biocompósitos nem sempre apresentam propriedades mecânicas adequadas para o tipo de utilização desejada, tem-se estudado também os compósitos híbridos, formados com fibras de reforço ou matrizes diferentes, de modo a melhorar as propriedades mecânicas do produto.

Entre os compósitos híbridos com fibras de reforço de origem vegetal, observou-se um movimento mundial na produção de compósitos híbridos interlaminares, com a sobreposição de tecidos unidirecionais de cada tipo de fibra, porém, não houve foco na produção de tecidos mistos trançados, como já acontece nas fibras artificiais, com tecidos bidirecionais de fibra de vidro + carbono ou aramida + carbono, por exemplo.

Está pesquisa desenvolveu compósitos híbridos naturais em matrizes poliméricas epoxídica, tendo como principal foco a utilização de lâminas hibridas de reforços trançados entre si e estudar suas características mecânicas. Estes estudos são relevantes pois estas fibras apresentam uma densidade mais baixa e, em diversos casos, apresentam resistências equivalentes ou maiores que as apresentadas por fibras sintéticas. Essa característica as torna desejáveis em aplicações onde baixo peso e alta resistência são essenciais. Para tal, produziu-se mantas de tecidos híbridos bidirecionais. Foram utilizadas as fibras de curauá, rami, juta, sisal e vidro. Sendo a juta o material base onde as outras fibras serão trançadas. Para fins de comparação um

compósito de juta + fibra de vidro será utilizado como referência, e todos os compósitos utilizarão a mesma resina e processos semelhantes de produção. Desta forma, fibras naturais com propriedades mecânicas próximas e baixa absorção de água vão ser combinadas, para a fabricação de novos compósitos híbridos do tipo: Juta, juta + sisal, juta + rami, juta + curauá e juta + fibra de vidro.

1.1. Motivação

Conforme mostra a Figura 1, o uso de materiais compósitos com reforços fibrosos tem crescido ao longo da história e de forma cada vez mais acentuada, em atendimento a um mercado consumidor ávido por materiais mais leves e eficientes.

Esse consumo vem acompanhado de problemas, como o gasto energético para produzir estas fibras e seu eventual descarte, sendo as fibras mais comuns as de carbono e vidro, ambas sintéticas. As fibras sintéticas apresentam um elevado gasto energético de produção e de descarte e assim se tornam um problema para um mundo com uma crescente mentalidade ecológica.

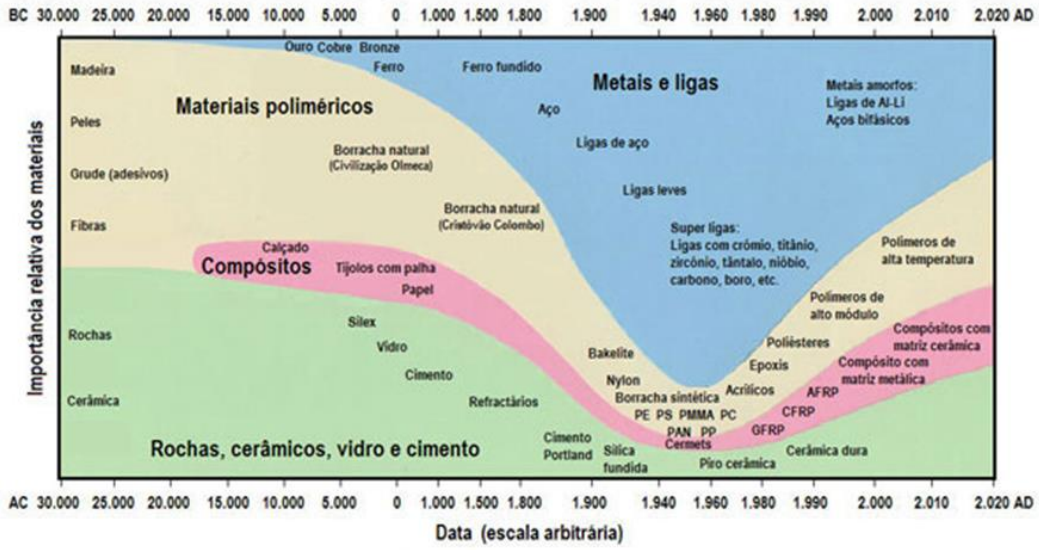


Figura 1: Importância de materiais ao longo do tempo.

Fonte: ctborracha.com, 2016.

Com características como baixa densidade e produção através de processos naturais e renováveis as fibras naturais são uma alternativa às fibras sintéticas, e em especial às fibras de vidro.

Já no ponto de vista ambiental e econômico, compósitos naturais apresentam aproveitamento integral das suas fibras, e possuem valor de mercado extremamente baixo quando comparados aos materiais concorrentes. Sua confecção é simples e barata, gerando um produto final de custo baixo e grande capacidade competitiva, apresentando assim, um grande atrativo econômico para implantação de indústrias locais.

Neste contexto, esta pesquisa visa estudar as propriedades mecânicas de compósitos híbridos com reforços naturais e compara-los aos compósitos sintéticos, nominalmente compósitos reforçados com fibra de vidro, com o intuito de expandir suas possíveis aplicações.

1.2. Objetivos geral e específicos

O objetivo principal desta pesquisa é levantar as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos reforçados pelas fibras naturais e sintéticas já citadas e comparar os resultados obtidos com os dados dos compósitos reforçados com fibra de vidro.

Os objetivos específicos são os seguintes:

•. Caracterizar os compósitos híbridos sem e com tratamento químico;

•. Analisar a superfície de fratura dos compósitos híbridos;

•. Comparar os resultados experimentais com analíticos;

•. Comparar as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos com compósitos reforçados com fibra de vidro;

1.3. Metodologia

Para se cumprir os objetivos desse trabalho foi realizado um estudo sobre os principais fatores que interferem nas propriedades mecânicas dos compósitos híbridos. Primeiro se determinou a resistência de cada elemento, fibras e resina. Foram selecionadas três fibras comumente encontradas no Brasil: a juta, o rami e o curauá, e uma fibra de vidro comercial como meio de comparação. Em todos os casos, como matriz, foi utilizada uma resina epóxi bi componente.

O segundo passo foi determinar o tipo de laminação a ser empregado. Os trabalhos encontrados na literatura apresentam um foco especial para dois tipos de organização, interlaminar diferentes: uma com camadas unidirecionais de fibras longas e outra com fibras curtas em uma disposição randômica.

Este trabalho estudou uma organização alternativa: a configuração intralaminar. Nesta configuração tecidos híbridos formados por 60% de juta e 40% das demais fibras foram fabricados. Este tecido usa como base uma manta de juta bidirecional e as outras fibras são costuradas em um único sentido, por entre as tramas da manta de juta.

As mantas foram submetidas a três condições: Não tratada, alcalina e mista. Onde o não tratado são as mantas apenas lavadas, alcalino são as mantas submetidas ao tratamento alcalino de NaOH e o misto será o tratamento alcalino seguido de um tratamento de silano.

Com estas mantas hibridas foram fabricados os compósitos. Nessa fabricação empregou-se um molde metálico e uma prensa hidráulica com placas aquecidas. As placas resultantes foram usinadas para produzir os corpos de prova de acordo com as normas de referência.

Para determinar as propriedades mecânicas de cada compósito são necessários alguns ensaios, sendo eles:

- Ensaio de Tração - Determinação das propriedades de tensão máxima a tração.

- Ensaio de Flexão em 3 pontos - Necessário para a determinar tensão de resistência à flexão.

- Ensaio de Impacto – Determinar a capacidade do material de absorver

energia a impactos.

- Análise Morfológica - A mecânica da fratura dos compósitos híbridos estudados e a morfologia da superfície da fratura revelam os modos de falha e suas características. Para tal fim se fará uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

- Estudos analíticos também foram feitos usando os seguintes métodos: Regra das misturas (ROM), regra das misturas modificado (ROMM) e Chamis. Esses modelos serão usados para se determinar se é possível prever as resistências a tensão dos compósitos e determinar quais métodos são os mais indicados.

1.4. Organização do trabalho

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos, incluindo o capítulo de introdução, sendo eles:

- Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os compósitos híbridos e os componentes que os integram, incluindo suas vantagens, desvantagens e características.
- No capítulo 3 são apresentados os métodos e equipamentos utilizados na obtenção das características mecânicas dos compósitos híbridos estudados.
- No capítulo 4 são apresentados todos os dados obtidos durante a pesquisa. Comentários e discursões sobre os dados também são colocados nesta seção.
- O capitulo 5 aborda as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo faz uma referência a todos os conceitos necessários para um melhor entendimento do contexto deste projeto e as premissas que foram utilizadas.

2.1 Materiais compósitos

JAUHARIA (2015) *et al*, referem que compósitos são materiais com dois ou mais elementos diferentes, tanto fisicamente quanto quimicamente, compondo uma estrutura macro, onde uma das partes age como agente de união e transição das solicitações para os componentes reforço. Essa união confere ao produto final propriedades mecânicas superiores as encontradas nos materiais que lhe constituem.

Os compósitos podem ser classificados de acordo com os elementos que os compõe. A Figura 2 mostra como eles podem ser classificados pelo tipo de elemento de reforço.

Reforços particulados são reforços de diâmetro reduzido que são misturados na matriz com objetivo de modificar suas propriedades mecânicas, como elasticidade, tenacidade e absorção de humidade. Outros tipos de particulados são utilizados para adicionar ou mitigar características a compósitos, como exemplo podemos citar partículas termo expansíveis ou nano partículas de cortiça (BARBOSA, 2017; BANEA, 2018).

Reforços fibrosos consistem na adição de fibras em uma matriz com o intuito de melhorar suas propriedades, estas fibras podem ser longas ou curtas. As fibras melhoram significativamente as propriedades mecânicas.

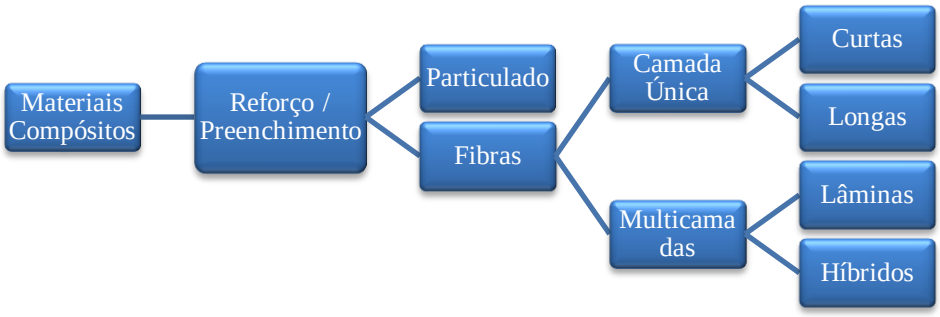


Figura 2: Classificação dos compósitos em relação ao tipo de reforço.

2.2.1. Processos de fabricação de compósitos

Existem vários métodos de se fabricar compósitos, estes variam de acordo com sua complexidade e tipos de reforços usados. Dentre os mais comuns podemos ver na Tabela 1.

Tabela 1: Processo de fabricação de compósitos com matrizes poliméricas (modificado de GIBSON (2011).

Processo	Tipo de reforço			
	Fibra longa	Fibra curta	Mantas	Híbrido
Hand lay-up		X	X	
Spray-up		X		
Autoclave	X		X	X
Moldagem por compressão	X	X	X	X
Enrolamento	X			
Pultrusão	X		X	
Reinforced reaction injection molding (RRIM)		X		
Infusão de resina	X	X	X	X

O método de *Hand lay-up* é o mais simples e o mais utilizado em ambientes de baixa produção ou com peças com formatos grandes e/ou complexos. Este processo usa um molde aberto onde a manta (formado por fibras continuas ou curtas) é colocada sobre o molde, após isso a resina é derramada sobre essa superfície onde um rolo, em geral metálico ou plástico, é usado para uniformizar a superfície e remover excesso de resina. O *Spray-up* é idêntico ao método anterior, mas um spray é utilizado para espalhar uma mistura de resina liquida e fibras curtas soltas. Esse processo é muito comum em aplicações veiculares e navais.

Um grande avanço foi a criação de lâminas compósitas pré-impregnadas, ou *prepregs*. Essas lâminas são compostas de uma manta com fibras de reforço já impregnadas com uma resina. Essa resina pode ser ativada de diversas maneiras, sendo a mais comum a temperatura e pressão. Esses pré-impregnados facilitam e agilizam o processo de *Hand lay-up*.

O uso de prensas e outras maquinas de compressão auxiliam e melhoram a qualidade dos compósitos fabricados pelos métodos já citados. Com o uso de prensas e moldes esse método usa pressão hidrostática para estourar e expulsar bolhas e auxiliam na molhabilidade de todas as fibras, reduzindo a incidência de vazios. Prensas com

placas aquecidas também são muito usadas, pois estas reduzem o tempo de cura e aumentam a resistência final dos compósitos, de acordo com as recomendações de uso da matriz.

O *vacum-bag* é um método que pode ser usado sem a necessidade de uma autoclave. O processo de fabricação consiste no *Hand lay-up* das fibras e matriz dentro de um molde. Este molde é fechado com um filme plástico. Uma bomba de vácuo é utilizada para remover gazes contidos dentro do molde, este processo garante uma relação melhor entre matriz e reforço e uma grande redução de defeitos, em especial bolhas e problemas de mobilidade. O maior problema é o tempo de cura e a pressão aplicada é menor que na autoclave.

O processo de autoclave é amplamente usado na indústria, em geral em conjunto com *vacum-bags* e *prepregs*. A autoclave usa uma câmara onde pressão e temperatura são aplicados ao compósito não curado (fibra de reforço + matriz) dentro de um *vacum-bag*. *Vacum-bag* consiste em cobrir a fibra e matriz contidos em um molde com um filme plástico e todo o ar é removido com o uso de uma bomba de vácuo. A maior desvantagem deste método é a autoclave em si, as autoclaves são grandes e caras.

O método de enrolamento consiste em aplicar fibras longas e continuas impregnadas com resina em um molde em rotação. Esse processo é altamente automatizado, onde o ângulo de aplicação e tensão são controlados, resultando em um compósito com alta densidade de fibra e, consequentemente, alta resistência. Esse processo é limitado a pecas que possam ser revolucionadas.

Reinforced reaction injection molding (RRIM) é um método que consiste em injetar fibras curtas cortadas misturadas a resina dentro de um molde sob alta pressão. A cura se dá sob temperatura e é considerado um processo rápido. A desvantagem deste processo é o uso de fibras curtas, reduzindo a resistência do compósito final.

A pultrusão é outro método altamente automatizado com grande volume de produção. Este processo consiste em puxar uma mistura de fibra continua e matriz através de um molde/die aquecido, formando uma viga estrutural no formado do die. Este processo é limitado por sua limitação na complexidade das peças e problemas de adesão após fabricação, devido ao uso de desmoldantes durante o processo de fabricação.

Esses são alguns dos métodos mais usados, mas existem muitos outros que

variam de funcionalidade e resultados (GIBSON, 2011).

2.2.2. Aplicação de compósitos

Os materiais compósitos são utilizados em uma gama de aplicações, em especial podemos citar as industrias navais aeronáuticas, bélicas, automotivas, civil e esportes, tornando-se parte de nossas vidas. Das industrias citadas a que mis tem investido nessa tecnologia é a aeronáutica, seguida da automotiva. A indústria aeronáutica depende desses materiais para desenvolver veículos mais eficientes e eficazes. A necessidade de um veículo leve e com superfícies lisas (a fim de se reduzir arrasto) empurrou o desenvolvimento e a utilização desses materiais, em especial pela aviação militar. O uso inicial se limitou a superfícies pequenas e não estruturais, mas com o avanço da tecnologia de materiais e anos de estudo os compósitos esses já compõem mais de 50% de aeronaves comerciais (GIBSON, 2011).

Os compósitos também têm sido amplamente utilizados em equipamentos esportivos. Em competições de alto desempenho vemos a utilização de compósitos em:

- Equipamentos de proteção - Como capacetes, joelheiras, ombreiras e caneleiras.
- Equipamentos de competição – Como barcos a vela e motorizados, bicicletas leves para corridas, skis, raquete de diversos esportes, tacos de golfe, tiro olímpico, varas para salto e etc.

Esses setores sempre buscaram materiais leves e duráveis. Mas nos últimos anos vemos um movimento para materiais que também seja renováveis ou recicláveis. Sendo assim o uso de novos compósitos com fibras naturais se faz de grande interesse para as indústrias do futuro (PICKERING, 2016).

Dentre os usos já citados os compósitos naturais têm grande aplicabilidade em todos os setores industriais. Eles já têm sido usados na indústria civil como elementos de reforço em estruturas de concreto e elemento de reparo, e na indústria automotiva como painéis internos e elementos não estruturais (PANTHAPULAKKAL, 2005, *et al.*). Em produtos de consumo as fibras têm ganhado espaço no setor de mobilhas e veículos de passeio como bicicletas e skates.

2.3. Fatores que influenciam a resistência dos materiais compósitos

As propriedades mecânicas dos compósitos dependem de vários fatores. A sua característica anisotrópica e dependência das condições ambientais, tanto durante a produção quanto ao ambiente de trabalho, são fatores que poderão alterar suas propriedades finais.

As fibras de reforço e a matriz são de extrema relevância. As características desses elementos já foram citadas em capítulos anteriores.

2.3.1. Fibras

Fibras de reforço pertencem a duas grandes famílias, as fibras sintéticas e naturais, dentro destas famílias é possível subdividi-los novamente, como visto na Figura 3. As fibras sintéticas apresentam uma excelente relação peso resistência, quando comparado com elementos metálicos. De acordo com PICKERING (2016) *et al.* das fibras naturais as de origem vegetal são mais interessantes devido a sua baixa toxicidade e boa relação peso por resistência. As fibras animais foram descartadas nesta pesquisa pois apresentam propriedades mecânicas mais baixas que as encontradas nas fibras vegetais. As fibras minerais, em sua maioria, foram banidas de muitos países por serem cancerígenas.

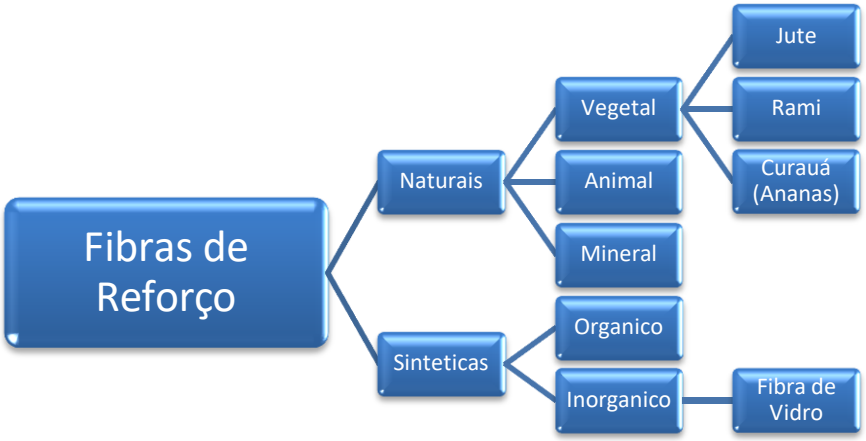


Figura 3: Tipos de fibras, com foco nas utilizadas, rami, juta, curauá e fibra de vidro.

2.3.2. Fibras vegetais

As fibras vegetais têm ganho muito espaço na indústria como um todo, mas em especial podemos citar na área de construção civil e automotiva (JAWAID e ABDUL KHALIL, 2011; JOHN, 2008; JAUHARI, 2015; ZAH, 2007), onde estas fibras substituem as sintéticas como elementos de reforço (PICKERING, 2016). As vantagens dessas fibras não se limitam a apenas seu custo e abundancia, há também o fator ecológico e energético, como visto na Figura 4, que elevam essas fibras sobre as sintéticas e como visto por JAUHARI (2015) *et.al*, estas tem apresentado resultados mecânicos próximos das fibras de vidro.

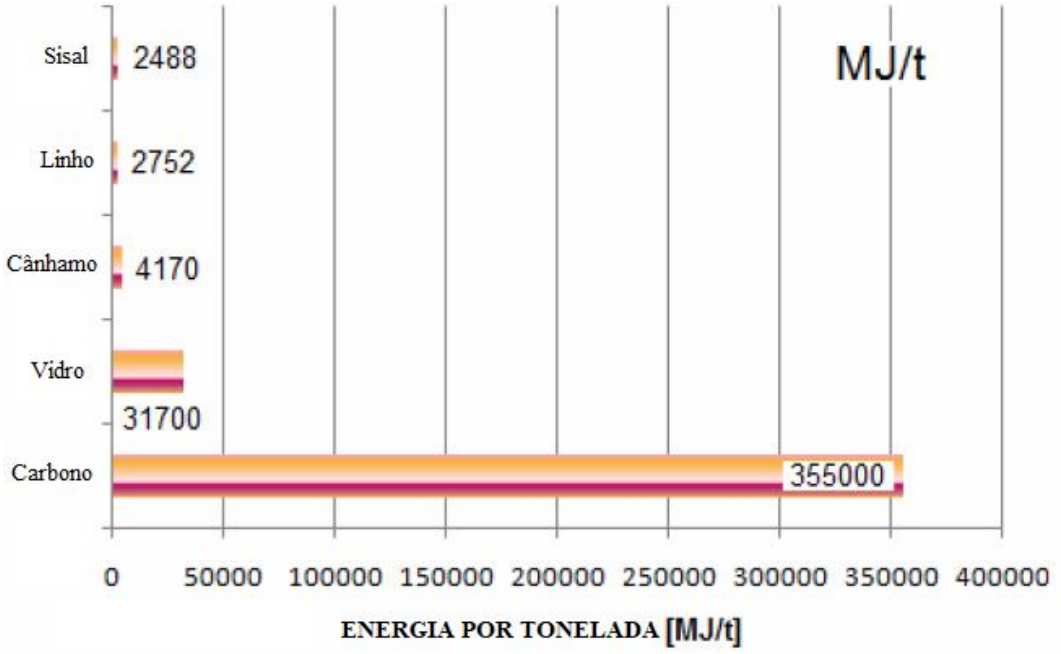


Figura 4: Gasto energético necessário para produzir uma tonelada de material.

Fonte: Modificado de (JAUHARI, 2015)

As propriedades das fibras vegetais variam de acordo com sua origem. Cada fibra pode ser extraída de uma parte especifica da planta, caule, folhas e etc. e o conteúdo de lignina, celulose e hemicelulose são fatores que determinam a características da fibra. Cada elemento varia de acordo com a idade, método de extração e origem da fibra. PEREIRA (2015) *et al.* citam a importância da lignina como principal fator que determina a resistência a impacto e compressão.

No entanto as fibras naturais apresentam desvantagens intrínsecas. Dentro dessas desvantagens podemos citar a sua alta absorção de humidade, variação de propriedades em função das condições atmosféricas e dificuldades de interação entre fibra e matrizes epoxidicas, entre outros. Essas desvantagens podem e tem sido contornado através de tratamentos químicos ou físicos (GOMES, 2007; PICKERING, 2016; GURUNATHAN, 2015).

As fibras naturais são importantes para o Brasil, sendo ele um dos grandes produtores deste tipo de fibra do mundo, a Figura 5 apresenta a produção brasileira de fibras naturais. Com o aumento da utilização destes compósitos o Brasil pode expandir

e variar seus produtos de exportação e reduzindo a dependência da importação de fibras sintéticas e reduzindo sua pegada ecológica (SILVA, 2009, *et al*).

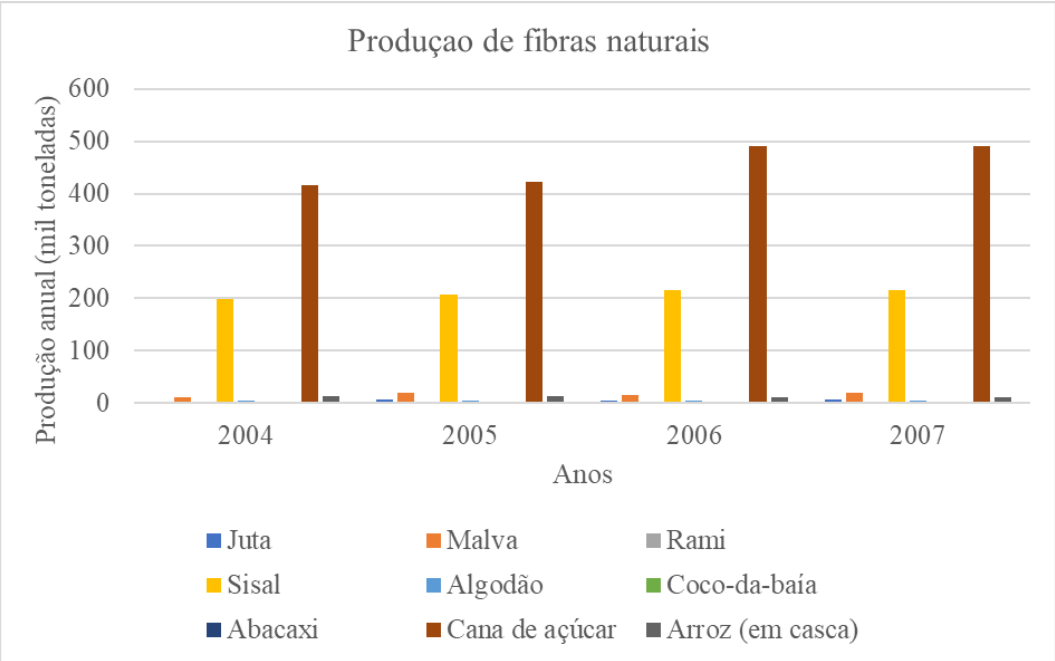


Figura 5: Produção Brasileira de fibras naturais.

Dentre das fibras naturais mais comuns no mercado podemos citar a juta, rami, sisal e curauá. Estas fibras apresentam boa relação de resistência, peso e preço. As propriedades das fibras podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2: Dados das fibras (MARINELLI, 2008, *et al.*)

Fibra	Densidade (g/cm^3)	Alongamento (%)	Tensão na ruptura (MPa)	Modulo de Young (GPa)
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Rami	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Sisal	1,5	2,0-2,5	5511-635	9,4-22
Curauá	1,4	4,2	890-4.200	50,4

2.3.3. Resinas

Há diversos tipos de resinas que podem ser utilizadas, Figura 6. As resinas naturais, ou eco-resins, apresentam uma melhor interação ente matriz e reforço, quando este é de origem vegetal. No entanto as matrizes epoxidicas, em média, apresentam propriedades mecânicas melhores que as encontradas nas resinas naturais, resultando em compósitos com melhores propriedades mecânicas, mesmo quando comparados a compósitos com fibras e matrizes naturais (GURUNATHAN, 2015).

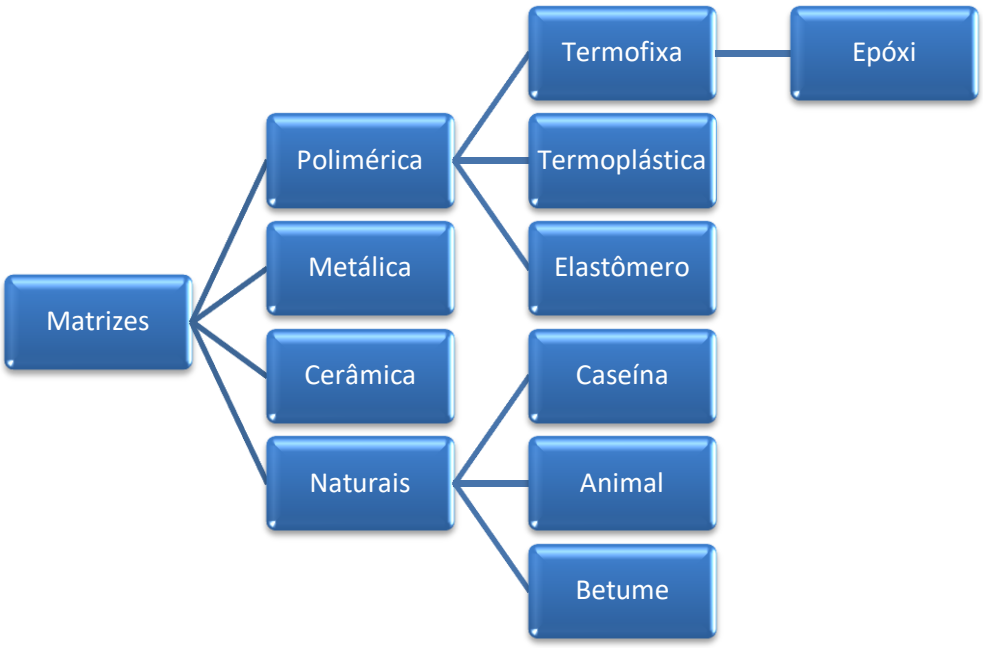


Figura 6: Classificação dos tipos de matrizes.

2.3.4. Sequência de disposição de camadas de reforço no compósito

A sequência de disposição das camadas de fibras é relevante pois através dela é possível modificar as características dos compósitos. A manipulação desse fator pode

conferir a um compósito com o mesmo número e tipo de reforços características diferentes (SWOLF ,2014).

Como exemplo podemos citar ABD EL-BAKY (2017) que estudou os compósitos híbridos de juta + fibra de vidro + fibra de carbono. Neste estudo ele identificou que as propriedades a tração do compósito não variavam de acordo com a sequência de lâminas, mas quando testados a flexão a ordem teve grande efeito, onde a melhor condição encontrada foi quando a fibra de maior resistência, fibra de carbono, se encontrava na superfície e as outros no núcleo.

2.3.5. Tamanho de fibra

O tamanho das fibras de reforço irá determinar a que esforços o compósito final pode ser submetido e pode determinar se ele se comporta de forma anisotrópica ou ortótropa.

Compósitos reforçados com fibras longas apresentam propriedades mecânicas maiores que as fibras curtas, como visto na Figura 7, devido a sua capacidade de distribuir de forma mais eficiente as solicitações. As fibras curtas apresentam a vantagem de serem mais fáceis de se utilizar, permitindo uma gama maior de possibilidades de aplicações na indústria e a delaminação entre camadas é um fator menos relevante.

Influencia quantitativa do comprimento de fibra.
Fibra de vidro em matriz polimérica

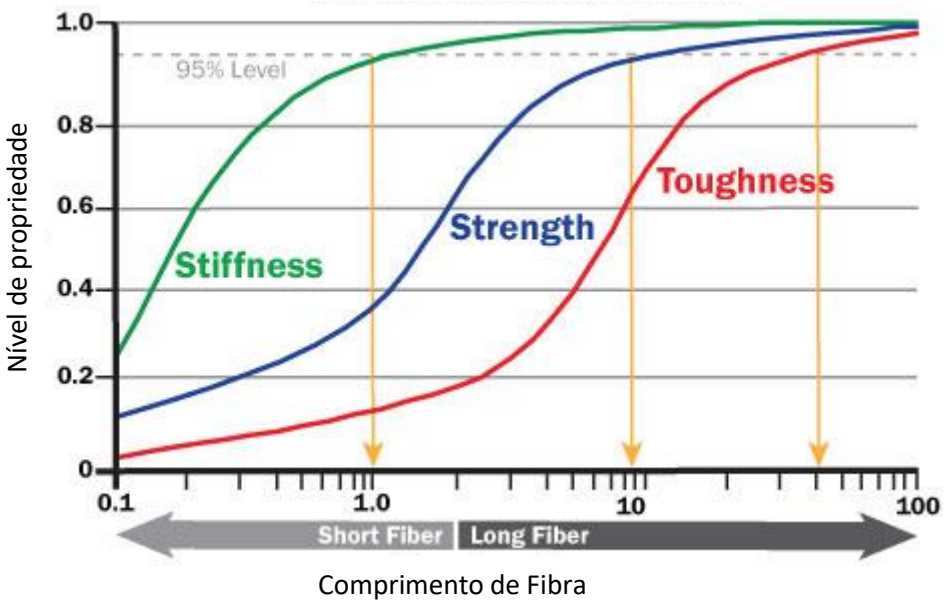


Figura 7: Relação de propriedades por comprimento de fibra.

Fonte: Modificado de plasticomp.com, (2017).

2.3.6. Tratamentos superficiais

Um dos fatores mais relevantes para se ter um compósito com boas propriedades mecânicas é uma boa adesão interfacial entre matriz e reforço. Com relação as fibras naturais e matrizes poliméricas essas propriedades são prejudicadas pelas características inerentes de cada um, em especial podemos citar as características hidrofílica das fibras e o comportamento hidrofóbico das matrizes poliméricas.

Outro fator que tem grande impacto nas interações fibra/matriz é a molhabilidade das fibras, de acordo com PICKERING (2016) *et al.* essa característica gera problemas interfaciais na forma de defeitos na interface. No entanto há maneiras de se mitigar esses problemas, como a aplicação de tratamentos químicos superficiais.

Esses tratamentos têm como objetivo alterar a morfologia da fibra aprimorando sua capacidade de interagir com a matriz resultando em um compósito com melhores propriedades mecânicas. Os tratamentos mais comuns encontrados na literatura podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3: Tipo de tratamentos químicos

Tipo de tratamento	Processo	Objetivo
Lavagem	Lavar fibras em água, corrente ou mergulhar (Limpa ou destilada)	Remover ceras, gorduras e outras impurezas presentes nas fibras
Alcalinização ou mercerização	Imersão das em soluções básicas (NaOH) com concentrações entre 2 a 6%	Melhorar interação fibra/matriz através do aumento da rugosidade expondo partes orgânicas das fibras
Silanização	Aplicação de compostos de silício 2% (Xiameter OFS 6040 – pH = 5.0)	Melhorar compatibilidade fibra/matriz, tornando as hidrofóbicas
Plasma	Uso de eletrodos de alta frequência ou micro-ondas	Modificar a superfície da fibra, aumentando a rugosidade

Fonte: (ALBINANTE, 2013; NUNNA, 2012).

Dos tratamentos apresentados os mais eficazes e práticos, de acordo com ALBINANTE (2013) *et al.* e NUNNA (2012) *et al.*, são o tratamento alcalino, silanização e plasma. De acordo com TRAGOONWICHIAN (2006) *et al.* as modificações causadas pelos tratamentos químicos afetaram as propriedades dos compósitos de sisal usados.

2.4. Compósitos híbridos

Compósitos híbridos são compósitos que contém dois ou mais elementos diferentes de reforço em uma matriz. Esses compostos permitem alterar as propriedades como absorção de humidade, resistência a impacto e tração.

Como descrito por JOHN (2008) e YU (2015) *et al.* as fibras podem ser dispostas de diversas maneiras, como pode ser visto na Figura 8. Os compósitos podem ser divididos em três grandes categorias:

- Interlaminares – O compósito é laminado em camadas, cada camada é composta de um tipo de reforço.
- Intralaminares – Cada lâmina do compósito contém duas ou mais elementos diferentes tipos de reforço, como exemplo podemos citar as mantas de carbono mais fibra de vidro.
- Misturadas – Não há lâminas de elementos de reforço, as fibras são misturadas e distribuídas dentro da matriz.

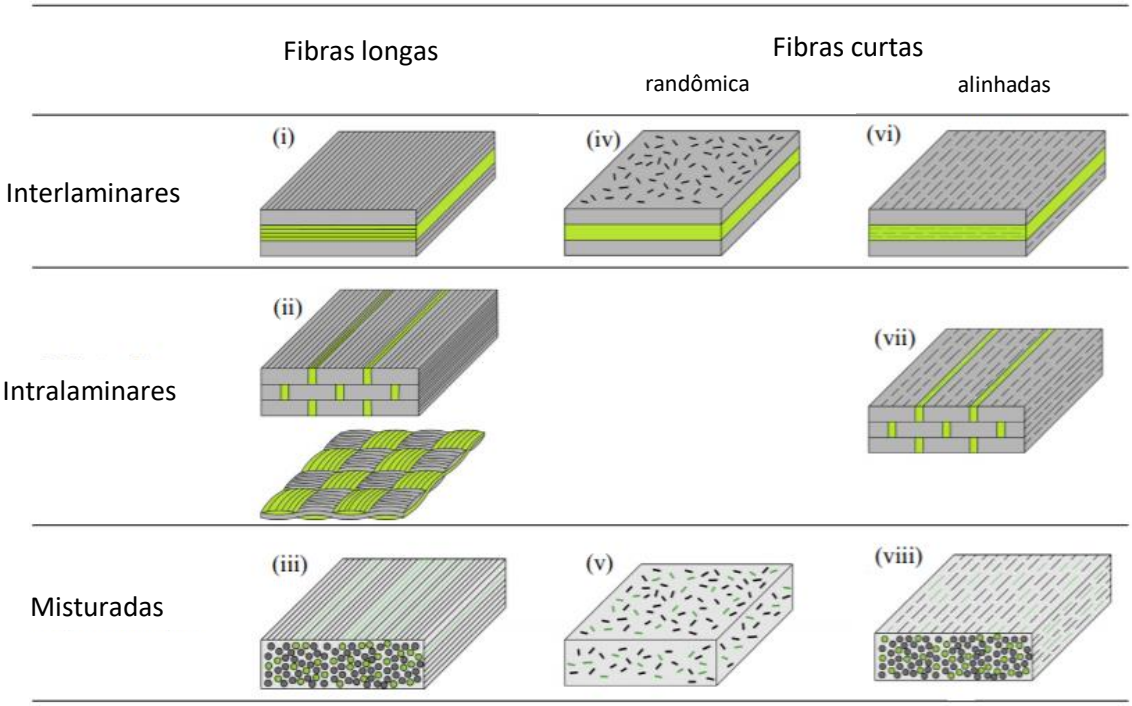


Figura 8: Configurações hibridas para reforços em compósitos.

Fonte:(YU,2015; ORNAGHI, 2011; JOHN, 2008)

Os compósitos híbridos são dependentes da quantidade de cada elemento. Conforme SWOLF (2014) *et al.* as propriedades dos compósitos híbridos variam de forma não linear. Como pode ser visto na Figura 9 a união de dois tipos diferentes de fibras, uma de baixo e outra de alto alongamento, LE e LH respectivamente. A união dessas fibras resulta num compósito com propriedades intermediarias, SWOLF (2014) *et al*.

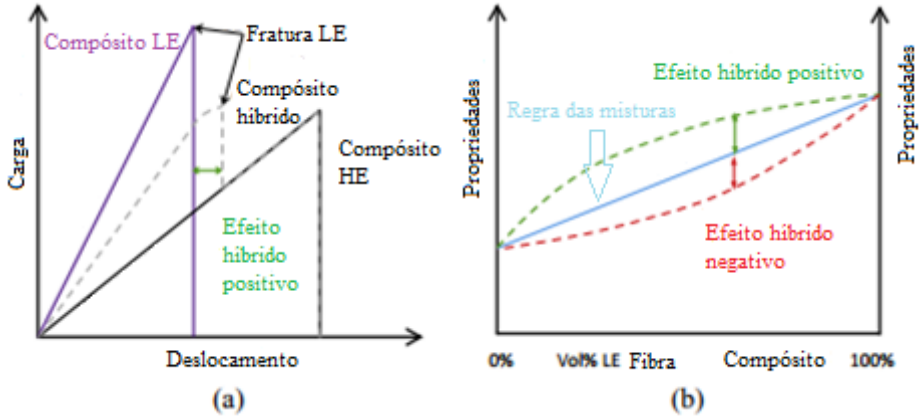


Figura 9: O efeito da hibridização em compósitos:(a). Compósito composto de 50/50% de cada elemento. (b) Efeito sobre outras propriedades mecânicas.

Fonte: Modificado de (SWOLF, 2014)

Várias pesquisas (VENKATESH, 2016; YUSOFF, 2016; ORNAGHI, 2011; FRAGASSA, 2016; RAMESH, 2013 SUDHIR, 2013; ZHANG, 2013; RAMESH, 2013; AL-MOSAWI ALI, 2012; JOHN, 2008) estudaram o efeito da hibridização nas propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras naturais.

A maioria das pesquisas relacionadas à caracterização mecânica de compósitos híbridos reforçados com fibras naturais demonstrou uma melhora nas propriedades mecânica desses compósitos, como alongamento ou resistência à flexão, quando comparados àqueles produzidos com cada fibra separadamente. Outro aspecto importante foi a influência dos tratamentos químicos superficiais nas propriedades mecânicas dos compósitos, principalmente os reforçados com fibras naturais. No entanto, os trabalhos acima mencionados foram concentrados nos estudos de compósitos interlaminares. Com a utilização de mantas intralaminares reduz-se o

número de camadas utilizadas nos compósitos e a configuração de tecelagem também altera as propriedades mecânicas do compósito, como a melhora em características como tração e propagação de trincas (JOHN, 2008; SUPPAKUL, 2002; ALIF, 1998).

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo aborda os materiais e os métodos utilizados neste trabalho.

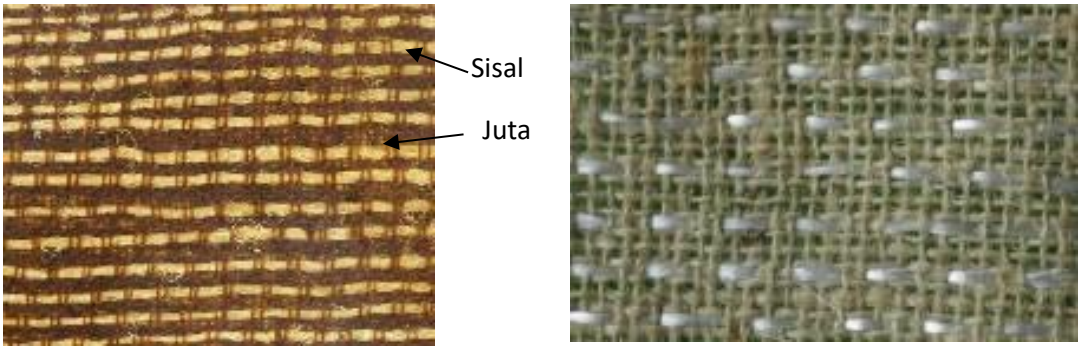
3.1 Materiais

Cinco tipos de compósitos naturais foram estudados, sendo eles: juta, juta + rami, juta + curauá, juta + sisal e juta + fibra de vidro. As fibras naturais de sisal, rami e juta foram fornecidas pela Sisalsul (São Paulo - Brasil); fibra de curauá foi fornecida pela Pematec Triangel do Brasil (São Paulo - Brasil) e a fibra de vidro foi fornecida pela Barracuda Advanced Composites (Rio de Janeiro, Brasil). O tecido bidirecional de juta foi usado como base para todos os tecidos híbridos. As outras fibras são tecidas entre os espaços encontrados no tecido de juta. Uma resina epóxi bi componente AR260 / AH260 fornecida pela Barracuda Advanced Composites, (Rio de Janeiro, Brasil) foi usada para todos os compósitos.

3.2.Produção do tecido

As fibras de reforço estão na forma de fio e foram tecidas manualmente, cada fibra de reforço foi dividida em diâmetros equivalentes e tecidas com o uso de agulhas, em um tecido bidirecional de juta, de acordo com YOUNES (2012) *et al*, configurando um tecido com padrão *twill* modificado. Esta configuração proporcionou melhor distribuição de energia reduzindo o acúmulo de energia promovido pela configuração da

costura, resultando em uma manta híbrida intralaminada com porcentagem de massa equivalente a 60% de juta e 40% de outras fibras. Este método também reduz os espaços vazios encontrados na manta de juta criando uma manta mais densa. O tecido híbrido finalizado apresenta um reforço de fibra unidirecional na direção de 0 °(Longitudinal), como visto na Figura 10.



(a) (b)

Figura 10: Padrão *twill*: a) Juta + sisal; b) juta+ fibra de vidro.

3.3.Tratamentos químicos de superfície

As mantas híbridas foram lavadas para eliminar ceras e impurezas. Em seguida, as mantas foram submetidas a dois processos distintos:

- Alcalinização - as fibras foram imersas em solução alcalina de NaOH 2% por 60 minutos;
- Tratamento misto (alcalinização + silanização) - este grupo de mantas híbridas foi submetido a um tratamento alcalino e em seguida imersos, por 60 minutos, em solução de silano a 2% (Xiameter OFS 6040 - pH = 5,0), fornecido pelo Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Nova Friburgo, RJ - Brasil.

Depois disso, as mantas foram secas em uma estufa Solab SL–104/30 a 100 ° C por 120 minutos.

3.4.Produção dos compósitos

Os compósitos foram fabricados utilizando a técnica de *Hand lay-up* com o auxílio de um molde metálico e uma prensa hidráulica. A resina epóxi, AR260 / AH260, valores apresentados na Tabela 4, foi usada para todos os compósitos em uma proporção de peso de 100 partes de resina para 26 partes de endurecedor, resultando em um composto de 30% de reforço para 70% de resina. A cura do compósito foi realizada em prensa hidráulica Solab 12/20, presente no laboratório de adesivos e compósitos do CEFET / RJ, sob temperatura de 80 ℃ por 6 horas.

Tabela 4: Propriedades resina AR260/AH260

Resistência a tração (MPa)	**Resistência a flexão (MPa)**	**Resistência a compressão (MPa)**
73	119	89

Fonte: (Barracuda, 2016)

3.5.Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados a partir de placas laminadas. As placas têm 2 mm de espessura, para tração, e 3 mm para os ensaios de flexão.

As amostras de teste foram cortadas das placas compostas. As dimensões e a geometria dos corpos de prova, conforme os padrões da ASTM, podem ser vistas na Tabela 5. Para cada condição foram fabricados, no mínimo, 5 corpos de prova.

Tabela 5: Corpos de prova e normas.

Teste	ASTM-D Norma	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento de trabalho (mm)	Configuração
Tração	638	165	19	2	60	
Flexão	790	144	15	3	120	
Impacto	6110	110	15	3	40	

3.6.Ensaios (testes)

Os testes realizados são abordados nesta seção. Os testes realizados foram: Teste de tração, flexão em três pontos, impacto e uma análise morfológica da superfície de fratura.

Após realizados os testes ferramentas estatísticas como ANOVA e testes t de Student serão realizados para se determinar se há variações significativas entre grupos,

quando necessário.

3.6.1. Ensaio de tração

O teste de tração consiste em tracionar axialmente um corpo de prova até sua ruptura, onde a carga e deslocamento são registrados durante todo o processo. Os ensaios de tração foram feitos na direção longitudinal, a 0 °, que é a principal direção da aplicação de carga.

Este processo nos fornece um gráfico de tensão por deformação de onde podemos extrais as informações de:

- Tensão máxima.
- Tensão nominal.
- Tensão de escoamento.
- Tensão de ruptura
- Módulo de Young.

A norma para este teste foi a ASTM D638, a Figura 11 apresenta um corpo de prova desta norma. O ensaio de tração foi realizado com uma velocidade de 1mm/min, utilizando uma máquina universal Instron 5966 com célula de carga de 10kN, para cada grupo foram testados um mínimo de 5 corpos de prova.



Figura 11: Corpo de prova para testes de tração, ASTM D638.

A fim de se ter um parâmetro de comparação com fibras sintéticas a fibra de vidro foi utilizada, atendendo as mesmas dimensões totais dos compósitos de fibras naturais.

3.6.2. Ensaio de flexão de três pontos

Para se determinar as características a flexão do compósito utilizou-se um ensaio de três pontos. Este ensaio consiste em apoiar o corpo de prova entre dois apoios afastados entre si e aplicar, de forma gradual uma carga perpendicular à superfície.

Para este teste a norma ASTM D790 foi utilizada onde velocidade de teste foi de 2mm/min e com uma relação de profundidade por comprimento de 40:1. O teste deve ser parado quando o corpo de prova romper ou a deformação máxima atingir 5%.

A resistência a flexão pode ser determina através das equações:

$$\sigma = 3\mathrm{FL}/2\mathrm{bd}^2 \qquad (1)$$

$$E_B = \mathrm{L}^3\mathrm{m}/4\mathrm{bd}^3 \qquad (2)$$

Onde: σ é a tenção nas fibras nas superficies, (MPa), E_B corresponde ao modulo de elasticidade (MPa), F é a carga máxima (N), L é o comprimento entre apoios (mm), b é a largura (mm), d representa a espessura (mm), e “m” é a inclinação da parte linear da curva. A distância entre os pontos de apoio foi de 120mm como pode ser visto na Figura 12, a velocidade do teste foi de 1mm/min com uma célula de carga de 1kN. Foram testados, para cada condição, um mínimo de 5 corpos de provas. Os testes foram interrompidos quando o corpo de prova falhou ou o limite da máquina foi atingido.

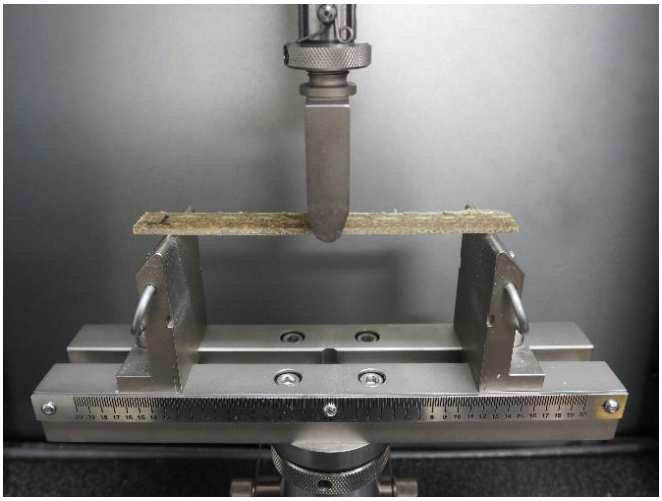


Figura 12: Configuração do teste de flexão.

3.6.3. Impacto

Para avaliar a absorção de energia dos compósitos híbridos, os testes de impacto foram realizados de acordo com o método de teste ASTM 6110. A máquina de teste do pêndulo Wolpert tem capacidade para 60 toneladas e está posicionada de acordo com a Figura 13. Os testes de charpy para este caso não precisa de uma endentação, uma vez que esta afeta o teste. Foram testados, para cada condição, um mínimo de 5 corpos de provas.

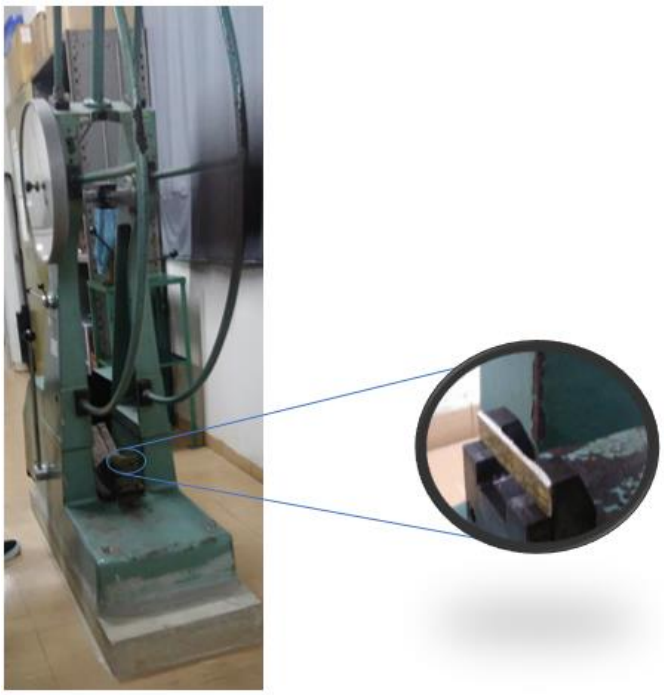


Figura 13: Amostra de juta+sisal na máquina de impacto.

3.6.4. MEV

A morfologia de uma superfície de fratura pode revelar muitas informações sobre a interação dos reforços e a matriz além de definir como a mecânica da fratura ocorre neste compósito.

Para tal fim usou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde analisamos a superfície da fratura dos corpos de prova, após os testes de tração e flexão.

O MEV necessita de uma amostra condutora, caso contrário o feixe de elétrons acelerados pode danificar o material estudado, logo é necessário recobrir a amostra com uma fina camada de material condutor, no caso deste estudo usou-se platina e uma fita dupla face de carbono.

A análise de MEV foi realizada na superfície de fratura de amostras de tração utilizando uma Microscopia Eletrônica de Varredura de alta resolução, FEI Inspect com uma aceleração de tensão de 20 KV ligada ao laboratório de caracterização de Nanotecnologia do Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro – Brasil.

3.7.Maquinário

Os testes foram realizados com uma máquina de ensaios Instron 5966 com uma célula de carga de 10kN. Os ensaios mecânicos foram feitos no laboratório de compósitos e adesivos (LADES) do CEFET/RJ, Figura 14b.

O MEV utilizado e as imagens foram obtidas com o auxílio do laboratório de caracterização de Nanotecnologia do Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro – Brasil., Figura 14a.



(a)



(b)

Figura 14: (a) Microscópio eletrônico de varredura (MEV), FEI Inspect
(b) Máquina de teste universal Instron 5966.

3.8. Estudos analíticos

Neste trabalho, três modelos analíticos diferentes foram utilizados para determinar teoricamente as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos: regra das misturas (ROM), regra de misturas modificadas (ROMM) e modelo semi-empírico de Chamis.

A ROM é um bom método analítico para predição de propriedades em compósitos e plásticos não híbridos, mas este método não pode prever com precisão propriedades em compósitos híbridos (YOUNES, 2012; WANG, 2017). Muitos estudos teóricos foram realizados para desenvolver melhores modelos micromecânicos. o ROMM também foi utilizado, uma vez que este método corrige o modelo ROM com a introdução de fatores de correção para explicar outras propriedades do material, YOUNES (2012) *et al*. Devido à natureza não linear do crescimento de características mecânicas em compósitos híbridos, o uso de outros métodos, como o modelo semi-empírico de Chamis, é recomendado (WANG, 2017; CHAMIS, 1989). Neste trabalho a característica mecânica que será obtida através destes métodos será a resistência à tração, todos os outros dados necessários foram obtidos por métodos experimentais.

Como é comum para esses tipos de abordagem micromecânica, todos os métodos consideram que as fibras e a matriz são linearmente elásticas, isotrópicas e homogêneas, não há vazios na matriz e a adesão interfacial entre fibra / matriz é perfeita.

3.8.1. ROM

A regra da mistura utiliza uma abordagem micromecânica para prever a rigidez dos compósitos e é amplamente usada devido à sua simplicidade e razoável precisão de resultados.

As seguintes equações são extraídas do modelo GHAFAAR, (2006) *et al*:

$$E_c = fE_f + (1-f)E_m \tag{3}$$

$$f = \frac{V_f}{V_f + V_m} \tag{4}$$

$$\sigma_c = \sigma_f \varphi_f + \sigma_m\left(1 - \varphi_f\right) \tag{5}$$

Onde f representa um valor equivalente para o volume da fração das fibras, E_f, E_me E_c são o módulo de elasticidade longitudinal das fibras, matriz e compósito,

respectivamente. V_f, representa o volume de fibra e V_m representa a fração de volume da matriz.

3.8.2. ROMM

Geralmente, o método ROMM determina dois módulos de elasticidade associados ao compósito. O primeiro (E_c) está alinhado com as direções de carregamento e representa o módulo de elasticidade da fibra; o segundo módulo de elasticidade (E_g) é associado à direção de carregamento transversal e às deformações na matriz, que é uma abordagem isostress.

No caso de compósitos híbridos, com mais de uma fibra de reforço, o segundo módulo de elasticidade é menor que o módulo de elasticidade dos dois ou mais tipos de fibras de reforço usadas para produzir o compósito.

As propriedades mecânicas dos compósitos híbridos podem ser determinadas com base nas seguintes fórmulas:

$$E_{hl} = E_g(1 - V_m) + \left(E_c - E_g\right)V_c \quad (6)$$

$$\sigma_{hl} = \sigma_g(1 - V_m) + \left(\sigma_c - \sigma_g\right)V_c \quad (7)$$

$$\sigma_{hl} = \sigma_f\varphi_f + \sigma_m\left(1 - \varphi_f\right) \quad (8)$$

Onde σ_c, σ_g, σ_f, σ_m e σ_{hl} representam o estresse de fratura da fibra com maior tensão de fratura, a segunda maior tensão de fratura, soma de σ_c e σ_g, matriz e a tensão de fratura resultante do compósito híbrido, respectivamente. Além disso, V_m e V_c representam, respectivamente, o volume da matriz e o volume da fibra com a maior tensão de fratura.

3.8.3. Chamis

De acordo com CHAMIS, (1984) *et al.* O modelo é usado principalmente para predizer propriedades elásticas, mas pode ser usado para determinar a resistência à tração. Onde o módulo elástico dos compósitos é representado por E_{l11} para longitudinal e E_{l22} para transversal, para o módulo elástico das fibras temos E_{f22} e E_m para a matriz. k_f representa a fração de volume de fibra à qual as propriedades de constantes estão relacionadas, diferente da ROM, o k_f está em uma raiz quadrada. Para a fração volumétrica da matriz k_m é usado. G_{l12} representa o módulo elástico transversal das fibras. O S_{l11T} e G_m representa, respectivamente, a resistência ao cisalhamento longitudinal do compósito e da matriz. v_{l12}, v_{f12} e v_m representam os coeficientes de Poisson para o compósito, fibra e matriz, respectivamente. Para o modulo de cisalhamento do compósito G_{f12} é utilizado.

$$\sigma_{l11T} = \frac{S_{l11T}}{1 + \sqrt{(2\left(\frac{E_{l11}}{E_{l22}} - v_{l12}\right) + \frac{E_{l11}}{G_{l12}}}} \tag{9}$$

$$E_{l11} = k_f \times E_{f11} + k_m \times E_m \tag{10}$$

$$E_{l22} = \frac{E_m}{1 - \sqrt{k_f}\left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}}\right)} \tag{11}$$

$$S_{l11T} = k_f \times S_{fT} \tag{12}$$

$$G_{l12} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{k_f}(1 - \frac{G_m}{G_{f12}})} \tag{13}$$

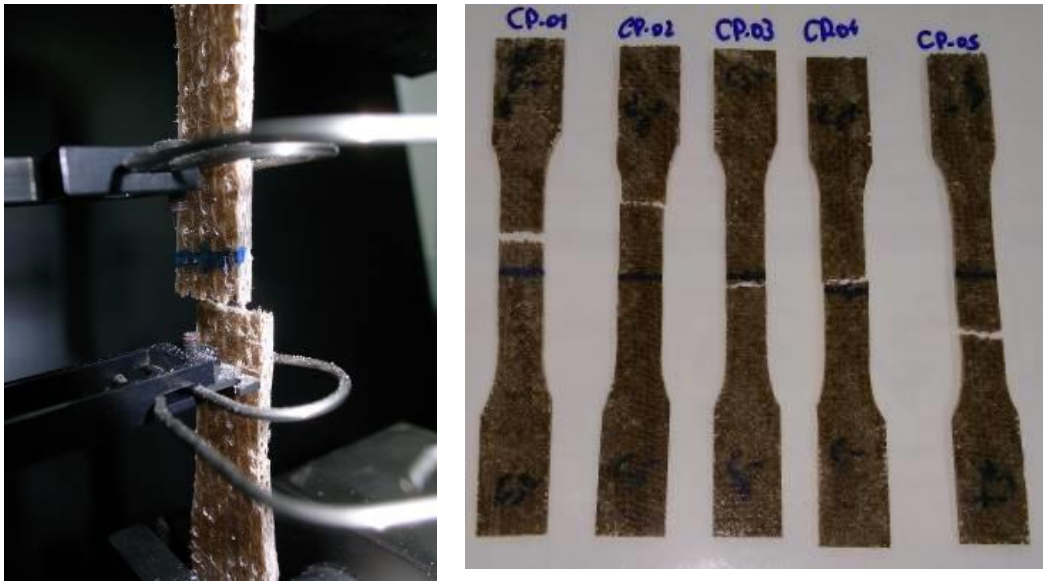
$$v_{l12} = k_f \times v_{f12} + k_m \times v_m \tag{14}$$

Capítulo 4

Resultados e discussão

4.1 Ensaio de tração

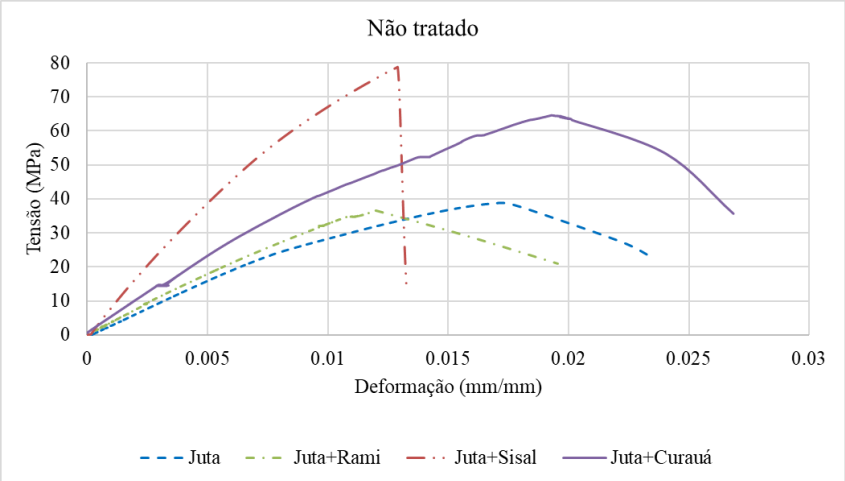
De acordo com a norma ASTM 638, apenas os espécimes que quebraram na área especificada foram considerados, como pode ser visto na Figura 15.



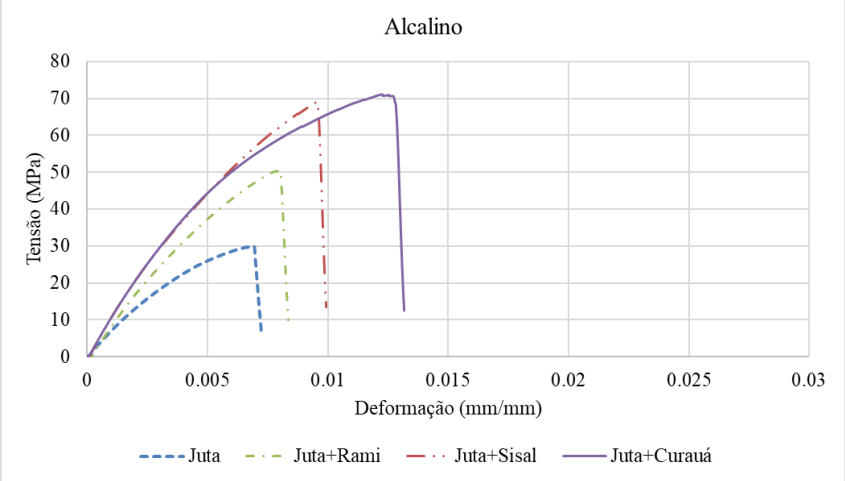
(a) (b)

Figura 15: compósito de juta + fibra de vidro (a) corpo de prova rompido (b) corpos de prova rompidos.

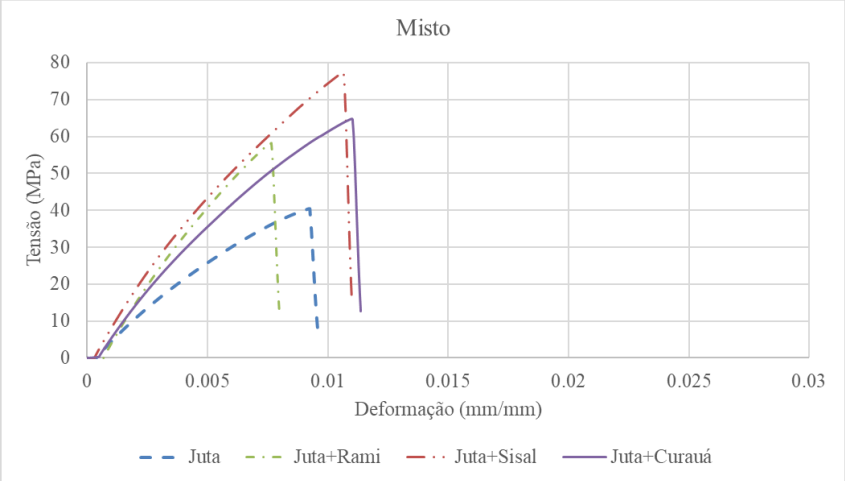
As curvas de tensão / deformação dos compósito estudados podem ser vistas na Figura 16, e os resultados médios de todos os testes de tração podem ser vistos na Figura 17.



(a)



(b)



(c)

Figura 16: Curvas de tensão / deformação para compósito (a) não tratado, (b) tratamento alcalino, e (c) tratamento misto.

Como pode ser visto na Figura 17, o processo de hibridização melhorou as propriedades de tração de todos os compósitos híbridos em comparação com o compósito simples de juta, isto é condizente com DEVIREDDY (2017) *et al.*, que estudou compósitos híbridos de juta/banana. Neste estudo os valores para a juta em tração são próximos aos encontrados neste estudo, próximos de 30MPa. Os resultados mais interessantes mostram que os compostos de juta + sisal e juta + curauá apresentam melhores propriedades de tração do que a fibra de juta + fibra de vidro. Assim, mostra que é possível obter melhores propriedades adicionando fibras naturais à juta do que adicionando uma fibra sintética, com todos os seus custos inerentes e desvantagens ambientais.

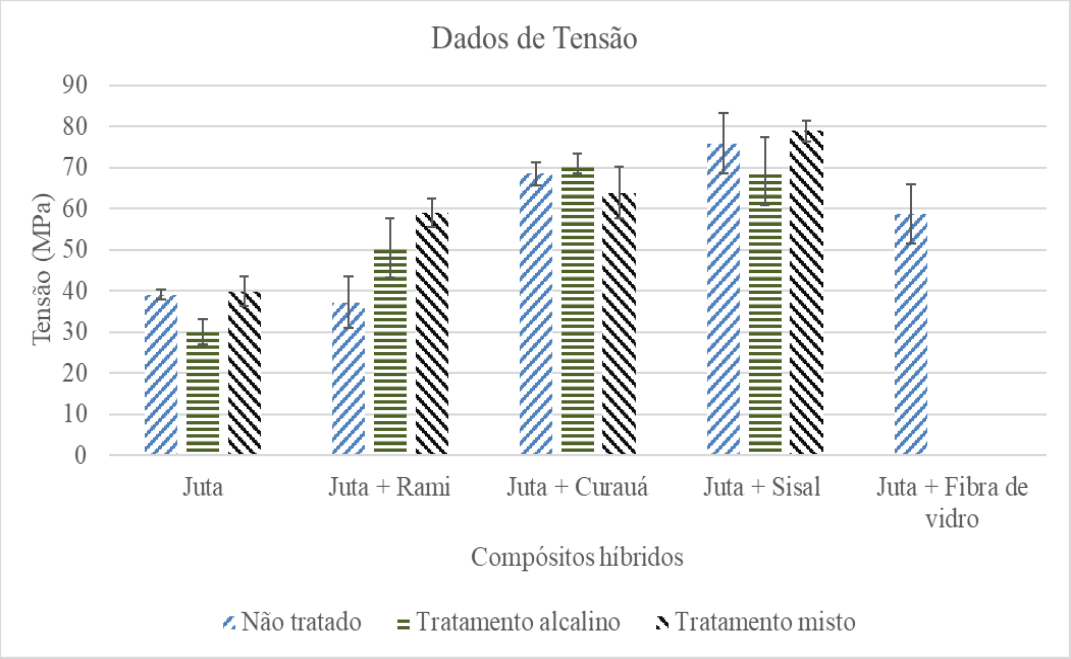


Figura 17: Tensão de ruptura dos compósitos em função do tratamento.

Os tratamentos químicos de superfície apresentam uma leve melhora na resistência à tração para a maioria dos compósitos híbridos estudados. No entanto, o composto de juta + rami mostra uma melhora significativa das propriedades de tração com os tratamentos químicos, 58% para o alcalino e 36% para o tratamento misto.

Os tratamentos químicos também afetaram o modulo de Young de todos os

compósitos, onde o tratamento alcalino apresentou os melhores resultados, com um aumento de 31%, 10%, 104% e 78% para juta, juta + sisal, juta + rami e juta + curauá, respectivamente, quando se comparadas aos compósitos sem tratamento.

A fim de se determinar se há diferença estatística entre os dados obtidos realizou-se testes ANOVA para cada grupo de compósitos (Juta, juta+rami, juta+curauá e juta+sisal). Os resultados mostram que para a juta há diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos como determinado pela ANOVA para 1 fator ($F(2,13) = 11.025$, $p = .00158$), o mesmo vale para o compósito de juta+rami ($F(2,13) = 4.744$, $p = .00283$). Já para os compósitos de juta+curauá e juta+sisal não há diferenças estatísticas significantes entre os tratamentos como pode ser visto pela ANOVA para 1 fator, ($F(2,13) = 1.0811$, $p = .0368$) e ($F(2,12) = 3.277$, $p = .00732$) respectivamente.

O tratamento misto também apresentou uma melhora no modulo de Young dos compósitos, como pode ser visto na Figura 18, com 29%, 87% e 28 para os compósitos de juta, juta + rami e juta + curauá respectivamente. A juta + sisal foi o único que apresentou uma queda de 11%.

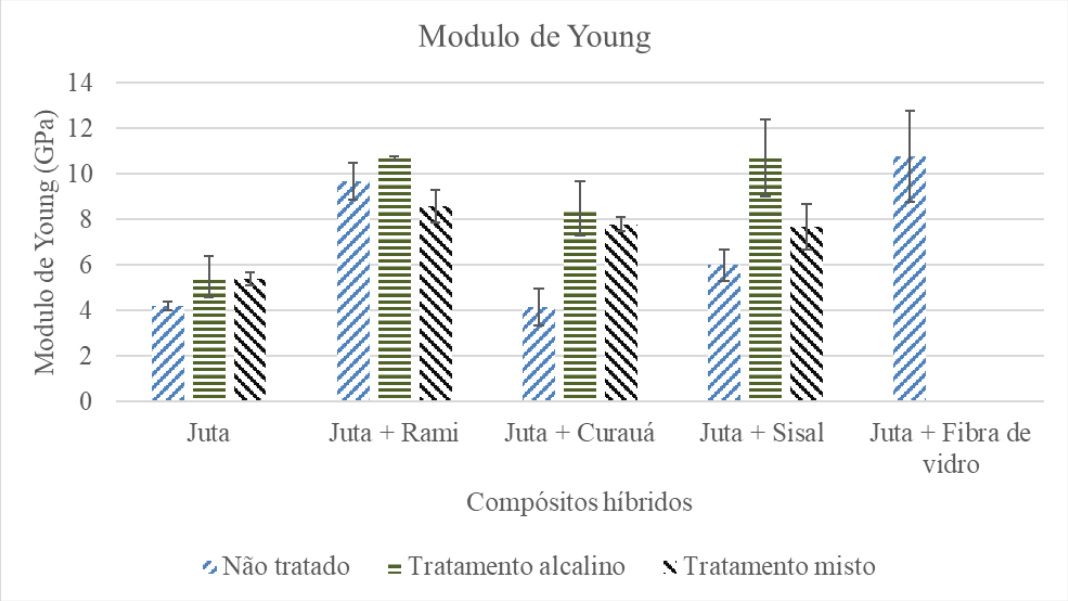


Figura 18: Dados de modulo de Young.

Quando se comparado a juta + fibra de vidro todos os compósitos apresentaram

valores mais baixos, sendo que os compósitos de juta + sisal e juta + curauá apresentaram valores muito próximos, uma diferença de 1%.

Com quanto ao alongamento as alterações foram significativas quando se comprando os dados dos compósitos não tratados com os tratados. Pode-se ver que houve uma redução de 66 e 63% para o compósito de juta alcalinizado e misto, respectivamente, quando comparado com a juta não tratada. Para os compósitos de juta + sisal, juta + rami e juta curauá também se vê uma queda de 34 e 15%, 67 e 65% e 57% para as condições alcalinizadas e mistas, respectivamente.

Como pode ser visto na Figura 19 os compósitos não tratados apresentam maior alongamento que os tratados, já os tratados não apresentam diferenças entre eles, variando menos de 10% em todos os casos, com exceção do juta + sisal que apresenta uma diference entre tratamentos de 29%.

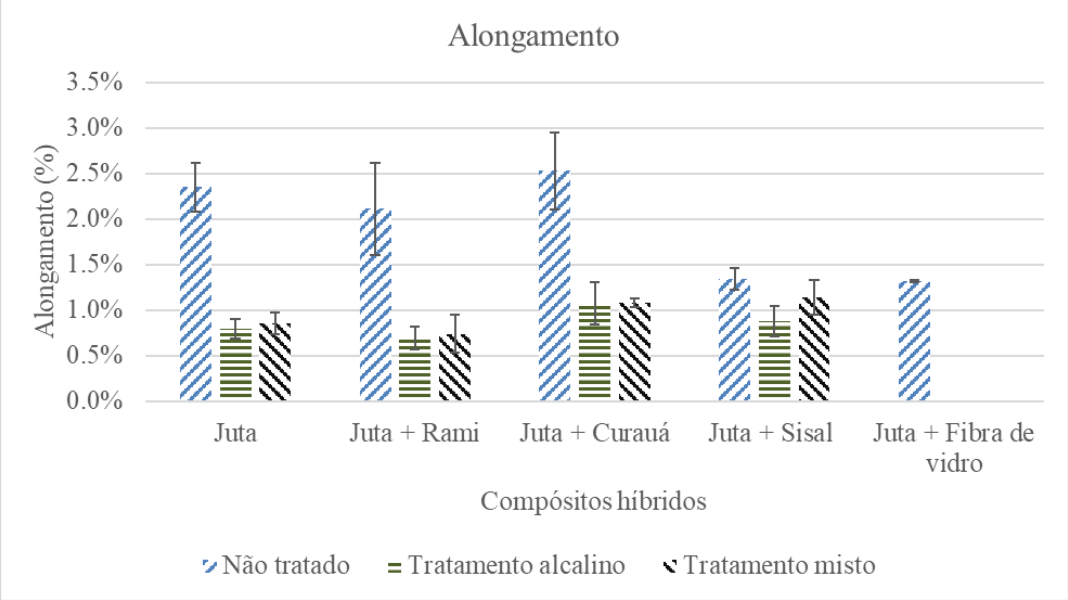


Figura 19: Alongamento dos compósitos estudados.

Esta variação de características deve-se à modificação da superfície da fibra causada pelos diferentes tratamentos, no caso do compósito de juta e juta + sisal os tratamentos alcalinos tiveram efeito negativo, degradando a superfície da fibra, enquanto para as outras fibras o tratamento alcalino apresentou aumento marginal de propriedades com a remoção de impurezas e elementos de fibra indesejáveis. O tratamento misto aumentou as propriedades de tração de todas as fibras quando

comparado aos tratamentos anteriores, sendo a juta + curauá uma exceção. Isso se deve ao fato de que o silano não melhorou as propriedades da fibra de curauá e degradou sua superfície como visto em trabalhos anteriores (NETO, 2018; LIMA, 2017).

A Tabela 6 apresenta os resultados detalhados dos testes de tração. Os itens marcados apresentam o melhor tratamento em termos de tensão de tração. A resina também foi testada, seu valor é inferior aos dados fornecidos pelo fabricante. Isto se deve aos métodos de fabricação da resina e sua cura.

Tabela 6: Dados de tração

Tipo de compósito e Tratamento		**Limite de resistência (MPa)**	**Alongamento (%)**	**Modulo de Young (GPa)**	**Densidade (g/cm^3)**
Resina		28.0±9.0	1.5±0.1	3.8±0.56	1.2
Juta + fibra de vidro		58.71±7.2	1.3±0.01	12.2±2.0	1.4
Juta	Não tratado	39.1±1.2	2.3±0.3	3.4±0.2	1.2
	Alcalino	30±3.1	0.8±0.1	5.9±0.9	1.1
	Misto	39.9±3.6	0.9±0.1	5.2±0.3	1.4
Juta + Sisal	Não tratado	75.9±6.3	1.3±0.1	9.3±0.8	1.3
	Alcalino	69.1±7.2	0.9±0.2	10.9±0.1	1.3
	Misto	78.9±3.4	1.1±0.2	8.4±0.7	1.3
Juta + Rami	Não tratado	37.2±2.8	2.1±0.5	3.8±0.8	1.2
	Alcalino	50.5±2.3	0.7±0.1	8.6±1.2	1.3
	Misto	58.95±6.2	0.7±0.2	8.0±0.3	1.4
Juta + Curauá	Não tratado	68.5±7.4	2.5±0.4	5.3±0.7	1.3
	Alcalino	71±8.2	1.1±0.2	8.9±1.7	1.3
	Misto	63.9±2.6	1.1±0.05	7.4±1.0	1.2

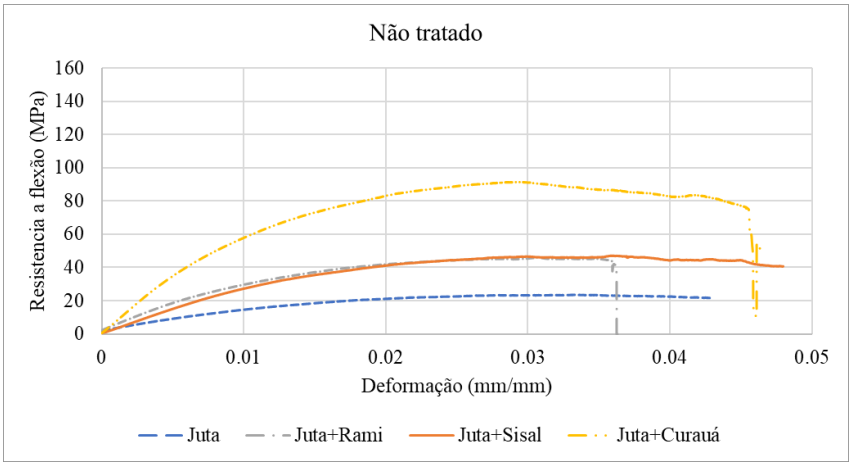
Como pode ser visto na Tabela 6, a juta + rami, juta + curauá, juta + sisal e fibra de vidro + de juta, em seus melhores tratamentos, apresentam uma melhora percentual da resistência à tração de aproximadamente 29%, 82%, 102% e 50%, respectivamente, em comparação com o compósito de juta. Assim, em todos os casos, a hibridização aumenta as propriedades de tração do compósito natural convencional.

Ao comparar os compósitos híbridos naturais com o compósito de juta + fibra de vidro podemos observar que houve um aumento na resistência à tração para todos os compósitos de juta + curauá e juta + sisal. Para as melhores condições dos compósitos acima mencionados, é possível observar um aumento de 21% e 34%, respectivamente. Para a juta + rami apenas a condição mista tratada apresentou uma melhoria insignificante em relação ao compósito de fibra de vidro + juta, com um aumento de 0,4%.

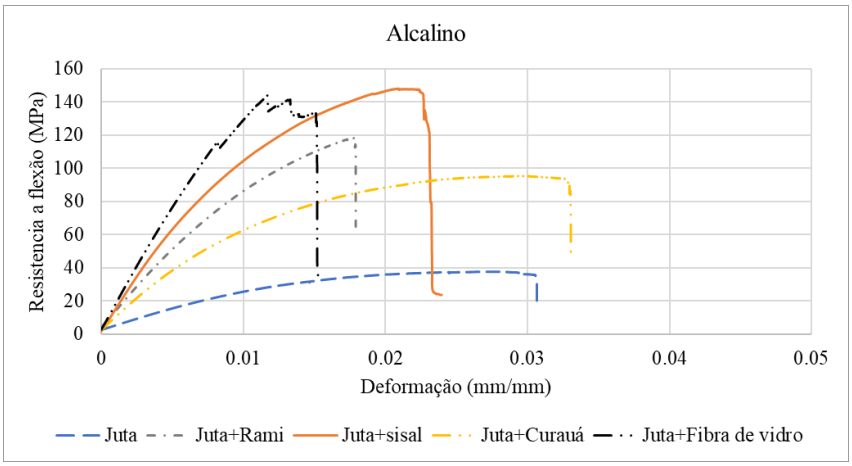
Com relação ao tipo de hibridização e seu impacto nas propriedades mecânicas de compósitos híbridos reforçados com fibras naturais, os híbridos intralaminares (propostos neste trabalho) apresentaram maior resistência à tração do que aqueles com configuração interlaminar (BOOPALAN, 2013; KIM, 2010; COSTA, 1999).

4.2.Ensaio de flexão

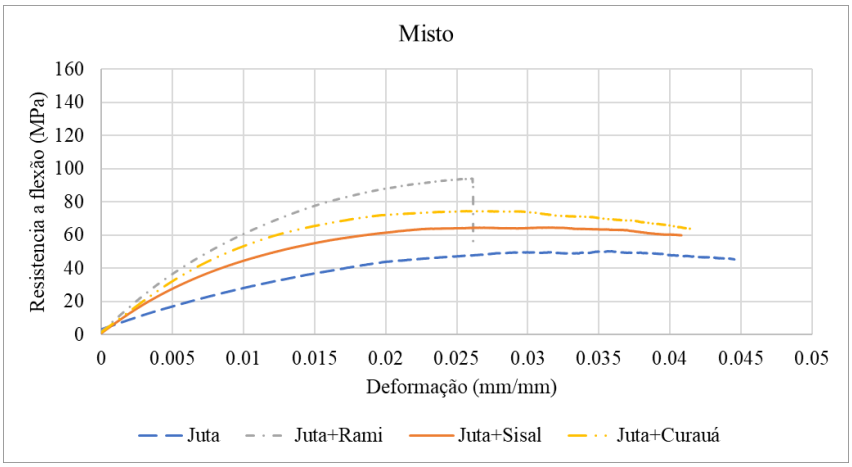
Diferentemente do ensaio de tração onde as fibras, utilizadas como elemento híbrido na manta de juta, apresentam influência significativa nas propriedades de tração dos compósitos híbridos finais, para o teste de flexão, o tipo de manta produzida e a interação entre as camadas do compósito é mais importante (JOHN, 2008; SUPPAKUL, 2002). As curvas das características de flexão podem ser vistas na Figura 20, e os resultados dos testes de flexão médios são mostrados na Figura 21.



(a)



(b)



(c)

Figura 20: Curvas de resistência à flexão para compósitos híbridos com tratamentos: (a) não tratados, (b) alcalino e (c) mistos.

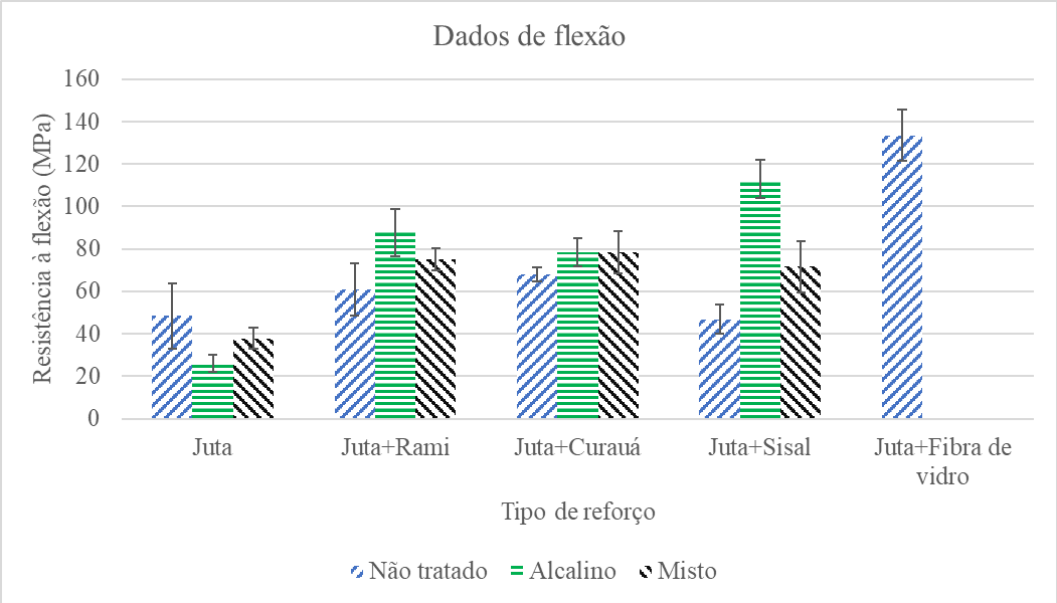


Figura 21: Dados experimentais de flexão.

Como pode ser visto na Figura 21, os compósitos híbridos apresentam melhores resultados em comparação com o compósito de juta. Resultados similares foram encontradas por DEVIREDDY (2017) *et al.* onde os valores para a juta não tratada são de 45MPa, bem próximos dos encontrados neste trabalho, e a hibridização do compósito também apresentou melhorias. A juta é a única que apresenta melhores propriedades de flexão quando não tratada, isto se deve às reações químicas do tratamento alcalino e misto onde a fibra de juta é degradada (GOPINATH, 2014 *et al*). O tratamento misto apresentou menores propriedades de flexão em todos os compósitos, com exceção da juta + curauá, onde os tratamentos de superfície não aumentaram sua resistência à flexão. O tratamento alcalinizado apresentou melhor resistência à flexão média do que os demais tratamentos para o composto de juta + sisal e híbrido de juta + rami, com aumento de 140% e 43%, respectivamente, quando comparado ao compósito simples de juta. A fibra de vidro + juta tem a melhor resistência à flexão com 133,58 MPa. A juta alcalina + sisal, juta + curauá e juta + rami possuem, respectivamente, 16%, 41% e 34% menor propriedades de flexão do que o compósito de fibra de vidro + juta. Assim, o sisal é um substituto satisfatório para a fibra de vidro em um composto híbrido de juta para solicitações de flexão.

A fim de se determinar se os dados obtidos apresentam diferenças estatísticas significativas o teste ANOVA será aplicado. Os resultados obtidos mostram que para os compósitos de juta, juta+ramie e juta+sisal há diferenças estatísticas relevantes entre os tratamentos (F (2,12) = 3.988, p = .00469) (F (2,11) = 57.09, p = .1.55E-06), (F (2,12) = 23.913, p = 6.51E-05). Já para o compósito juta+curaura não há diferença estatística relevante, (F (2,12) = 1.170, p = .343). Para o compósito de juta+rami outro teste será realizado, o teste t de Student. O teste foi realizado para os compósitos de juta+rami nas condições alcalinizada e mista. O teste revela que não há diferenças estatísticas significativas entre os compósitos estudados (t (critico bicaudal) =2.776; P (T<=t) =0.215).

4.3.Ensaios de impacto

Os testes de impacto são feitos de acordo com a norma ASTM 6110. A Figura 22 mostra os corpos de prova após os testes.



Figura 22: Amostras após testes de impacto.

Tabela 7: Absorção de energia de compósitos híbridos.

Tratamento / Compósito	Não tratado (J)	Alcalino (J)	Misto (J)
Juta	3.4±0.5	4.1±0.4	13.9±3
Juta+Sisal	10±1.9	17.7±3.3	55.1±7.7
Juta+Rami	5.4±0.5	6.4±0.8	9.8±3.3
Juta+Curauá	13.9±1.3	10.4±2.3	54±4.9
Juta+fibra de vidro	13.7±1.4	-	-

Os dados obtidos dos ensaios de impacto podem ser vistos na Tabela 7, que mostra a absorção máxima de energia para cada tipo de fibra. Pode-se observar que, os compósitos naturais apresentaram valores próximos aos da fibra de vidro + juta. O tratamento alcalino apresenta melhora irrelevante nas propriedades de impacto de todos os tipos de compósitos. Por outro lado, o tratamento misto apresenta excelentes resultados no comportamento de impacto dos compósitos híbridos juta + sisal e juta + curauá, tendo valores de absorção de energia iguais a 55,1 e 54 J, respectivamente, como visto na Figura 23.

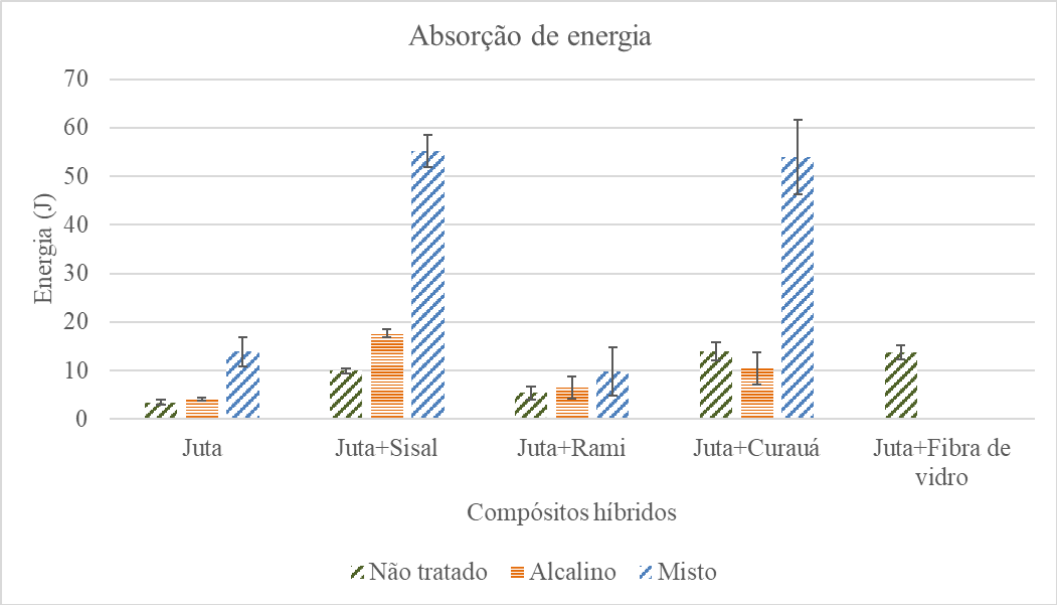


Figura 23: Absorção de energia dos compósitos híbridos.

Os compósitos intralaminares apresentam uma vantagem sobre os compostos interlaminares na absorção de energia, como em GOPINATH, A (2014) *et al.* O compósito interlaminar de fibra de juta apresenta um valor energético de 2,63 J para juta tratada alcalina, enquanto o presente trabalho teve 4,1 J para o mesmo compósito.

4.4.Modelos analíticos

A fim de se determinar quais analises podem prever de forma satisfatória as propriedades de resistência a tração os valores obtidos pelos métodos analíticos foram comparados com os dados experimentais. Os valores relevantes utilizados nas equações foram retirados dos testes experimentais.

Como pode ser visto na Tabela 8, os dados obtidos dos métodos analíticos têm grande variação. Isso condiz com a literatura, pois de acordo com SWOLFS, Y. (2014) *et al*. as propriedades não crescem de forma linear, variando de acordo com cada fibra e sua interação com as demais. Para a juta + fibra de vidro a condição não tratada é a única utilizada pois os efeitos de tratamentos químicos não trazem benefícios para a juta.

Tabela 8: Comparação dos dados analíticos e experimentais.

Resistencia a tração						
		Juta (MPa)	Juta + Rami (MPa)	Juta + Curauá (MPa)	Juta + Sisal (MPa)	Juta + Fibra de vidro (MPa)
Não tratado	Experimental	39.1±1.2	37.2±2.8	68.5±7.4	75.9±6.3	13.7±1.4
	ROM	62.2	54.8	82.7	58.6	47.8
	ROMM	62.2	24.9	66.7	30.6	41.6
	Chamis	21.8	16.6	73.1	31.0	-
Alcalino	Experimental	30±3.1	50.5±2.3	71±8.2	69.1±7.2	-
	ROM	51.4	59.5	88.9	63.6	-
	ROMM	51.4	37.4	81.5	43.5	-
	Chamis	72.8	25.2	69.8	36.3	-
Misto	Experimental	39.9±3.6	58.95±6.2	63.9±2.6	78.9±3.4	-
	ROM	44.6	46.9	100.5	77.8	-
	ROMM	44.6	21.9	102.3	68.1	-

	Chamis	15.2	19.1	114.3	36.3	-

Para compósitos de juta simples o ROM e ROMM, apresentaram uma margem de erro de 34%, 51% e 5% para não tratados, alcalinos e mistos respectivamente. Os testes analíticos de ROM de juta + rami têm os melhores resultados com um desvio de 5%, 3% e 28% para tratamento não tratado, alcalino e misto, respectivamente. O composto de juta + curauá tem um método ideal para cada condição. O Chamis é ideal para o composto não tratado, o ROMM para o tratamento alcalino e o tratamento misto é melhor representado pela ROM, com margens de erro de 1%, 4% e 52%, respectivamente.

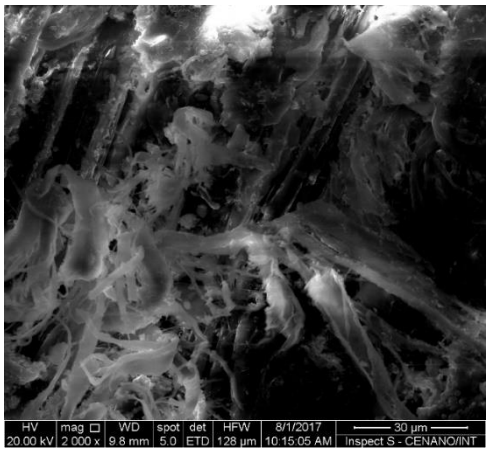
Para o compósito de juta + sisal, o ROM apresenta uma margem de erro de 27%, 17% e 5% para o tratamento não tratado, alcalino e misto, respectivamente, sendo o método mais preciso para este compósito. A diferença entre dados experimentais e analíticos pode ser explicada pela configuração do tecido, onde o tecido *Twill* modifica as propriedades de tração e flexão (JOHN, M.J., 2008; SUPPAKUL, P., 2002; ALIF, N., 1998). O padrão de tecelagem aumenta a resistência à delaminação, provando barreiras para a propagação de fissuras. Ao comparar os compósitos de tecelagem plana com outros, mais complexos, os padrões de tecelagem do primeiro apresentaram menor resistência à propagação de trinca e menores propriedades globais como descrito por ALIF, N. (1998) *et al.*

Além disso, esses métodos não levam em consideração o impacto que os tratamentos de superfície têm na adesão interfacial fibra / matriz. Como pode ser visto nos capítulos anteriores, essas interações têm grande impacto tanto na resistência à tração quanto na resistência à flexão. Como tal, desconsiderar esse elemento na metodologia analítica pode terminar em previsões imprecisas.

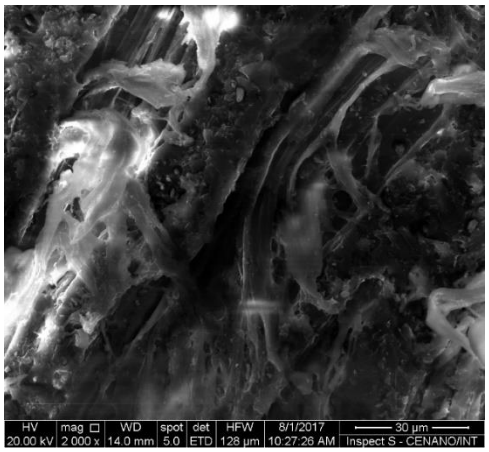
4.5.MEV

A Figura 24 apresenta as imagens de MEV da superfície de fratura dos

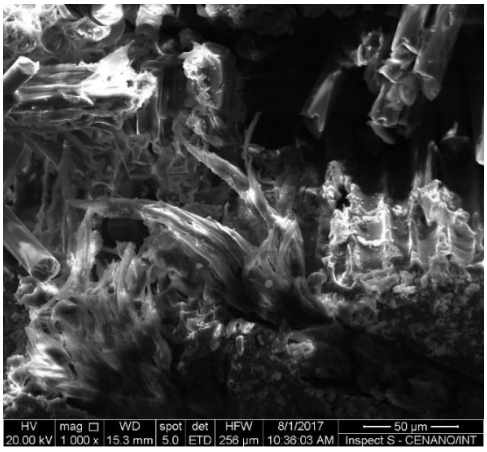
compósitos testados em tração.



(a)



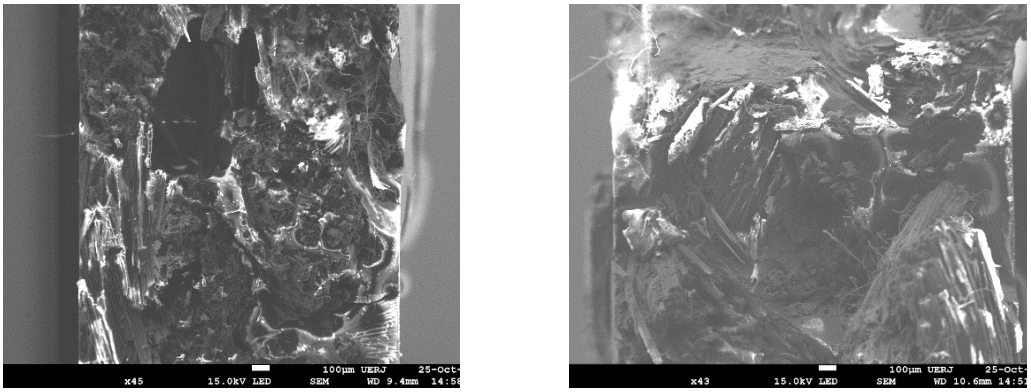
(b)



(c)

Figura 24: Imagens SEM dos espécimes híbridos. (a) juta + rami (b) juta + curauá (c) juta + fibra de vidro.

Em todas as figuras é observada uma semelhança entre as imagens, nas regiões mais claras pode-se observar a presença da fibra de juta desgastada e livre. Isso ocorre porque a fibra de juta apresenta menor resistência mecânica à tração, ou seja, a propagação da fissura ocorre principalmente nessa fibra. Em particular, a Figura 24(c) mostra a presença de fibra de vidro como o agente hibridante do tecido de juta. Foi possível verificar a ruptura interfacial entre fibra / matriz destacando a retirada das fibras e a falha pela ruptura das fibras de juta, caracterizando uma falha mista.



(a) (b)

Figura 25: Imagens SEM dos espécimes de juta + curauá. (a) Amostra do tratamento alcalino (NaOH) (b) Tratamento misto (NaOH + silanização).

Como pode ser visto na Figura 25a a falha ocorreu principalmente por falha de fibra. Alguma delaminação é aparente, na direção da falha, onde a fibra de juta é predominante. Enquanto na Figura 25b a falha é devida à delaminação, é possível ver fibras livres de Curauá (as partes claras) e vazios (pontos escuros) indicando a retirada das fibras de curauá. Isto concorda com trabalhos anteriores onde o curauá alcalinizado apresentou menor adesão interfacial entre fibra / matriz, o composto misto de juta + curauá apresentou 11% menor tensão de tração. Essa tendência não continua com outros compósitos, onde, para resistência à tração, o tratamento misto apresentou melhor adesão global, uma vez que há um revestimento superficial que melhora a adesão.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Conclusões

Neste trabalho, as propriedades mecânicas dos compósitos naturais híbridos com três tratamentos distintos foram investigadas. Os compósitos híbridos apresentaram melhora na deformação e resistência à flexão com o efeito de hibridação. Mostrando que, no compósito híbrido intralaminar, fibras naturais podem substituir a fibra de vidro como reforço.

A juta + sisal apresentou as maiores propriedades mecânicas de todos os compósitos híbridos de fibras naturais estudados. Para tração se tem uma melhora de 94%, 77% e 102% para as condições de não tratada, alcalina e tratamento misto, respectivamente, quando se comparando com o compósito de juta não tratado. Quando comparado aos compósitos de juta + fibra de vidro também se vê uma melhora de 29%, 18% e 34% para cada condição. Para esforços trativos a juta + sisal com tratamento misto é a mais indicada.

Para esforços de flexão a juta + sisal se destaca novamente, mas desta vez o tratamento mais indicado é o alcalino, pois é possível ver uma melhora de 133% quando se comparado com o compósito de juta. A juta + sisal apresenta propriedades inferiores a juta + fibra de vidro, com uma diferença de 15% entre os dois.

Sendo assim para aplicações gerais o sisal + juta com tratamento alcalino apresenta um bom balanço entre flexão e tração, tendo uma melhora de 57% e uma redução de 12%, respectivamente, quando se comparado com o compósito silanizado.

A absorção de energia do compósito híbrido intralaminar mostrou-se superior aos compostos interlaminares. O tratamento misto teve efeito positivo nas propriedades de impacto de todas as fibras, elevando drasticamente suas propriedades, a juta, juta + sisal, juta + rami e juta + curauá, tiveram uma melhora de 309%, 451%, 81% e 288%

respectivamente, quando comparadas às suas contrapartes não tratadas.

As imagens de MEV mostram a influência dos tratamentos químicos sobre as mantas hibridas e, consequentemente, sobre o compósito final. As imagens mostram que os tratamentos afetaram a interação entre fibra e matriz. Nos casos onde a resistenca a tração era menor se vê a predominância de falhas por delaminação, onde a fibra se destaca da matriz antes de romper. Esse fato também explica o aumento da resistência a flexão, onde o destacamento das fibras da matriz é benéfico. O mesmo mecanismo também é vantajoso para ensaios de impacto, onde há mais mobilidade dos reforços andes do rompimento.

Não se encontrou um método analítico que possa, de maneira satisfatória, prever as propriedades de tensão de ruptura dos compósitos híbridos estudados.

5.2.Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros coloca-se a necessidade da realização de estudos de degradação com ultravioleta e a absorção de umidade a fim de se determinar a resistência do material as intemperes do tempo e como isto pode afetar suas características mecânicas.

Outro fator relevante é o estudo das propriedades e fatores que afetam as equações analíticas, alterando e determinando fatores que possam melhorar a acuracidade das mesmas. Para tal também se faz necessário o estudo da tecelagem e sua influência nas propriedades mecânicas.

Os estudos de MEV também podem ser expandidos para o estudo da superfície de fratura dos testes de impacto e flexão.

Referências

ALBINANTE, S. R., PACHECO, É. B. A. V., & VISCONTE, L. L. Y. **A review on chemical treatment of natural fiber for mixing with polyolefins**. In: Quim. Nova, 2013,36.

AL-MOSAWI ALI, I., **Mechanical properties of plants-synthetic hybrid fibers composites.** In: Research Journal of Engineering Sciences, 2012: p. 9472.

ABD EL-BAKY, M. A., **Evaluation of Mechanical Properties of Jute/Glass/Carbon Fibers Reinforced.** In: Fibers and Polymers, 2017, p. 2417-2432.

ALIF, N., CARLSSON, L.A., BOOGH, L., **The effect of weave pattern and crack propagation direction on mode I delamination resistance of woven glass and carbon composites**. In: Composites Part B: Engineering, 1998. 29(5): p. 603-611.

BANEA, M.D., DA SILVA, L.F.M., CARBAS, R.J.C., BARBOSA, A.Q., DE BARROS, S., VIANA, G., **Effect of water on the behaviour of adhesives modified with thermally expandable particles.** In: International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. 84, p. 250-256.

BARBOSA, A.Q., **Improved toughness of adhesives filled with cork micro particles.** In: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, UPorto, 2017.

BOOPALAN, M., NIRANJANAA, M., UMAPATHY, M.J., **Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites**. In: Composites Part B: Engineering, 2013. 51: p. 54-57.

CHAMIS, C.C., **Mechanics of composite materials: past, present, and future**. In: Journal of Composites, Technology and Research, 1989. 11(1): p. 3-14.

COSTA, F., D'ALMEIDA, J., **Effect of water absorption on the mechanical properties of sisal and jute fiber composites**. In: Polymer-Plastics Technology and Engineering, 1999. 38(5): p. 1081-1094.

DEVIREDDY, S.B.R., BISWAS, SANDHYARANI, **Physical and mechanical behavior of unidirectional banana/jute fiber reinforced epoxy based hybrid composites.** Polymer Composites, 2017. 38, 7 p. 1396-1403.

FRAGASSA, C.**, Effect of natural fibers and bio-resins on mechanical properties in**

hybrid and non-hybrid composites. In: AIP Conference Proceedings, 2016. 1736(1): p. 020118.

GOMES, A., MATSUO, T., GODA, K., OHGI, J., **Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curauá fiber green composites**. In: Composites: Part A, 38., 2007, p. 1811–1820.

GOPINATH, A., KUMAR, M.S., ELAYAPERUMAL, A., **Experimental Investigations on Mechanical Properties of Jute Fiber Reinforced Composites with Polyester and Epoxy Resin Matrices**. In: Procedia Engineering, 2014. 97: p. 2052-2063.

GHAFAAR, M.A., MAZEN, A., EL-MAHALLAWY, N., **Application of the rule of mixtures and Halpin-Tsai equations to woven fabric reinforced epoxy composites**. In: Journal of Engineering Sciences, Assiut University, 2006. 34(1): p. 227-236.

GURUNATHAN, T., SMITA MOHANTY, SANJAY K. NAYAK, **A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives**. In: Composites: Part A, 77., 2015, p. 1–25.

GIBSON, R.F., **Principles of composite material mechanics.** In: CRC press, 2011.

JAUHARI, N., MISHRA, R., THAKUR, H., **Natural Fibre Reinforced Composite Laminates – A Review**. In: Materials Today: Proceedings, 2., 2015, p. 2868 – 2877.

JOHN, M.J., SABU THOMAS, **Biofiber's and biocomposites**. In: Carbohydrate Polymers, 71., 2008, p. 343–364.

JAWAID, M., ABDUL KHALIL, H.P.S., **Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review**. In: Carbohydrate Polymers, 86., 2011, p. 1-18.

KIM, J.T., NETRAVALI, A.N., **Mercerization of sisal fibers: Effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites**. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010. 41(9): p. 1245-1252.

LIMA, R.A.A., CAVALCANTI, D.K.K., NETO, J.S.S., COSTA, H.R.M., AGUIAR, R.A.A., BANEA, M.D., **Evaluation of interfacial fibre/matrix strength in natural hybrid composites**. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017.

MARINELLI, A.L., MONTEIRO, M.R., AMBRÓSIO, J.D., BRANCIFORTI, M.C., KOBAYASHI, M., NOBRE, A.D., **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica.** In: Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2008, 18, p. 92-99.

NETO, J.S.S., LIMA, R.A.A., CAVALCANTI, D.K.K., SOUZA, J.P.B., AGUIAR, R.A.A., BANEA, M.D., **Effect of Chemical Treatment on the Thermal Properties of Hybrid Natural Fibre-Reinforced Composites**. In: Journal of Applied Polymer Science, 2018: p. Submited.

NUNNA, S., CHANDRA, P.R., SHRIVASTAVA, S., JALAN, A., **A review on mechanical behaviour of natural fiber-based hybrid composites**. In: Journal of Reinforced Plastics and Composites, 31.

ORNAGHI, H., SILVA, H., ZATTERAB, A., AMICOA, S., **Hybridization effect on the mechanical and dynamic mechanical properties of curauá composites**. In: Materials Science and Engineering A, 528, 2011, p. 7285– 7289.

PICKERING, K.L., ARUAN EFENDY, M.G., LE, T.M., **A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance**. In: Composites: Part A, 83., 2016, p. 98-112.

PEREIRA, P., ROSA, M., CIOFFI, M., KELLY C. BENINI, MILANESE, A., VOORWALD, H., MULINARI, D., **Vegetal fibers in polymeric composites: a review**. In: Polímeros, 25, 2015, p. 9-22.

PANTHAPULAKKAL, S., LAW, S., SAIN, M., **Injection molded natural fiber hybrid composites for automobile applications–Mechanical properties and flammability.** In: International SAMPE Technical Conference, 2005.

RAMESH, M., PALANIKUMAR, K., REDDY, K.H., **Comparative evaluation on properties of hybrid glass fiber-sisal/jute reinforced epoxy composites**. In: Procedia Engineering, 2013. 51: p. 745-750.

RAMESH, M., **Mechanical property evaluation of sisal–jute–glass fiber reinforced polyester composites**. In: Composites Part B: Engineering, 2013. 48: p. 1.

RAFAEL, S., HARAGUCHI, K.S., MUNIZ, C.E., RUBIRA, F.A., **Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos**. In: Química Nova,

32, p. 661-671.

SUDHIR, A., MADHUKIRAN, J., RAO, S.S., MADHUSUDAN, S., **Tensile and flexural properties of sisal/jute hybrid natural fiber composites**. In: Int. J. Mod. Eng. Res., 2014. 4: p. 29-35.

SWOLFS, Y., GORBATIKH, L., VERPOES, I., **Fibre hybridization in polymer composites: A review**. In: Composites: Part A, 67, 2014, p. 181–200.

SUPPAKUL, P., BANDYOPADHYAY, S., **The effect of weave pattern on the mode-I interlaminar fracture energy of E-glass/vinyl ester composites**. In: Composites Science and Technology, 2002. 62(5): p. 709-717.

TRAGOONWICHIAN, S., YANUMET, N., ISHIDA, H., **Effect of fiber surface modification on the mechanical properties of sisal fiber-reinforced benzoxazine/epoxy composites based on aliphatic diamine benzoxazine.** In: Journal of applied polymer science, 106., 2007, p. 2925-2935.

VENKATESH, R.P., RAMANATHAN, K., RAMAN, V.S., **Tensile, flexual, impact and water absorption properties of natural fibre reinforced polyester hybrid composites**. In: Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2016(3 (117)): p. 90--94.

WANG, Y., HUANG, Z., **A Review of Analytical Micromechanics Models on Composite Elastoplastic Behavior**. In: Procedia Engineering, 2017. 173: p. 1283-1290.

YU, H., LONGANA, M., JALALVAND, M., WISNOM, M., POTTER, K., **Pseudo-ductility in intermingled carbon/glass hybrid composites with highly aligned discontinuous fibres**. In: Composites: Part A,73., 2015, p. 35–44.

YOUNES, R., HALLAL, A., FARDOUN, F., CHEHADE, F. H., **Comparative review study on elastic properties modeling for unidirectional composite materials**. In: Composites and their properties. 2012, intech.

YUSOFF, R.B., TAKAGI, H., NAKAGAITO, A.N., **Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers**. In: Industrial Crops and Products, 2016. 94: p. 562-573.

ZAH, R., HISCHIER, R., LEÃO, A.L., BRAUN, I., **Curauá fibers in the automobile**

industry – a sustainability assessment. In: Journal of Cleaner Production, 15., 2007, p. 1032-1040.