



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

YVES SOARES DE ALBUQUERQUE

ESTUDO DE COMPÓSITOS DE POLIETILENO RECICLADO REFORÇADO
COM FIBRA DE BAMBU

FORTALEZA

2019

YVES SOARES DE ALBUQUERQUE

**ESTUDO DE COMPÓSITO DE POLIETILENO RECICLADO REFORÇADO
COM FIBRA DE BAMBU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus.

Co-Orientador: Prof. Me. Santino Loruan Silvestre de Melo

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados
fornecidos pelo(a) autor(a)

A314e Albuquerque, Yves Soares de.

Estudo de compósitos de polietileno reciclado reforçado com fibra de bambu / Yves Soares de Albuquerque. – 2019.

51 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus .

Coorientação: Prof. Me. Santino Loruan Silvestre de Melo.

1. Compósitos. 2. Fibras de bambu. 3. Polietileno reciclado. I. Título.

CDD 620.1

YVES SOARES DE ALBUQUERQUE

ESTUDO DE COMPÓSITO DE POLIETILENO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRA DE BAMBU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Santino Loruan Silvestre de Melo
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Dr. Pierre Maurice Christophe Lamary
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Edivaldo Fontenelle e Fátima Albuquerque que me apoiaram desde o início da minha trajetória, sempre transmitindo o exemplo a ser seguido por meio de suas atitudes.

À minha namorada Laís Peixoto companheira nos momentos mais difíceis, sempre me incentivou, me ajudou e não permitiu que eu desistisse de concluir mesmo quando eu não tinha mais esperanças de concluí-lo.

Ao meu irmão e conselheiro Yuri Soares por sempre me incentivar e auxiliar no que era possível.

Aos membros do LAMEFF (Roberto Abreu, João Victor, Beatriz Mota e Sérgio Junior) por toda a orientação dada.

Aos meus amigos Luana Thais e Ronald Oliveira por todo suporte.

Ao meu amigo Lucas Barbosa pelo apoio e pelas dicas valiosas.

Aos meus amigos de curso Luiz Neto, Crysanto Augusto e Valdecícero Rui por todo o companheirismo durante esses muitos anos.

Ao meu professor orientador, Ênio Pontes de Deus, e co-orientador Santino Loruan Silvestre, por toda a ajuda em estruturar e tirar todas as dúvidas que surgiram durante todo esse trabalho.

Ao professor Pierre Lamary por ter aceito participar da banca com sugestões valiosas.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

Materiais derivados do petróleo servem de base para a produção da maioria dos bens de consumo da sociedade, porém grandes impactos ambientais produzidos por eles, aumentaram a busca por alternativas menos prejudiciais ao meio ambiente. A possibilidade de desenvolver esses materiais sem poluir muito o meio ambiente, com um menor custo, que possua características iguais ou superiores, é o que o desenvolvimento sustentável procura. Uma alternativa é a reciclagem, com a enorme quantidade desses derivados circulando, a sua reutilização é importante para reduzir a sua produção. Outra alternativa é adicionar, nos compósitos de matriz poliméricas, fibras naturais com boas propriedades para além de aumentar a qualidade do material, reduzir ainda mais a quantidade de polímeros. A blenda de polietileno analisada predomina em sua composição o polietileno de baixa densidade presente, principalmente em sacolas e embalagens descartáveis, que após utilização vira lixo, causando poluição. A fibra vegetal em estudo será a fibra de bambu, bastante abundante no Nordeste brasileiro e em regiões que possuem clima tropical. Um estudo para analisar as propriedades de um compósito formado por polietileno reciclado e fibra de bambu é a motivação dessa pesquisa. Com o intuito de melhorar a adesão fibra/matriz alguns tratamentos químicos foram realizados na fibra, as imagens em MEV constataram as modificações causadas pela mercerização e acetilação das fibras. O IFTR referente às bandas em 1750cm^{-1} , 1636cm^{-1} e 1250cm^{-1} mostra o desaparecimento e o reaparecimento do grupo vibracional carbonila (C=O) após a mercerização e a acetilação respectivamente. Todos os compósitos apresentaram melhora no módulo de elasticidade e algumas distribuições da fibra ao longo do compósito apresentaram um ganho de até 168,43% na tensão máxima de ruptura.

Palavras chaves: Polietileno reciclado, Fibras de bambu, Compósitos.

ABSTRACT

Petroleum-derived materials are used to produce most of society's consumer goods. However, the large environmental impacts produced by them have increased the search for alternatives less harmful materials. The possibility of developing these materials without much polluting the environment, at a lower cost, which has equal or superior characteristics, is what sustainable development demands. An alternative is recycling because due to the huge amount of these derivatives circulating, its reuse is paramount to reduce its production. Another alternative is to add natural fibers with good properties in polymer matrix composites to increase the quality of the material and to reduce the number of polymers. The polyethylene blend analyzed has in your composition the low-density polyethylene that is used in bags and in disposable containers, which after use turns trash causing pollution. The plant fiber in the study will be the bamboo fiber, which is abundant in the Brazilian Northeast and in the tropical climate regions. A study to analyze the properties of a composite composed of recycled polyethylene and bamboo fiber is the motivation of this research. Some chemical treatments - mercerization and acetylation - were performed on the fiber to improve fiber/matrix adhesion. Scanning electron microscope images verified the modifications. The FTIR referring to the bands in 1750cm^{-1} , 1636cm^{-1} and 1250cm^{-1} showed the disappearance and reappearance of the carbonyl vibrational group (C = O) after mercerization and acetylation respectively. All the composites had elasticity improvement and some fiber distribution along them showed a gain of up to 168.43% at the maximum breakdown voltage.

Keywords: *Recycled Polyethylene, Bamboo's Fiber, Composites.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fibras vegetais	23
Figura 2 - Diferentes tipos de fibras. A) Bagaço de cana-de-açúcar, B) Juta, C) Curauá, D) Bananeira, E) Carnaúba, F) Sisal, G) Coco, H) Palha de arroz, I) Palha de milho, J) Palha de trigo e H) Bambu.....	24
Figura 3 - Parte do bambu vista superior e vista lateral	27
Figura 4 - Molde utilizado para a fabricação das placas	31
Figura 5 - MEV da fibra de bambu natural 500x.....	35
Figura 6 - MEV da fibra de bambu natural 100x.....	35
Figura 7 - MEV da fibra de bambu tratada com 2% de NaOH 500 x.....	36
Figura 8 - MEV para a fibra de bambu tratada com 2% de NaOH 100x.....	36
Figura 9 - MEV da fibra de bambu tratada com 2% de NaOH e acetiladas 500x	37
Figura 10 - MEV da fibra de bambu tratada com 2% de NaOH e acetiladas 100x	37
Figura 11 - MEV da fratura da blenda aumentada 500x.....	39
Figura 12 - MEV da fratura do compósito de PE reciclado com fibra tratada 100x	39
Figura 13 - Difractogramas de Raios X das fibras naturais e modificadas.....	40
Figura 14 - Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier das fibras.	41
Figura 15 - Placa da blenda (1), Placa de CFV (2), Placa de CFH (3), Placa de CFA (4).....	43
Figura 16 - Placa de CFA com os moldes dos corpos de prova (1), Placa de CFV com os modelos dos corpos de prova (2), Corpos de prova de CFA que ficaram conforme a norma adaptada (3), Corpos de prova de CFV que ficaram conforme a norma adaptada (4).	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fração de cristalinidade das fibras vegetais em função do tratamento	41
Tabela 2 - Tensão máxima na ruptura e módulo de elasticidade de fibras de bambu naturais e modificadas.....	42
Tabela 3 - Medidas corpos de prova da blenda	44
Tabela 4 - Medidas corpos de prova do compósito com fibras orientadas horizontalmente	44
Tabela 5 - Medidas corpos de prova do compósito com fibras orientadas horizontalmente	44
Tabela 6 - Medidas corpos de prova do compósito com fibras orientadas horizontalmente	44
Tabela 7 - Ensaio de tração da blenda.....	45
Tabela 8 - Ensaio de tração do compósito com fibras orientadas horizontalmente.....	46
Tabela 9 - Ensaio de tração do compósito com fibras orientadas verticalmente	46
Tabela 10 - Ensaio de tração do compósito com fibras orientadas aleatoriamente.....	46

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFA	Compósito reforçado com fibras orientadas aleatoriamente
CFH	Compósito reforçado com fibras orientadas horizontalmente
CFV	Compósito reforçado com fibras orientadas verticalmente
DEMM	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
DRX	Difração de Raios X
LAMEFF	Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LPT	Laboratório de Tecnologia de Produtos e Processos
IFTR	Espectrômetro por Transformada de Fourier
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PEUAPM	Polietileno de ultra alto peso molecular
PEUBD	Polietileno de ultra baixa densidade
PET	Politereftalato de etileno
PVC	Policloreto de Vinila
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
UFC	Universidade Federal do Ceará

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. A era dos polímeros	12
1.2. Polímeros sustentáveis	13
1.3. Motivação à escolha do tema.....	13
1.4. Objetivos gerais e específicos.....	14
2. POLÍMEROS	15
2.1. Plásticos de engenharia	15
2.2. Polietileno.....	15
2.3. Processos de reciclagem de polímeros.....	18
2.4. Dificuldades no processo de reciclagem secundária	19
3. COMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS	20
3.1. Produção de blendas e compósitos	20
3.2. Fibras naturais	22
3.3. Fibras de bambu	26
3.4. Micromecânica dos compósitos	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1. Materiais utilizados.....	30
4.2. Métodos utilizados para a produção da blenda.....	31
4.3. Modificação química da superfície das fibras.....	31
4.4. Métodos utilizados para a produção do compósito.....	32
4.5. Ensaio de tração.....	32
4.6. Microscopia com eletrônica de varredura.....	33
4.7. Difração de Raios X.....	33
4.8. Infravermelho com transformada de Fourier.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	34
5.2. Caracterização das fibras naturais por difração de Raios X.....	40
5.3. Infravermelho com transformada de Fourier.....	41
5.4. Ensaio de tração nas fibras.....	42
5.5. Produção dos compósitos.....	42
5.6. Ensaio de tração na blenda e nos compósitos.....	45
6. CONCLUSÕES.....	47
7. Bibliografia	48
8. Anexo 1: Ensaio de tração em fibras.....	52

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos de matriz polimérica reciclada reforçados com fibras naturais vegetais, vem para suprir uma demanda sustentável necessária para a nossa era, conhecida como a “era dos polímeros”. As eras da sociedade foram marcadas pela maneira como dominamos o uso de materiais, como a idade da pedra, idade do bronze e idade do ferro (Hage 1998).

O desenvolvimento dos materiais poliméricos se iniciou com a definição de polímeros apresentada para a comunidade científica, no século passado. Esse conhecimento se difundiu até a escala industrial, com a demanda social por esses materiais. Apesar do conhecimento molecular dos materiais poliméricos terem sido aprofundados desde o século passado até os dias atuais, não é exclusiva da nossa era a utilização dos polímeros, visto as plantas são materiais poliméricos. Quando nos referimos a era dos polímeros, estamos entrando no âmbito dos polímeros naturais modificados e sintéticos e seus respectivos compósitos (Hage 1998).

1.1. A era dos polímeros

A industrialização dos polímeros começou no fim do século XIX, mas estudos mais específicos sobre as macromoléculas dos polímeros se iniciaram em torno de 1920 por Hermann Staudinger, tornando possível nos conhecermos os comportamentos dos compostos orgânicos (Hage 1998). Após esse início os estudos foram aumentados significativamente, cientistas de todo mundo foram se aprofundando na Ciência de Polímeros, buscando entender e melhorar a sua utilização.

A era dos polímeros é bastante recente comparados com os demais materiais como os metais e as cerâmicas, logo, ainda faltam muitos estudos para tirarmos o máximo proveito deles. A capacidade dos polímeros em serem modificados e se adequarem para ter as propriedades desejadas, proporciona uma substituição constante dos materiais tradicionais por materiais poliméricos com propriedades

semelhantes e até muitas vezes melhoradas, despertando assim um grande interesse em estudá-lo. (Hage 1998).

Aprender como os polímeros se comportam nas mais diversas situações e usufruir desses materiais está sendo o grande desafio desde o início da humanidade, no começo a utilização de polímeros naturais como amido, celulose e seda até hoje com materiais como borracha, fibras, plásticos. A capacidade do ser humano de aperfeiçoar as técnicas e os domínios para a exploração desses polímeros está ligada diretamente com a garantia da melhoria de vida e até com sua sobrevivência. A necessidade de novas tecnologias para a melhor utilização desses matérias é o que promove a evolução humana, mas Compreender, usar e dominar os polímeros só foi possível a partir da segunda metade do século XIX (Hage 1998).

1.2. Polímeros sustentáveis

O grande problema dos polímeros é a questão ambiental, pois o consumo desses materiais geralmente descartáveis, derivados do petróleo, vem aumentando e sua destinação é geralmente inadequada. A reciclagem apresenta uma boa rentabilidade, pois apresenta reflexos socioeconômicos diretos relacionados com a melhoria da qualidade de vida da população, geração de renda, economia de recursos naturais e atenuação de problemas ambientais. (Flávio J. Forlin 2002).

A incineração não é a melhor opção pois libera muitos gases tóxicos, aterros sanitários ficariam cheios rapidamente por conta do alto volume e prejudicam o tempo de vida útil dos mesmos por conta da baixa degradabilidade dos plásticos. A reciclagem é a melhor opção, pois tornar a longa vida dos plásticos uma característica útil para as empresas e saudável para a sociedade e o meio ambiente (José Cláudio Caraschi 2002).

1.3. Motivação à escolha do tema

O mundo está precisando, mais do que nunca, repensar o rumo que está tomando. O desperdício e a contínua fabricação de materiais não degradáveis estão ficando insustentáveis, a ideia de reutilizar, reaproveitar e recuperar tem

que estar cada vez mais presente no nosso dia a dia. Com esse pensamento escolhi o tema, a união dos dois mundos, a reciclagem e a utilização de fibras biodegradáveis, juntos produzindo materiais sustentáveis. Nossa geração já vem sofrendo bastante com o desperdício e as próximas sofrerão ainda mais. Precisamos ter consciência que o mundo não é só nosso, precisamos deixar ele em boas condições para as próximas gerações.

1.4. Objetivos gerais e específicos

Objetivo Geral:

- Desenvolver um compósito de polietileno reciclado reforçado com fibra de bambu, que substitua parte do material não renovável e não biodegradável por uma fase que possa proporcionar melhor resistência mecânica, que seja renovável e biodegradável.

Objetivos específicos:

- Analisar a influência de fibras de bambu como reforço nos compósitos com diferentes orientações como agente de reforço para a matriz polimérica.
- Extrair do colmo do bambu feixes de fibras, que unidos e entrelaçados naturalmente nos entrenós, possam ser extraídos e utilizados com todo o seu comprimento.
- Caracterizar química, física e mecanicamente as fibras provenientes de bambu
- Caracterizar mecanicamente os compósitos e a blenda de polietileno reciclado
- Selecionar dentre uma série de procedimentos químicos qual o que provoca melhor adesão fibra/matriz para que a distribuição de tensões para a fase dispersa seja eficiente.
- Obter compósitos com diversas orientações de distribuição das fibras e produzir corpos de prova para os ensaios
- Avaliar quais compósitos promovem melhores propriedades mecânicas conforme orientação das fibras no compósito.

2. POLÍMEROS

2.1. Plásticos de Engenharia

Os plásticos mais consumidos no mundo são o PVC, PEBD, PEAD, PET e PP. São utilizados, principalmente, em embalagens plásticas e geralmente do setor alimentício. Os principais plásticos reciclados estão distribuídos da seguinte maneira:

PEBD: Material flexível, leve, transparente e impermeável. Geralmente encontrado em sacolas e saquinhos para supermercados, leites e iogurtes, sacaria industrial, sacos de lixo, de mudas de plantas, plasticultura;

PP: Material rígido, brilhante com capacidade de conservar o aroma de conteúdos e resistente às mudanças de temperatura. Normalmente é encontrado em peças técnicas, caixarias em geral, utilidades domésticas, fios e cabos, potes e embalagens mais resistentes, dentre outros;

PEAD: Material leve, inquebrável, rígido e com excelente resistência química. Muito usado em: detergentes, amaciantes, sacos e sacolas de supermercado, potes, embalagens de óleo, bombonas para produtos químicos, tambores de tinta, peças técnicas, dentre outros;

PVC: Material transparente, leve, resistente a temperatura, inquebrável. Normalmente usados em: embalagens de óleos comestíveis, Além da indústria alimentícia é muito encontrado nos setores farmacêuticos em bolsas de soro, sangue, material hospitalar. Uma forte presença também no setor de construção civil, principalmente em tubos e esquadrias;

PET: Material quimicamente inerte, alta resistência ao impacto, excelentes propriedades de barreira de gases e odores. Utiliza-se principalmente na forma de fibras para tecelagem e de embalagens para bebidas (MARTINS 2013).

2.2. Polietileno

Apesar de possuir diversas variações, o polietileno é composto pela mesma cadeia principal de átomos de carbono. Na forma mais primitiva a molécula de

PE é constituída de átomos de carbono ligados covalentemente a um par de átomos de hidrogênio. Os diferentes tipos de PE se diferenciam, principalmente, por conta das suas ramificações estruturais que modificam algumas propriedades formando diferentes materiais (Ferreira e Santana 2015).

O polietileno é um polímero semicristalino, pois possui fases amorfas e cristalinas e a quantidade relativa dessas fases influenciam em suas características, mas em geral eles são flexíveis, inerte à maioria dos produtos químicos, em temperaturas abaixo de 60°C, são parcialmente solúveis em todos os solventes, são atóxicos em condições normais. Por isso são também utilizados tanto para embalagens de alimentos como para embalagens farmacêuticas (Coutinho, Mello e Maria 2003).

Os polietilenos podem ser derivados da cana de açúcar e do petróleo, nesse trabalho focaremos nos derivados do petróleo. Desses temos cinco tipos distintos que dependendo das condições reacionais e do sistema catalítico empregado na polimerização podem ser: Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE), Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE), Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE), Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE) e Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD ou ULDPE) (Coutinho, Mello e Maria 2003). O PE reciclado usado nessa pesquisa é composto principalmente de PEBD, PELBD e PEAD, então vamos detalhar mais esses três.

PEBD

Os PEBD possuem extensas cadeias ramificadas proporcionando uma redução na cristalinidade e na viscosidade. Resultando em um produto final flexível e com baixo ponto de fusão (Pistor, Chiesa e Zattera 2010).

No processo de produção é utilizada pressões entre 1000 atm e 3000 atm e temperaturas entre 100°C e 300°C. Sua cristalinidade é entre 50% e 60% e sua temperatura de fusão varia entre 110°C e 115°C. Em geral, os PEBD possuem as seguintes propriedades: boa tenacidade, alta resistência ao

impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e propriedades elétricas notáveis (Coutinho, Mello e Maria 2003).

PEAD

A linearidade das cadeias e conseqüentemente a maior densidade do PEAD fazem com que a orientação, o alinhamento e o empacotamento das cadeias sejam mais eficientes; as forças intermoleculares (Van der Waals) possam agir mais intensamente, e, como conseqüência, a cristalinidade seja maior que no caso do PEBD. Sendo maior a cristalinidade, a fusão poderá ocorrer em temperatura mais alta (Gutián 1995).

Um aumento no teor de ramificações reduz a cristalinidade e é acompanhado por variação significativa a das características mecânicas, uma vez que causa um aumento no alongamento na ruptura e uma redução da resistência à tração. Os efeitos combinados do peso molecular e das ramificações sobre as características mecânicas são: aumento na resistência a tração, aumento do módulo elástico, diminuição da resistência ao impacto. As propriedades elétricas não sofrem muita diferença em relação ao PEBD (Coutinho, Mello e Maria 2003).

PELBD

As ramificações de cadeia curta têm influência, tanto no PELBD como no PEBD, sobre a morfologia e algumas propriedades físicas tais como, rigidez, densidade, dureza e resistência à tração. Isso ocorre porque a estrutura ramificada de algumas regiões das moléculas impede um arranjo perfeitamente ordenado das cadeias. O PELBD possui um baixo teor de ramificações curtas e nenhuma ramificação longa, por conta disso ele é mais cristalino que o PEBD (Coutinho, Mello e Maria 2003).

Essa maior cristalização resulta em melhores propriedades mecânicas e uma maior temperatura de fusão, mas a maior resistência ao cisalhamento e a maior susceptibilidade à fratura do fundido fazem com que o processamento do PELBD seja mais difícil em comparação com o do PEBD. Já em comparação ao PEAD, o PELBD apresenta resistência à tração e dureza mais baixas, conforme

aumenta o teor de ramificações, e exibe maior resistência ao impacto e ao rasgamento (Coutinho, Mello e Maria 2003).

2.3. Processos de reciclagem de polímeros

Com a alta rotatividade, rapidamente as embalagens se tornam resíduos sólidos urbanos, virando problemas para as cidades que não possuem destinação adequada para os seus resíduos (Coltro e Duarte 2013). O consumo desses plásticos só tende a crescer, com isso, a reciclagem se torna cada vez menos uma alternativa e sim uma obrigação.

Existem quatro processos de reciclagem poliméricas: primária ou re-extrusão, secundária ou mecânica, terciária ou química e quaternária ou recuperação energética. Todos os plásticos a princípio são recicláveis a ponto de serem reutilizados, porém sua utilização e a contaminação que pode ocorrer pelo contato com outro produto no caso de embalagens, por exemplo, podem tornar o processo de reutilização inviável, porém a reciclagem energética se torna uma alternativa viável nesses casos (Coltro e Duarte 2013).

A primária consiste em reaproveitamento industrial que vai desde de rebarbas até produtos finais com defeitos ou que saíram fora do padrão, bastante praticada pela maioria das indústrias pois esta é a reciclagem de resíduo limpo, não contaminado e de um único tipo pela simplicidade e baixo custo é o processo de reciclagem mais popular (Figueiredo, et al. 2015).

A reciclagem secundária ou mecânica consiste em transformar os resíduos plásticos descartados em grânulos, que podem ser reutilizados na produção de outros materiais, como: pisos, conduítes, sacos de lixo, solados, mangueiras, componentes de carros, fibras etc. (Franchetti e Marconato 2003). A reciclagem secundária foi a utilizada para a obtenção do polímero desta pesquisa. Na empresa aonde foram coletados os grânulos, a principal destinação é para produção de sacolas plásticas.

Na reciclagem terciária ou química, faz-se o reprocessamento de plásticos descartados, convertendo-os em monômeros e misturas de hidrocarbonetos, através da utilização de calor e/ou tratamento químico que poderão ser

reutilizados como produtos químicos em refinarias ou centrais petroquímicas. Os produtos da reciclagem química, geralmente líquidos e/ou gases, têm provado ser úteis como combustíveis. Os processos da reciclagem química resultam em um esquema muito rentável e sustentável industrialmente, proporcionando um rendimento de produto elevado e o mínimo de desperdício. Este tipo de reciclagem permite também tratar misturas de plásticos, reduzindo custos de pré-tratamento, de coleta e seleção, além de permitir a produção de plásticos novos com a mesma qualidade de um polímero original (Figueiredo, et al. 2015).

Por fim, a reciclagem quaternária ou energética se mostra energeticamente viável, onde estudos mostram que a energia contida em 1kg de plástico é equivalente a energia contida em 1kg de óleo combustível. Nesse processo, os subprodutos gerados da combustão são o grande problema. Os resíduos plásticos que não estão em condições de reciclagem servem como combustível à Reciclagem Energética que é a tecnologia que transforma os resíduos em energia elétrica e térmica através da incineração, um processo que aproveita o alto poder calorífico contido nos plásticos para uso como combustível. Este tipo de reciclagem é aconselhado para resíduos complexos (termorrígidos, borrachas e compósitos) ou que necessitem de cuidados especiais (descartáveis médico-hospitalares, embalagens de óleos, etc.). No entanto, alguns compostos plásticos emitem produtos tóxicos, como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) e fuligem (Figueiredo, et al. 2015)

2.4. Dificuldades no processo de reciclagem secundária

Dos processos de reciclagem apresentados, damos destaque ao processo de reciclagem secundário, visto que foi esse o processo utilizado para a reciclagem dos plásticos utilizados nesta pesquisa. Com o processo, algumas dificuldades surgem, desde o processo de coleta de materiais até a adequação adequada à utilização. Assim, a seguir, estão listadas algumas dificuldades com o processo de reciclagem secundário.

- Devido à baixa quantidade de coletas seletivas, a presença de diversos contaminantes junto aos resíduos é comum, como restos de comida, gorduras, papel, etiquetas, grampos e sujeira em geral. Isso afeta

diretamente o preço de venda, pois custos demorados de lavagem e secagens são necessários para retirar impurezas;

- Mesmo com a coleta seletiva, as inúmeras variações do resíduo plástico precisam ser classificadas quanto ao tipo de resina. Apesar de existir uma norma para isso (NBR 13.230 - Reciclabilidade e identificação de materiais plásticos, da Associação Brasileira de normas Técnicas – ABNT) há problemas de mistura de resinas sem a identificação individual na embalagem, presença de pigmentos variados (embalagens coloridas), aditivos diversos, cargas, entre outros;
- A adequação da resina reciclada para uma determinada aplicação depende da demanda desta aplicação e da natureza da contaminação resultante do uso anterior da embalagem. Somado a isso, as resinas virgens são fabricadas com propriedades específicas (grades) de acordo com as necessidades da aplicação final. (Costa, et al. 2014)

3. COMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS

3.1. Produção de Blendas e Compósitos

A blenda é uma mistura física de dois ou mais polímeros, sem reação química intencional entre os componentes, com o intuito de obter um novo material com propriedades intermediárias. As interações moleculares entre as cadeias poliméricas são predominantemente do tipo secundária (intermolecular), como as de Van der Waals, dipolo-dipolo, ligações hidrogênio, etc. Para ser considerada uma blenda, os compostos devem ter concentração acima de 2% em massa do segundo componente. A produção de blendas poliméricas pode ser feita através de processos físicos, como, por exemplo, através da solubilização, mistura mecânica e reticulados poliméricos interpenetrantes (Canevarolo 2006).

Uma blenda pode ser miscível, imiscível ou parcialmente miscível, ou seja, quando miscível é possível misturar tão bem a ponto de suas cadeias estarem interpenetradas, gerando uma única fase com comportamento físico-químico intermediário ao comportamento de cada componente individualmente. A

miscibilidade depende das características termodinâmicas de seus componentes, compatibilizada ou não, dependendo do interesse tecnológico (Canevarolo 2006).

Conforme a Norma American Society for Testing and Materials (ASTM D3878 – 95), a definição de material compósito consiste em uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material com certas propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente. Os materiais que constituem o compósito são chamados de fases, sendo que uma delas é descontínua, denominada de reforço, sendo responsável por fornecer resistência ao esforço e a outra fase é contínua, chamada de matriz, correspondendo ao meio de transferência desse esforço. Dessa forma, as propriedades dos compósitos são influenciadas pelas propriedades dos materiais das fases constituintes, pela distribuição e interação entre o reforço e a matriz. Assim, a finalidade da combinação dos materiais é promover características específicas para o compósito, dependendo da aplicação (Calegari e Oliveira 2016).

Nesta pesquisa comparamos os resultados obtidos por uma blenda, composta por vários tipos de polietileno reciclado, com um compósito desta blenda reforçado com fibra de bambu. Uma blenda miscível, com apenas uma fase, reforçada com um material biodegradável e quimicamente tratado, para que consiga uma boa adesão com a matriz e obtenha melhora em algumas propriedades, dentre elas a resistência a tração.

A solubilização de um polímero é um processo físico reversível, que não altera a estrutura química na cadeia polimérica. Este processo consiste em dissolver polímeros em um solvente simples ou uma mistura de solventes, após os polímeros sofrerem uma interação molecular entre as cadeias o solvente é evaporado (Canevarolo 2006). As blends por reticulados poliméricos interpenetrantes são produzidas por uma mistura polimérica, onde os componentes estão na forma de reticulados e formam um único reticulado, sem que haja qualquer tipo de reação química entre eles. A mistura mecânica envolve aquecimento e alto cisalhamento é o método mais utilizado industrialmente por

razões econômicas e praticidade pois permite a mistura de polímeros em grande escala (Luna, et al. 2015).

A blenda utilizada nesta pesquisa foi fabricada pela empresa S. L. Plastic, localizada no interior do Ceará, através de um dos métodos da mistura mecânica, a extrusão. Após todo o processo de trituração, limpeza, secagem parcial o polímero vai para a aglutinadora, onde ocorre a misturas das matérias primas nas proporções preestabelecidas e a completa secagem, após isto, o polímero está pronto para ir à extrusora.

No primeiro passo da extrusora, as partículas poliméricas foram aquecidas até serem fundidas. Na região intermediária, a temperatura do polímero aumenta gradativamente acima do ponto de fusão, permitindo melhor fluidez, ao passo que qualquer partícula sólida possa atingir temperaturas de fusão igualmente. Na região final da extrusora, o polímero fundido tem que alcançar um estado termicamente homogêneo. Quando o material deixa a extrusora ele é, então, resfriado normalmente até a temperatura ambiente (Santos e F° 2003).

Os compósitos foram obtidos por moldagem com controle de pressão e temperatura. Os pellets da blenda foram fundidos, colocado no molde e pressionado junto do material de reforço, ocorrendo a percolação do polímero através do material de reforço e o escoamento do polímero fundido ao longo do plano do material de reforço. Para os compósitos poliméricos termoplásticos ocorrem o cisalhamento intralaminar ao longo da direção das fibras e o deslizamento interlaminar das camadas, em diferentes orientações (Nogueira, Marlet e Rezende 1999).

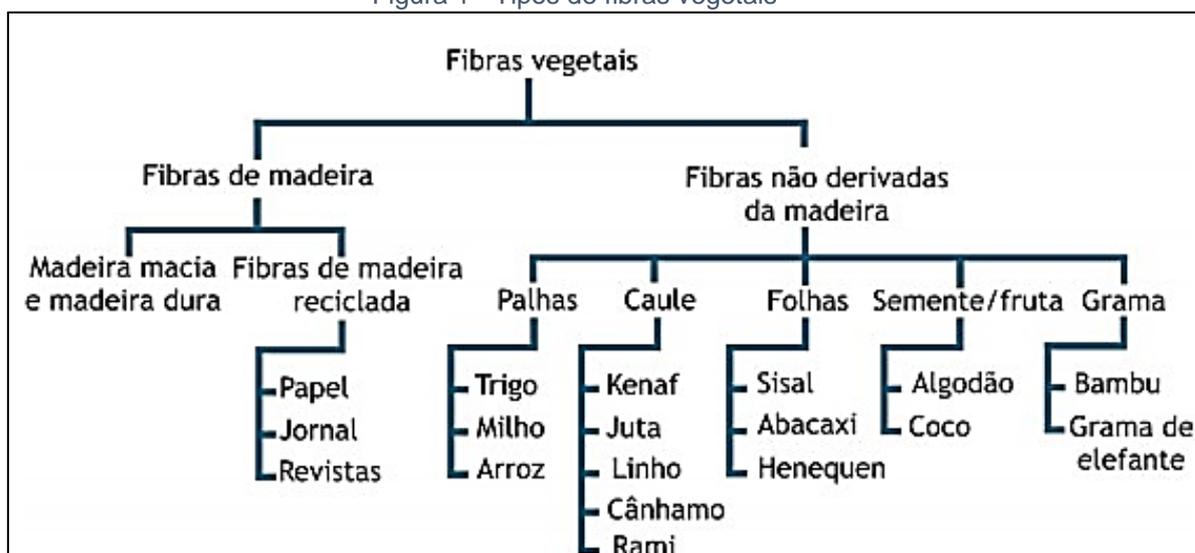
3.2. Fibras naturais

As fibras Naturais Vegetais se apresentam em abundancia na natureza e são a maior classe de materiais renováveis. Elas possuem vantagens nos aspectos socioambientais quando usadas como elemento de reforço ou de carga volumétrica em compósitos, pois são de baixo custo e biodegradáveis. Estas podem substituir as fibras sintéticas com eficiência, desde que as propriedades

e regularidade sejam mantidas, resultando em vantagens socioambientais e econômicas (Alain 2009).

As fibras naturais podem ser identificadas com base na sua origem, que podem ser: vegetal, animal ou mineral. As fibras vegetais são as mais utilizadas como reforços em compósitos podendo ser oriundo da madeira ou não, sendo seus principais constituintes a celulose, a hemicelulose, a lignina, as pectinas e as ceras. As fibras de madeira podem ser extraídas de madeiras macias ou duras ou ainda podem ser recicladas (Calegari e Oliveira 2016). As fibras não derivadas de madeira podem ser extraídas de diversas partes das plantas, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de fibras vegetais



Fonte: (Calegari e Oliveira 2016)

As fibras vegetais mais utilizadas como material de reforço em compósitos poliméricos são as fibras de sisal, coco, juta e banana, além de fibras de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e bambu. A extração das fibras naturais a partir de resíduos agrícolas é mais uma forma de reciclagem que pode ser bastante explorada num país voltado pra agricultura como o Brasil. A utilização de subprodutos agrícolas, como uma fonte de fibras naturais, ajuda na preservação da terra e dos recursos naturais necessários para o cultivo de novas fibras, assim, é benéfica para a agricultura e contribui para solucionar o problema da eliminação dos resíduos agrícolas. No Brasil, há uma grande variedade de fibras vegetais devido à biodiversidade existente no território do País, como: sisal,

coco, juta, curauá, fibra de bagaço de cana-de-açúcar e outras, com diferentes propriedades químicas e físicas (Calegari e Oliveira 2016). Na Figura 2 é possível visualizar algumas fibras brasileiras que possuem potencial para serem utilizadas como reforço em compósitos.

Figura 2 - Diferentes tipos de fibras. A) Bagaço de cana-de-açúcar, B) Juta, C) Curauá, D) Bananeira, E) Carnaúba, F) Sisal, G) Coco, H) Palha de arroz, I) Palha de milho, J) Palha de trigo e K) Bambu



Fonte: (Calegari e Oliveira 2016) (Materia Brasil s.d.) e (Silva 2010)

Essas fibras possuem como características boas propriedades mecânicas, baixa massa específica, baixo custo, boa compatibilidade com diversos polímeros, que utilizadas nas proporções certas, fazem desse material um importante reforço em compósitos de matriz polimérica termoplástica. Porém a maior vantagem é serem naturais, pois possuem rápida biodegradabilidade e fácil reflorestamento (Baley e Alain 2012). Além da não liberação de componentes tóxicos na sua degradação, as plantações auxiliam no sequestro do carbono da atmosfera o que ajuda a combater o aquecimento global e o efeito estufa.

A utilização de fibras naturais possui limitações quando são associadas com compósitos de matriz polimérica em relação a temperatura de

trabalhabilidade. As fibras naturais iniciam sua degradação em temperaturas acima de 190°C, perdendo as suas propriedades gradativamente. As matrizes poliméricas possuem uma faixa de trabalhabilidade entre 160°C e 250°C, limitando as fibras naturais às matrizes que não excedam o limite de temperatura das mesmas. Outro fator que precisa de um cuidado especial é o tempo de colheita, que deve ser respeitado. Se realizada antes ou depois do tempo de extração, resultam numa menor qualidade da fibra. As condições climáticas e o solo devem ser adequados para o plantio, pois esses fatores também proporcionam uma redução considerável na qualidade das fibras (Baley e Alain 2012). O que inibe a produção em larga escala de produtos reforçados com estas fibras é a falta de conhecimento específico, existem poucos estudos voltados para essa área. A extração das fibras ainda é um processo bastante artesanal.

A compatibilidade das fibras com a matriz polimérica está relacionada com a forma e os teores de lignina que se encontram nas fibras, e ela é influenciada pelo solo plantado, tempo de colheita, secagem e tipo de tratamento. As fibras por serem lignocelulósicas polares e hidrofílicas, em sua composição temos hidroxila (-OH) em sua superfície, dificultando a adesão com as matrizes poliméricas poliolefínicas, como o polietileno, que são hidrocarbonetos apolares hidrofóbicos, dependendo muito da lignina que está presente nas fibras (Lemos e Martins 2014).

Outra potencial desvantagem das fibras vegetais é a elevada absorção de água que ocorre devido aos grupos hidroxila da celulose, o que pode ocasionar baixa adesão entre as fibras e a matriz. Assim, durante o processamento de compósitos, é importante realizar a secagem das fibras (Calegari e Oliveira 2016). Além da secagem é importante a realização de tratamentos químicos nas fibras. O efeito do tratamento químico na superfície da fibra reduz a absorção de umidade, pois aumenta a hidrofobicidade da superfície devido a ligações de longas cadeias de hidrocarbonetos. As adições desses agentes penetram na parede celular através dos poros superficiais depositando-se na região interfibrilar restringindo a entrada de água (Barbosa 2011).

A utilização de resíduos de polímeros termoplásticos provenientes de embalagens para novas aplicações por meio da reciclagem mecânica é uma alternativa interessante que pode conciliar aspectos econômicos com benefícios ambientais. Neste sentido, o estudo para a adequação e modificação dos materiais poliméricos é um ponto de grande importância. A aplicação de materiais lignocelulósicos como um componente de reforço em compósitos poliméricos, principalmente na indústria automobilísticas, tem chamado a atenção por causa de seus baixos preço e peso específico. Reforços lignocelulósicos oferecem várias vantagens em relação aos inorgânicos, como baixa densidade, alta deformabilidade, baixa abrasividade aos moldes e aos equipamentos de mistura, apresentando ainda baixo custo. Deste modo, a reciclagem de resíduos termoplásticos de embalagens na forma de compósitos com fibras vegetais apresenta grande potencial de viabilidade técnica e econômica (Gandara, Gonçalves e Saron 2017).

3.3. Fibras de bambu

No Brasil existem aproximadamente 325 espécies nativas de bambu, das 1.250 espécies catalogadas no mundo. A utilização dos colmos de bambu possui um período ideal de corte, onde já tem atingido a maturação ideal, esse período depende da espécie. As entouceirantes precisam de 3 anos para as células do colmo atingirem a maturação, já as alastrantes precisam de 5 anos para estarem em condições de utilização. Além de possuir a idade considerada ideal por ter atingido a maturação, o período para ser utilizado não pode ser excessivo, pois as condições de resistência mecânica, que são as melhores nessa idade, sofrem variações significativas com o envelhecimento do colmo (Ostapiv 2011).

Tanto os colmos de bambu como o material lignocelulósico extraído destes colmos, têm boas propriedades mecânicas de resistência à tração, compressão e flexão além de boa elasticidade e tenacidade. Assim como no caso da madeira, os colmos de bambu e o material lenhoso derivado destes colmos também apresentam uma série de deficiências e anomalias que dificultam e limitam o seu uso industrial, a seguir são apontadas algumas destas deficiências do material:

- Pequenos diâmetros dos colmos quando comparado aos troncos das árvores.
- Estrutura tubular dos colmos com paredes finas e volume vazio no centro.
- Conicidade dos colmos.
- Diferenças físicas significativas do material obtido da região da base, do meio ou do topo do colmo.
- Presença de cera protetora sobre a superfície do colmo que melhora as características de escorregamento e dureza do mesmo, porém, dificulta a aplicação de adesivos e resinas em ripas e lascas.
- Tendência dos colmos de bambu a racharem devido à ausência de feixes de vasos e fibras com disposições tangenciais e radiais na região dos entre-nós.
- Os colmos de bambu contêm várias substâncias nutritivas como o amido e açúcares, que atraem insetos e fungos.
- A facilidade em se deteriorar impede que colmos não tratados sejam armazenados durante longos períodos de tempo.
- Os colmos de bambu são mais difíceis de serem processados industrialmente do que os troncos das árvores. Isto se deve principalmente a ausência de equipamentos e processos industriais adequados para trabalhar os colmos.
- A presença de silício nos colmos torna o material abrasivo, o que causa o desgaste prematuro das ferramentas de corte, especialmente as de aço rápido (Ostapiv 2011).

Na Figura 3 podemos notar a conicidade do colmo.

Figura 3 - Parte do bambu vista superior e vista lateral



Fonte: Autor



Fonte: Autor

No Norte e Nordeste brasileiro o bambu e seus derivados praticamente não são aproveitados comercialmente, nas outras regiões um pouco mais. Em escala mundial temos a China e a Índia como maiores produtores (Salan e Pongen 2008). No Brasil o comércio de bambu está restrito principalmente ao artesanato. A falta de incentivos, inovação tecnológica, políticas públicas, pesquisas e testes mecânicos e biológicos são os responsáveis pela falta de exploração desse recurso natural, que comprovadamente possui características desejáveis de resistência, flexibilidade, facilidade de produção, maturação e crescimento rápido. Apesar das boas características tratamentos são necessários para aumentar sua durabilidade (Amorim Rosa, et al. 2016).

Nos países latino-americanos e orientais o bambu é utilizado na construção civil, artesanato, indústria moveleira, de celulose, alimentícia e nos setores químicos e de energia. Os mais antigos relatos de utilização do bambu vêm da China e datam entre 1600 A.C. e 1100 A.C. (Amorim Rosa, et al. 2016). Índia e China possuem mais estudos e pesquisas na área além de um melhor aproveitamento desse recurso.

3.4. Micromecânica dos compósitos

A principal dificuldade em projetar produtos a partir de materiais compósitos reforçados com fibras, é predizer as propriedades do material final. A falta de conhecimento de todas as propriedades mecânicas, de todos os componentes utilizados na fabricação do compósito, prejudica a utilização do mesmo no projeto de produtos e, pode, muitas vezes, depreciar o projeto, e até mesmo inviabilizá-lo. Por isso a importância do estudo da micromecânica dos compósitos, com o conhecimento prévio de como cada fase se comporta separadamente pode-se viabilizar a pesquisa de modo que o resultado da fabricação seja prevista e siga normas claras de utilização e segurança (Casaril, et al. 2007).

A orientação do carregamento e como as fibras estão orientadas são as variáveis das equações pra dizer o modulo de elasticidade desse novo material. Nessas equações imaginaremos uma condição perfeita em que as fibras aderissem completamente com o polímero sem deixar bolhas e livre de qualquer

vazio. Nesta pesquisa temos três tipos de compósitos e vamos gerar uma equação para cada.

Segundo (MELO 2016) no compósito com fibras orientadas na vertical podemos considerar um carregamento na direção longitudinal, este é suportado pela matriz polimérica e pelas fibras que o contém, logo, podemos escrever:

$$F_t = F_m + F_f$$

Onde F_t é a força total aplicada, F_m a força suportada pela matriz e F_f a força suportada pela fibra. Recordando a tensão é dada por $\sigma = F/A$, podemos reescrever (1) como:

$$\sigma_t = \sigma_m \frac{A_m}{A_t} + \sigma_f \frac{A_f}{A_t} \Rightarrow \sigma_t = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

Onde V_m e V_f são as frações volumétricas da fibra e da matriz no compósito. Com a nossa consideração de homogeneidade, as deformações da fibra e da matriz são as mesmas no compósito, e podemos escrever $\varepsilon_t = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ e recordando que o módulo de elasticidade é determinado como $E = \sigma/\varepsilon$, podemos escrever:

$$\frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f \Rightarrow E_t = E_m V_m + E_f V_f$$

No compósito com as fibras orientadas na horizontal analisaremos o carregamento transversal fazendo uma analogia com molas em paralelo para as fibras e a matriz. Na situação em que o carregamento aplicado é à 90° do ângulo de aplicação do carregamento longitudinal, as tensões nas fibras e na matriz podem ser escritas como:

$$\sigma_t = \sigma_m = \sigma_f = \sigma$$

Como a deformação total agora dependerá da deformação da fibra e da matriz, $\varepsilon_t = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f$, substituindo $\varepsilon = \sigma/E$, e cancelando os termos iguais na equação, podemos escrever:

$$\frac{1}{E_{tt}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \Rightarrow E_{tt} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m}$$

Para o compósito com fibras orientadas aleatoriamente temos que incluir um fator K que é determinante para a predição da influência das fibras nos compósitos. A equação é semelhante a (1) com a inclusão do fator.

$$E_{cd} = E_m V_m + K E_f V_f$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais utilizados

Os componentes desse trabalho são respectivamente a matriz polimérica, a fase dispersa e os reagentes de modificação superficial de fibras poliméricas. Para a matriz, utilizou-se polietileno reciclado (Polietileno Branco Reciclado, Polietileno Misto Reciclado e Polietileno Linear Reciclado) para a produção da blenda (que serviu como matriz para os compósitos) e três compósitos.

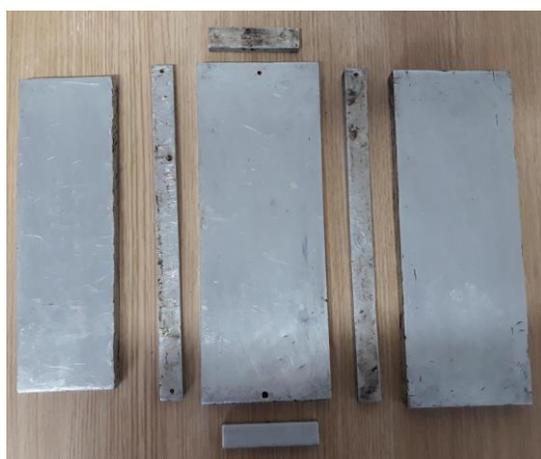
Fase dispersa: Foi colhido Bambu da família Bambusa de espécie Vulgaris (*Bambusa Vulgaris*), de touceiras controladas da Universidade Federal do Ceará. Do bambu retirou-se as fibras para reforçar os três compósitos que nomeamos como compósito com distribuição de fibras horizontalmente (CFH), Compósito com distribuição de fibras verticalmente (CFV) e compósito com distribuição de fibras aleatoriamente (CFA). A blenda e os compósitos tiveram suas propriedades mecânicas avaliadas e comparadas.

Reagentes: Todos os reagentes utilizados, foram cedidos pelo LPT, no Departamento de Química da UFC. Os reagentes foram: Hidróxido de Sódio, Hipoclorito de Sódio, Ácido Sulfúrico, Ácido Acético, Anidrido Acético e Água Destilada. Reagentes responsáveis por aumentar a adesão da fibra com a matriz polimérica.

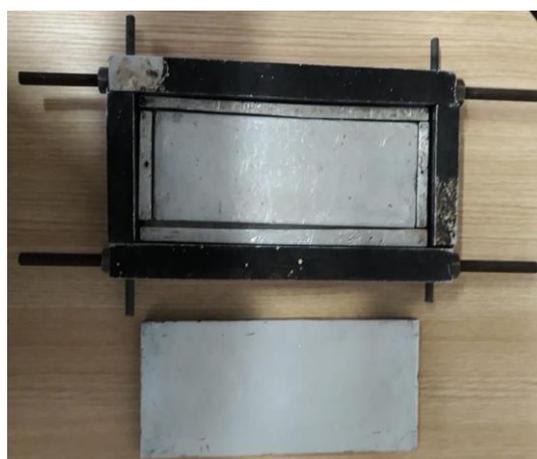
4.2. Métodos utilizados para a produção da blenda

A placa da blenda utilizada para comparar os resultados com os compósitos foram realizados no LAMEFF, foi utilizado 60g da blenda e ela foi produzida pelo método de moldagem com controle de pressão e temperatura. O molde utilizado para a produção das placas era todo de alumínio mostrado na Figura, pois o material bastante antiaderente evitava perdas de massa. O molde com a blenda era colocado sobre uma chapa ligada na energia para que os grânulos fossem fundidos, a temperatura era controlada por meio de um termômetro, não podendo ultrapassar a temperatura dos 180°C, evitando assim qualquer perda de propriedades do polímero. Após todo o polímero fundido o molde de alumínio era colocado dentro de um aparato de ferro mostrado na Figura, que tinha a função de evitar os vazamentos pela borda, e era aplicado uma pressão para que haja uma distribuição igualitária do polímero por toda a extensão do molde, responsável por deixar a espessura da placa o mais uniforme possível em toda sua extensão. Esse cuidado é necessário para que após a extração dos corpos de prova da placa os mesmos estejam de acordo com a norma ASTM D638-96 e ASTM D3039-75.

Figura 4 - Molde utilizado para a fabricação das placas



Fonte: Autor



Fonte: Autor

4.3. Modificação química da superfície das fibras

Primeiramente as fibras passaram por um processo de cozimento em água deionizada e aquecidas a 80 °C, durante 30 minutos para tirar as

impurezas. A mercerização foi feita no intuito de retirar ceras, lignina e pectina das fibras. Esse procedimento foi realizado com base nos trabalhos de (Siqueira 2006) que indicaram um acréscimo das propriedades mecânicas das fibras ao final do processo. Aqui, 2% de NaOH em solução aquosa foi utilizado. A proporção de fibras em solução foi de 10 g de fibra para cada 100 ml de solução. O processo foi realizado à 80°C por uma hora. As fibras foram lavadas em água deionizada abundantemente até obter pH próximo de sete.

A acetilação foi realizada seguindo o procedimento de (d'Almeida, Calado e Barreto 2005). Nesse processo, uma solução de ácido acético e anidrido acético (1,0:1,5 em massa) com 20 gotas de ácido sulfúrico a cada 500 ml de solução como catalisador foi realizado. O procedimento ocorreu à 100°C durante uma hora. As fibras foram lavadas em água deionizada abundantemente até obter pH próximo de cinco.

O processo de mercerização seguido de acetilação foi realizado nas fibras, pois concluiu-se com o procedimento de (MELO 2016) que era o melhor processo para se obter fibras com boas propriedades mecânicas e compatibilidade química com materiais apolares.

4.4. Métodos utilizados para a produção do compósito

O método utilizado para a produção dos compósitos foi o mesmo da blenda, moldagem com controle de pressão e temperatura, com algumas diferenças como na quantidade de polímero utilizado 48g, a quantidade de fibra de bambu foi de 7,6g, com estas quantidades obtivemos uma placa de mesmo volume com um peso final menor em relação a blenda de 7,33%. Outra diferença está no cuidado na hora de colocar as fibras, que só vão para o molde após a completa fundição do polímero, elas precisam ser distribuídas de uma forma que elas fiquem submersa no polímero sem encostar nas paredes do molde.

4.5. Ensaio de Tração

Foram utilizadas três normas a ASTM D638-96 (para a blenda), a ASTM D3039-75 adaptada (para os compósitos) e a ASTM D3379-75 foi utilizada para o ensaio de fibras têxteis, adaptada para utilização das fibras naturais vegetais.

Elas determinam além das dimensões dos corpos de prova os procedimentos necessários para a realização dos ensaios, foi necessária uma adaptação para que tivéssemos uma quantidade mínima de corpos de prova para obter resultados mais conclusivos. A máquina utilizada nesse processo foi a EMIC localizada no LEM, com características de velocidade de deslocamento de 2 mm/min e célula de carga com capacidade máxima de até 100 KN.

Seguindo a norma os parâmetros foram definidos na máquina e os ensaios foram realizados nos corpos de prova tanto da blenda como dos compósitos, nos dando a tensão suportada pelo material e a deformação a ele imposta através de um gráfico de tensão VS. deformação.

4.6. Microscopia com Eletrônica de Varredura

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura foi utilizada para observar a morfologia das estruturas das fibras e a morfologia na superfície da fratura das amostras usadas nos ensaios de tração apresentadas nos compósitos, analisando o efeito das modificações superficiais proporcionadas pelos tratamentos químicos e a interface de separação fibra/matriz, e na blenda. Para conseguir obter as imagens foi feito uma metalização a vácuo com platina, o aparelho utilizado foi o MEV TESCAN VEJA XMU.

Como a análise em MEV de alta tensão necessita que uma descarga de elétrons atinja o polímero é necessário a realização de alguns procedimentos para que não ocorra o risco de degradação do mesmo, as amostras precisam ser coladas ao stub com fita de carbono de dupla colagem e metalizadas a vácuo. O MEV foi ajustado para 10.00 kV, foram analisadas cada fratura para aumentos de 100 e 500 vezes.

4.7. Difração de Raios X

Fibras de bambu pulverizadas tanto naturais como quimicamente modificadas foram analisadas por difração de Raios X. Análise responsável para determinar a cristalinidades das fibras, foram calculados através do método de Segal analisando os picos referentes ao halo cristalino e amorfo da difração de Raios X, conforme a equação abaixo:

$$I_c = \frac{P_c}{P_a + P_c} * 100$$

Onde I_c é o índice de cristalinidade do material, P_c a fração cristalina do difratograma e P_a a fração amorfa do difratograma.

A temperatura de obtenção das imagens foi de 300 K e as difrações foram colhidas por um difratômetro Xpert Pro, modelo MPD. O tubo de Cobalto (Co) com 40 KV foi utilizado. A escala de obtenção de picos em graus foi de 10° até 40°. Os índices de cristalinidade foram avaliados nas três fibras analisando os picos referentes ao halo cristalino e amorfo da difração dos Raios X. Os índices de cristalinidade nos dão um indicativo da sua resistência mecânica (Lakkad e Patel 1981).

4.8. Infravermelho com Transformada de Fourier

O processo foi realizado no laboratório do departamento de química. O equipamento utilizado para a obtenção dos espectros de infravermelho foi o IRTracer-100. As espectroscopias de infravermelho foram realizadas para as fibras naturais e modificadas elas foram obtidas na faixa de 400 a 2000 cm^{-1} com uma resolução de 1 cm^{-1} . As amostras na forma de filme pulverizado foram obtidas prensando as a uma pressão de 8 toneladas dissolvidos em pastilhas de brometo de potássio (KBr).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os tratamentos químicos realizados nas fibras de bambu modificam as fibras quimicamente, apesar de não aparentar mudanças visivelmente, a nível molecular é possível notar as diferenças que são responsáveis por provocar uma maior compatibilidade com o polímero. Nas imagens a seguir analisaremos a superfícies das fibras.

Figura 5 - MEV da fibra de bambu natural 500x

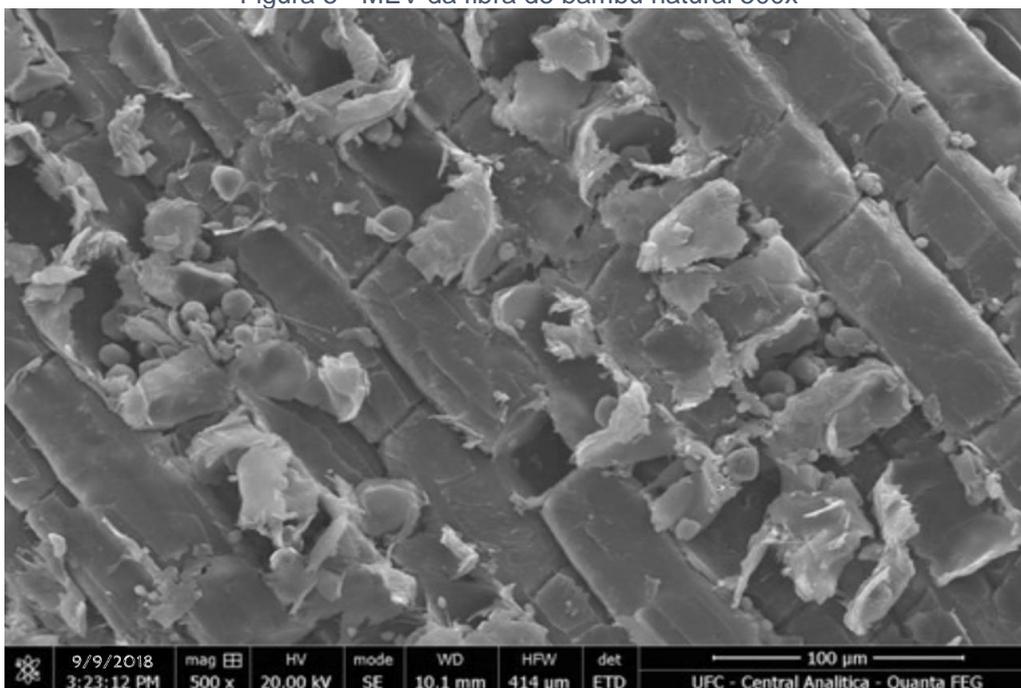
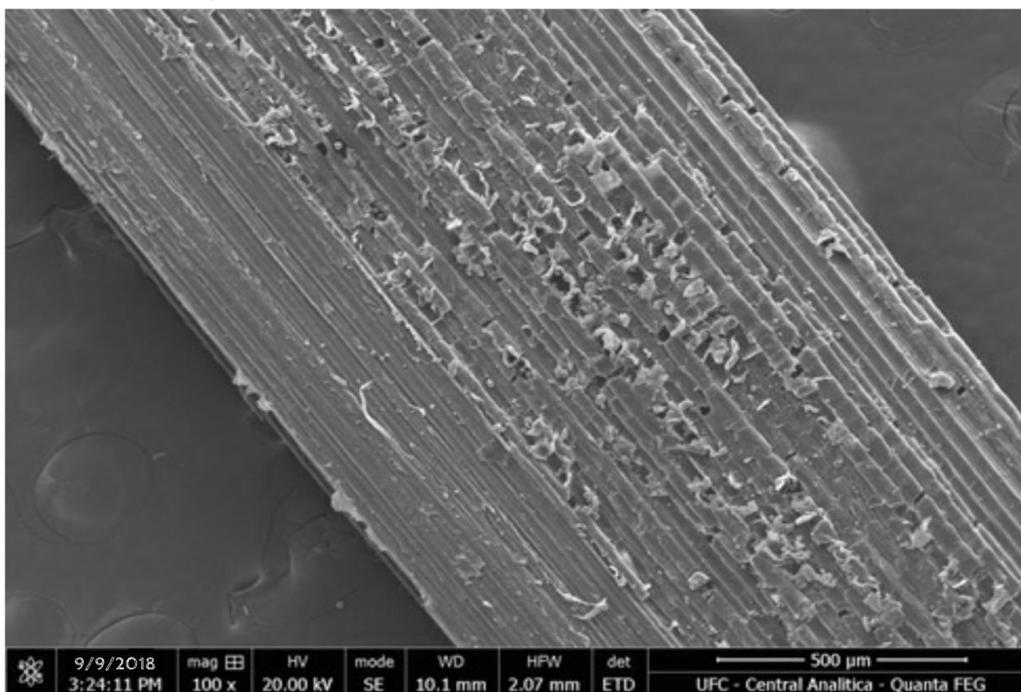


Figura 6 - MEV da fibra de bambu natural 100x



Fonte: central analítica UFC

Figura 7 - MEV da fibra de bambu tratada com 2% de NaOH 500 x

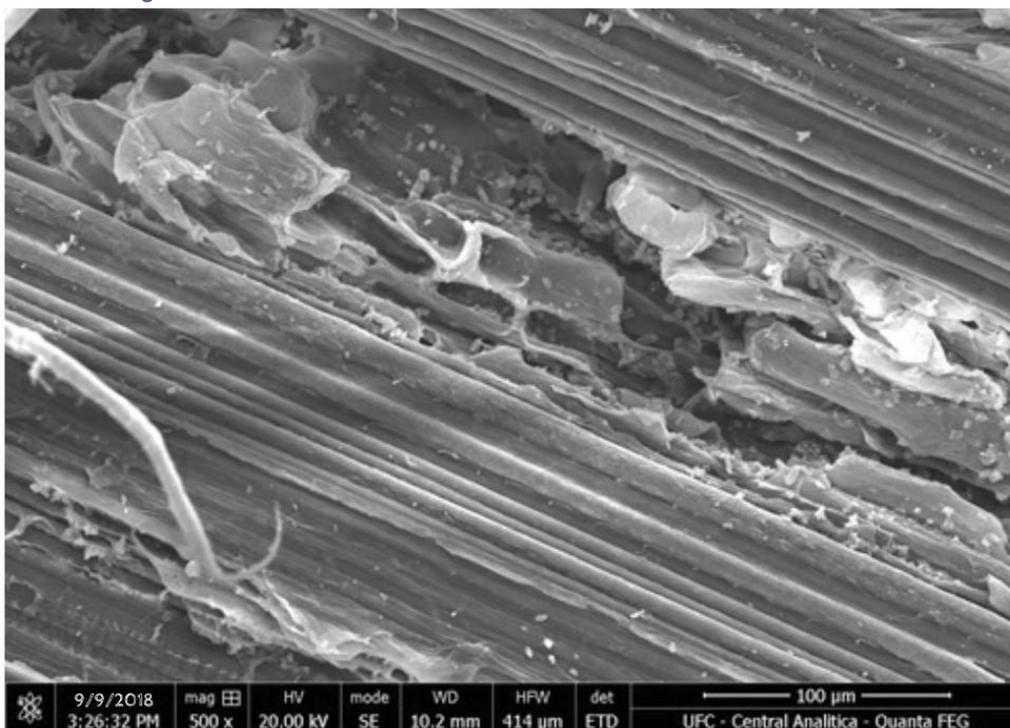
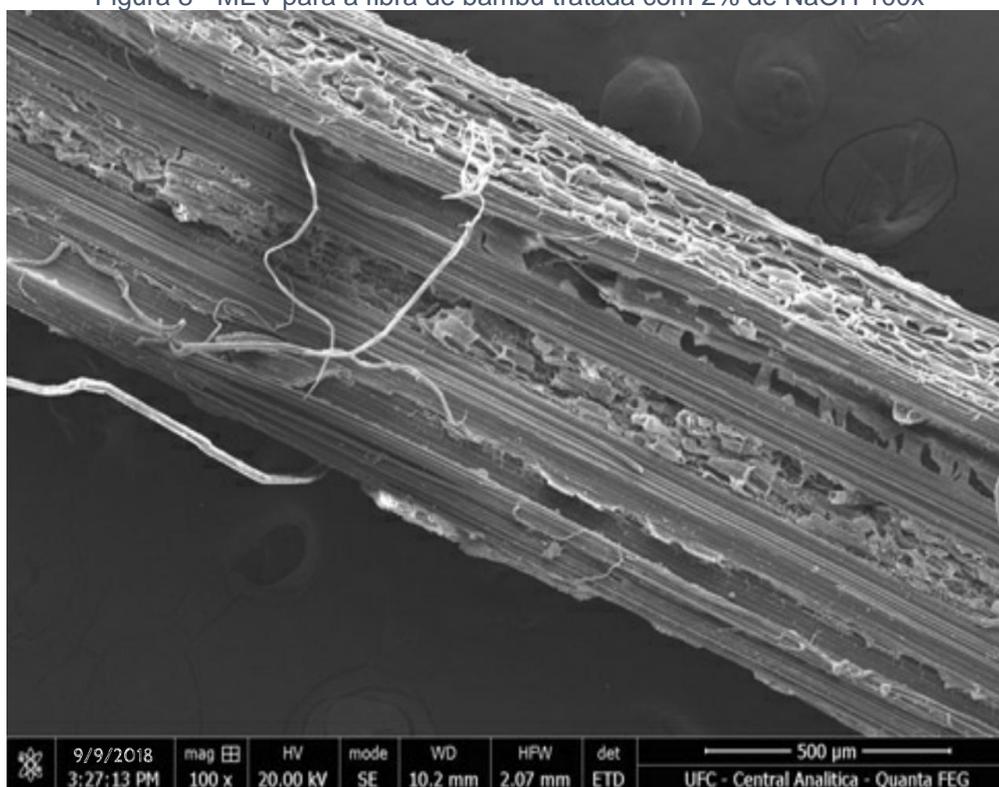


Figura 8 - MEV para a fibra de bambu tratada com 2% de NaOH 100x

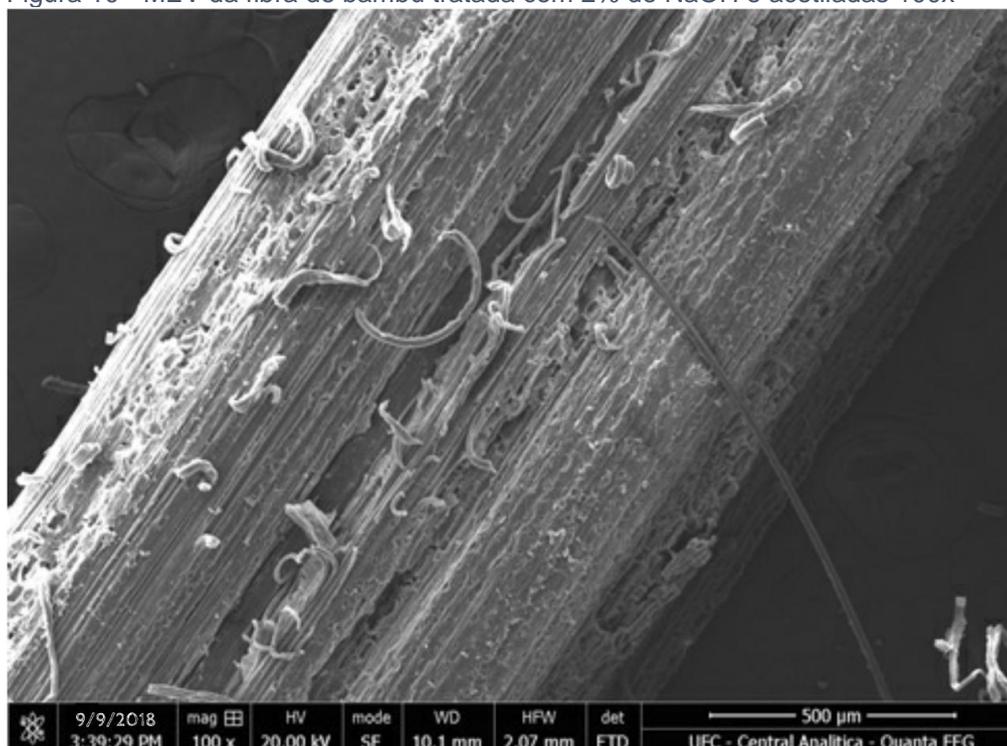


Fonte: central analítica UFC

Figura 9 - MEV da fibra de bambu tratada com 2% de NaOH e acetiladas 500x



Figura 10 - MEV da fibra de bambu tratada com 2% de NaOH e acetiladas 100x



Fonte: central analítica UFC

Com as imagens podemos notar as agressões que a fibra sofre com os tratamentos realizados. As figuras de 5 e 6 são para fibras naturais de bambu

com aumento de 500x e 100x. As figuras 7 e 8 são vistas as fibras modificadas com 2% de NaOH de bambu com aumento de 500x e 100x. Nas figuras 9 e 10, observamos a superfície das fibras acetiladas de bambu com aumento de 500x e 100x.

Nas figuras 5 e 6 podemos observar que a superfície fibrilar está parcialmente coberta, ao longo de todo o comprimento existem partículas que se repetem, sendo perceptíveis apenas as células de lignina e ceras da fibra, que são as matrizes das plantas. A sua estrutura celular repetitiva é aparente e mostra regularidade ao longo da superfície da fibra. Essa estrutura composta principalmente de lignina, prejudica a compatibilidade da fibra com o polímero pois a lignina em grande escala produz uma maior quantidade de hidroxilas livres o que dificulta a adesão da fibra com a matriz polimérica.

Nas figuras 7 e 8, são as fibras que passaram pelo tratamento superficial com NaOH à 2% com aumento de 500x e 100x, em comparação com as figuras 5 e 6 podemos notar a limpeza realizada após o processo de alcalinização. Este procedimento deixou as microfibrilas externas mais expostas sem deteriorar a estrutura microfibrilar. Para a acetilação, com processo inicial de mercerização 2% de NaOH, temos as figuras 9 e 10 com aumento de 500x e 100x nelas notamos que o processo de acetilação realizado degradou superficialmente a camada de microfibrilas da fibra, visto que foi perceptível a extração de algumas fibrilas da superfície da amostra analisada.

Nas figuras a seguir analisaremos as microscopias da região da fratura dos materiais compósitos e da blenda, para avaliarmos a compatibilidade da fibra com o polímero e a produção das placas.

Figura 11 - MEV da fratura da blenda aumentada 500x

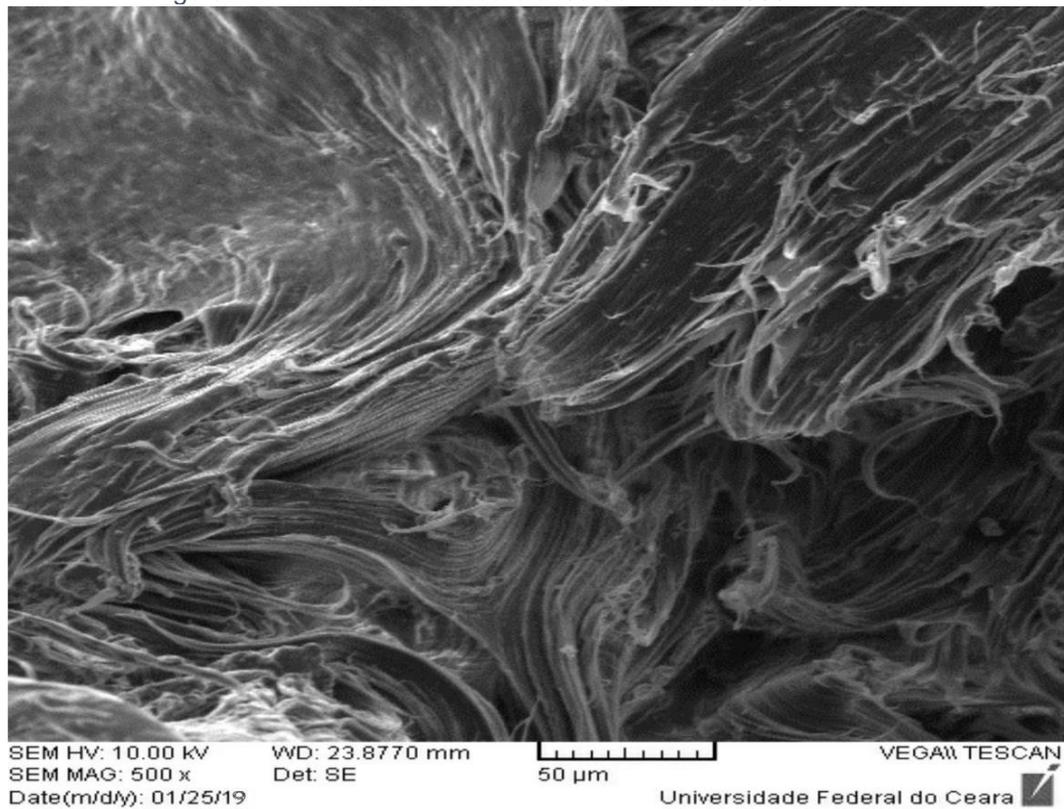
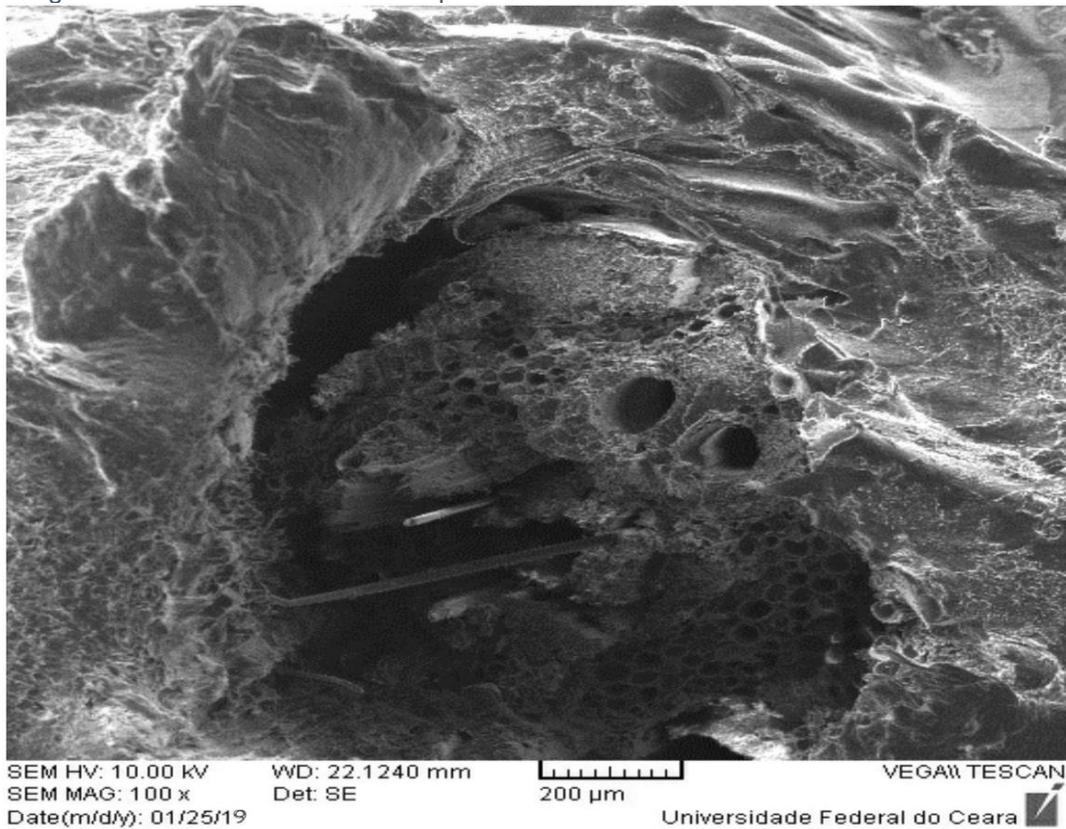


Figura 12 - MEV da fratura do compósito de PE reciclado com fibra tratada 100x



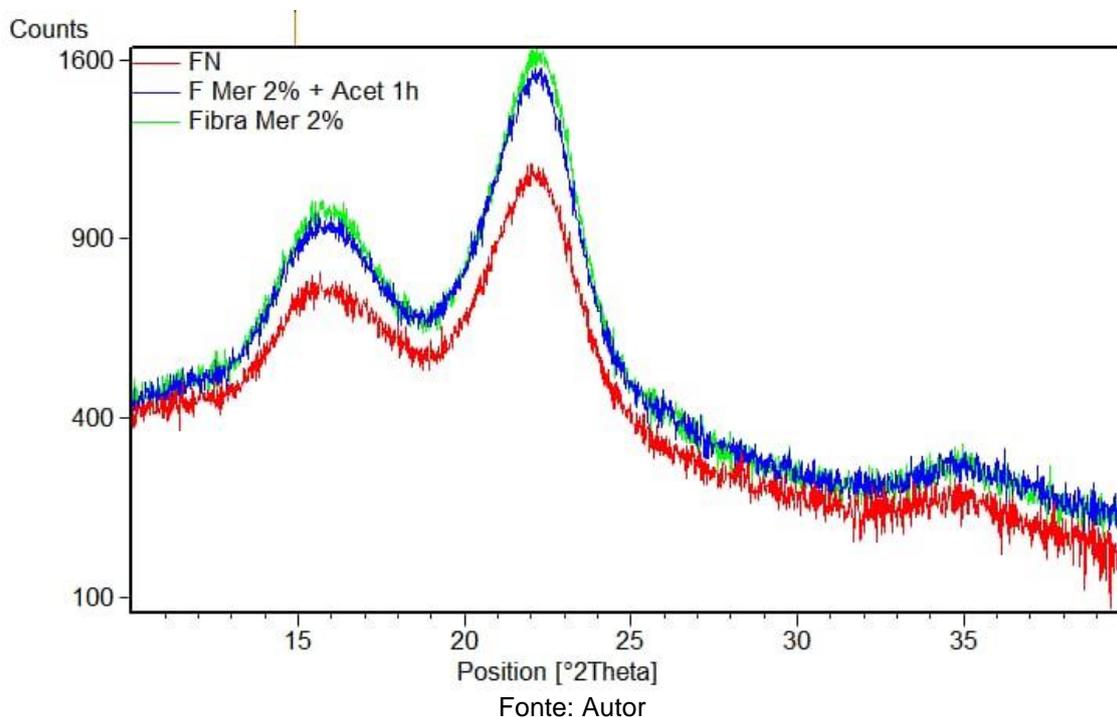
Fonte: central analítica UFC

Na figura 11 temos a blenda de PE reciclado aumentada 500 vezes, notamos que a fratura da blenda é composta por vários fios o que caracteriza uma deformação continua ao longo de toda a extensão do corpo de prova. Na figura 12 temos o compósito de PE reciclado reforçado com fibra de bambu tratada com 2% de NaOH e acetiladas aumentada 100 vezes. Percebemos que a fibra aderiu bem a matriz polimérica, pois não vemos uma superfície vazia entre o feixe de fibras e a matriz polimérica, também se nota que as fibras tornaram a fratura frágil pois ocorre a diminuição desses fios.

5.2. Caracterização das fibras naturais por Difração de Raios X

Com o índice de cristalinidade das fibras vegetais podemos analisar a eficácia das modificações feitas pelos tratamentos químicos realizados nas fibras. O índice de cristalinidade também tem ligação com as propriedades mecânicas da fibra e pode-se analisar através da difração de Raios X.

Figura 13 - Difratoogramas de Raios X das fibras naturais e modificadas



Na figura 13 temos os difratogramas das fibras naturais (FN) em vermelho, as fibras alcalinizadas (Fibra Mer 2%) em verde e as fibras acetiladas após a mercerização (F Mer 2% + Acet 1h) em azul. Na tabela 1 temos o índice de

crystalinidade das fibras analisadas e depois colocadas em percentual para uma análise mais simplificada

Tabela 1 - Fração de cristalinidade das fibras vegetais em função do tratamento

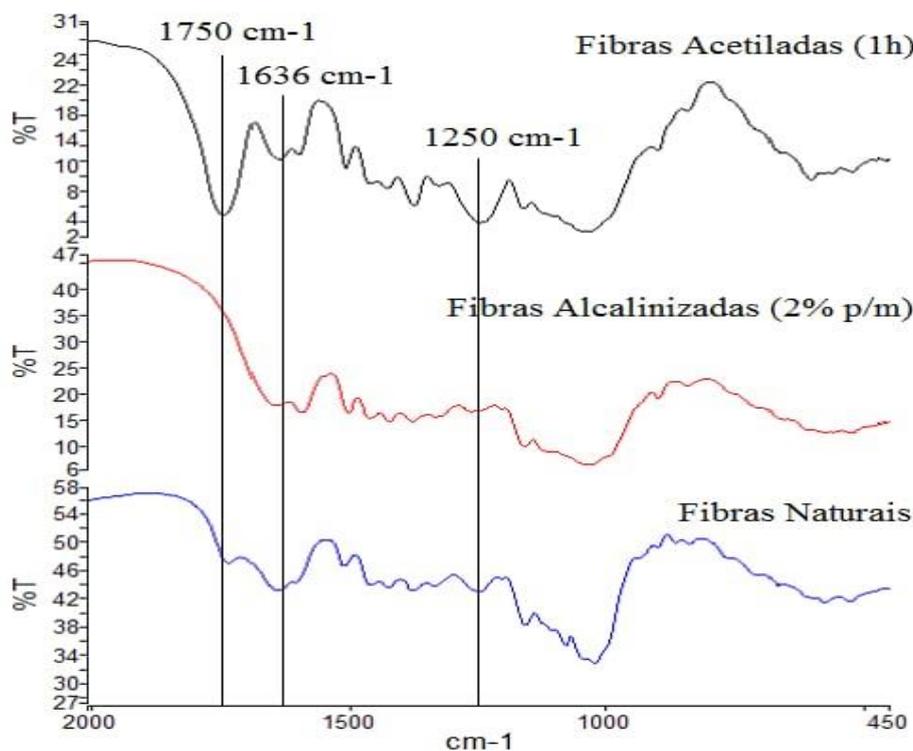
Tipo de Fibra	Índice de Cristalinidade (%)
Fibra de Bambu Natural	65,06
Tratada com NaOH 2%	68,14
Tratadas com NaOH 2% seguida de Acetilação por 1h	66,36

Na tabela 1 percebemos que a cristalinidade das fibras, após o processo de alcalinização, aumentou 3,08% em relação a fibra natural. Após a alcalinização houve uma redução de 1,78% em relação as fibras alcalinizadas e um aumento de 1,30% em relação a fibra natural.

5.3. Infravermelho com Transformada de Fourier

O IFTR foi avaliado para as fibras naturais, alcalinizadas e mercerizadas seguidas de acetilação com o intuito de analisar os tratamentos em relação aos grupos carbonilas. O espectro pode ser visto na figura abaixo:

Figura 14 - Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier das fibras.



Fonte: Autor

Comparando os três espectros realizados constata-se as modificações superficiais promovidas pelos tratamentos feitos nas fibras. Percebe-se nas fibras mercerizadas o desaparecimento do grupo carbonila (C=O), referente às bandas em 1750cm^{-1} , 1636cm^{-1} e 1250cm^{-1} . Nestes mesmos pontos nota-se o reaparecimento deste grupo para as fibras acetiladas, sugerindo um indicador de acetilação.

5.4. Ensaio de Tração nas Fibras

Os ensaios de tração foram realizados para as amostras de fibra natural, fibra alcalinizada e fibra acetilada. Abaixo, está a tabela com as médias dos resultados de tensão máxima na ruptura e módulo de elasticidade das fibras.

Tabela 2 - Tensão máxima na ruptura e módulo de elasticidade de fibras de bambu naturais e modificadas.

Tipo de Fibra	Tensão Máxima de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Fibra de Bambu Natural	378	11,8
Tratada com NaOH 2%	489	11,7
Tratadas com NaOH 2% seguida de Acetilação	426	9,3

Obs: Os resultados dos ensaios de tração estão apresentados no anexo 1 dessa monografia.

Na tabela 2 podemos observar que os tratamentos químicos realizados nas fibras proporcionaram um decréscimo no módulo de elasticidade e um acréscimo significativo na tensão máxima de ruptura. Para as fibras alcalinizadas tivemos uma diminuição de 0,1GPa no módulo de elasticidade e um aumento de 111MPa na tensão máxima de ruptura em relação as fibras naturais. Para as fibras mercerizadas a 2% de NaOH seguidas de acetilação, tivemos um decréscimo de 63MPa em relação as fibras apenas alcalinizadas e um ganho de 48MPa em relação a tensão máxima de ruptura para as fibras naturais, em relação ao módulo de elasticidade ocorreu uma dupla perda, 2,5GPa em relação as fibras naturais e 2,4GPa em relação as fibras alcalinizadas.

5.5. Produção dos Compósitos

O método de produção aplicado foi eficaz para a produção da placa formada apenas pela blenda e das placas compósitas. A fibra escolhida para reforçar os compósitos foi a alcalinizada seguida de acetilação, pela figura 12 percebemos

a boa adesão fibra/matriz. Na figura 15 estão apresentadas as placas fabricadas onde denominaremos como compósito reforçado com fibras orientadas verticalmente (CFV), compósito reforçado com fibras orientadas horizontalmente (CFH), compósito com fibras orientadas aleatoriamente (CFA) e na imagem 16 alguns dos corpos de prova usados para o ensaio de tração.

Figura 15 - Placa da blenda (1), Placa de CFV (2), Placa de CFH (3), Placa de CFA (4)



(1)

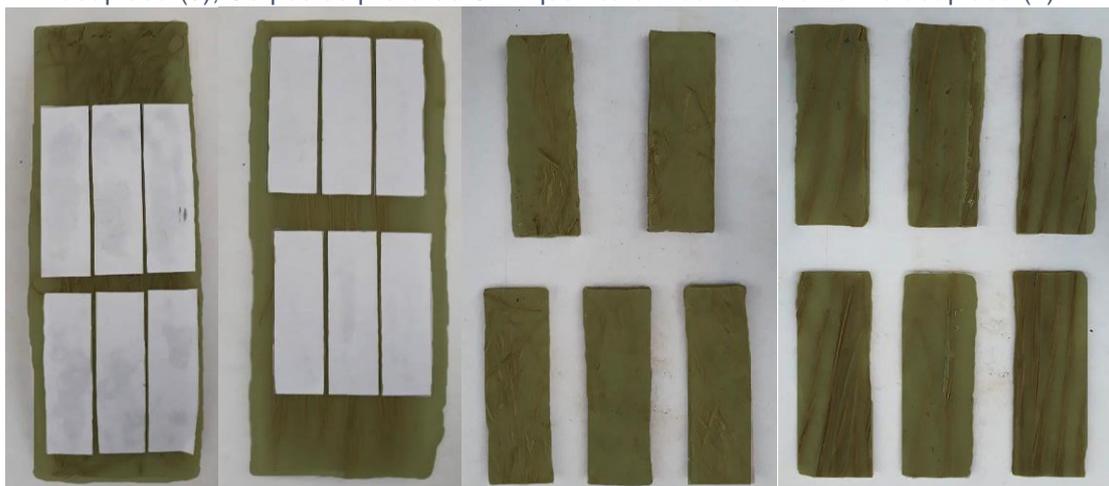
(2)

(3)

(4)

Fonte: Autor

Figura 16 - Placa de CFA com os moldes dos corpos de prova (1), Placa de CFV com os moldes dos corpos de prova (2), Corpos de prova de CFA que ficaram conforme a norma adaptada (3), Corpos de prova de CFV que ficaram conforme a norma adaptada (4).



(1)

(2)

(3)

(4)

Fonte: Autor

Nas tabelas abaixo estão as dimensões dos corpos de provas produzidos, medidos com um paquímetro universal da marca *Starrett* com resolução de

0,05mm, avaliando assim a eficácia na produção dos mesmos pois todas as placas geraram pelo menos 5 corpos de prova que ficaram com as espessuras dentro das normas adaptadas e com as médias bem próximas umas das outras.

Tabela 3 - Medidas corpos de prova da blenda

Blenda			
Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
1	20	3,4	100
2	20	3,6	100
3	20	3,9	100
4	20	3,85	100
5	20	3,8	100
Média	20	3,71	100

Tabela 4 - Medidas corpos de prova do compósito com fibras orientadas horizontalmente

CFH			
Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
1	20	3,55	100
2	20	3,2	100
3	20	3,5	100
4	20	3,7	100
5	20	3,15	100
6	20	3,8	100
Média	20	3,483	100

Tabela 5 - Medidas corpos de prova do compósito com fibras orientadas horizontalmente

CFV			
Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
1	20	3,7	100
2	20	3,85	100
3	20	3,5	100
4	20	3,5	100
5	20	3,45	100
6	20	3,4	100
Média	20	3,567	100

Tabela 6 - Medidas corpos de prova do compósito com fibras orientadas horizontalmente

CFA			
Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
1	20	3,45	100
2	20	3,75	100
3	20	3,6	100
4	20	3,9	100
5	20	3,55	100
Média	20	3,65	100

Com a produção do compósito, foi possível identificar as principais dificuldades na produção desse método, como o controle da temperatura pois a chapa apresentou defeito na regulagem da temperatura, foi preciso utilizar um termômetro para não deixar a temperatura passar de 180°C. o polímero aderiu bastante no molde, foi preciso usar desmoldante, mesmo assim tivemos um pouco de perda de massa, por isso a placa da blenda e a do compósito com distribuição de fibras aleatória geraram apenas 5 corpos de prova, pois o material aderiu ao molde deixando uma parte das placas de uma espessura não aceita nas normas. A obtenção da fibra é outra complicação, pois as fibras do bambu são bastantes ligadas dificultando sua extração em toda sua extensão, e os processos industriais são bem escassos, em todo a pesquisa a obtenção foi feita manualmente com auxílio de estiletos.

5.6. Ensaio de Tração na Blenda e nos Compósitos

Os ensaios de tração foram realizados para as amostras compósitas da placa plástica sem qualquer fibra, com fibras orientadas horizontalmente, verticalmente e aleatoriamente. Abaixo, estão as tabelas com os resultados de tensão máxima na ruptura e módulo de elasticidade dos compósitos produzidos.

Tabela 7 - Ensaio de tração da blenda

Blenda				
Amostra	Tensão Máxima de Ruptura (MPa)	Incerteza na Medida	Módulo de Elasticidade (MPa)	Incerteza na Medida
1	6,41	± 0,01	283,7	± 0,01
2	8,53	± 0,01	347,61	± 0,01
3	10,33	± 0,01	654,94	± 0,01
4	9,75	± 0,01	595,72	± 0,01
5	9,82	± 0,01	538,02	± 0,01
Média	8,968	± 0,0044	483,998	± 0,0044

Tabela 8 - Ensaio de tração do compósito com fibras orientadas horizontalmente

CFH				
Amostra	Tensão máxima de ruptura (MPa)	Incerteza na Medida	Módulo de Elasticidade (MPa)	Incerteza na Medida
1	4,983	± 0,01	561,6	± 0,01
2	3,45	± 0,01	631,6	± 0,01
3	4,608	± 0,01	729,5	± 0,01
4	5,209	± 0,01	774,6	± 0,01
5	3,074	± 0,01	672,2	± 0,01
6	5,451	± 0,01	772,9	± 0,01
Média	4,4625	± 0,004	690,4	± 0,004

Tabela 9 - Ensaio de tração do compósito com fibras orientadas verticalmente

CFV				
Amostra	Tensão máxima de Ruptura (MPa)	Incerteza na Medida	Módulo de Elasticidade (MPa)	Incerteza na Medida
1	28,39	± 0,01	2553	± 0,01
2	31,27	± 0,01	2562	± 0,01
3	21,88	± 0,01	1953	± 0,01
4	21,11	± 0,01	2042	± 0,01
5	21,3	± 0,01	2004	± 0,01
6	20,49	± 0,01	2174	± 0,01
Média	24,0733	± 0,004	2214,6667	± 0,004

Tabela 10 - Ensaio de tração do compósito com fibras orientadas aleatoriamente

CFA				
Amostra	Tensão Máxima de Ruptura (MPa)	Incerteza na Medida	Módulo de Elasticidade (MPa)	Incerteza na Medida
1	10,1	± 0,01	1205	± 0,01
2	14,79	± 0,01	1615	± 0,01
3	12,96	± 0,01	1261	± 0,01
4	15,07	± 0,01	1460	± 0,01
5	12	± 0,01	1360	± 0,01
Média	12,984	± 0,0044	1380,2	± 0,0044

Para as amostras da blenda pura, foi obtido de média 8,968Mpa na tensão Máxima de ruptura e média de 483,998Mpa no módulo de elasticidade. Já as amostras de CFH tivemos como média 4,4625Mpa na tensão Máxima de ruptura e média de 690,4Mpa no módulo de elasticidade. Os corpos de prova do CFV obtiveram média de 24,073Mpa na tensão máxima e 2214,667Mpa de média no módulo de elasticidade. Finalmente para as amostras do CFA foi obtido

12,984Mpa de média na tensão máxima de ruptura e média de 1380,2Mpa no módulo de elasticidade. Observamos com os resultados obtidos que todos os compósitos aumentaram significativamente o módulo de elasticidade em 206,402Mpa (42,64%), 1730,669Mpa (357,58%) e 896,202Mpa (185,16%) respectivamente. Para a tensão máxima de ruptura tivemos uma redução de 4,5055Mpa (50,24%) no CFH, já para o CFV o aumento foi de 15,105Mpa (168,43%) e para o CFA o ganho foi de 4,016Mpa (44,78%).

6. CONCLUSÕES

Para a realização dos estudos, o método de produção de compósitos por compressão foi eficiente para a produção das 4 placas em escala experimental, pois produziu os corpos de prova necessários para a análise, sem a necessidade de muito investimento em equipamentos.

Com a microscopia eletrônica de varredura constatamos uma boa adesão da fibra com a matriz, a influencia que os tratamentos químicos realizados nas fibras foram determinantes para essa boa adesão e para a melhora nas propriedades mecânicas no compósito, a mercerização por fazer uma limpeza retirando ceras, lignina e pectina das fibras, que acabam prejudicando as propriedades mecânicas da fibra, deixando as microfibrilas externas mais expostas sem deteriorar a estrutura microfibrilar e a acetilação apesar de deteriorar a estrutura microfibrilar extraindo algumas fibrilas, foi a principal responsável pela boa adesão matriz/fibra.

O IFRT deixou claro a importância da acetilação realizada, nas bandas 1750cm^{-1} , 1636cm^{-1} e 1250cm^{-1} os grupos carbonilas que desapareceram com a mercerização voltaram após a acetilação. O DRX comprovou o aumento do índice de cristalinidade das fibras com os tratamentos, com a alcalinização um aumento mais significativo, com a acetilação ocorreu uma pequena diminuição, mas o índice ainda ficou maior que o das fibras naturais.

Os ensaios de tração realizados nos mostraram que todos os compósitos tiveram um ganho no módulo de elasticidade comparado com a blenda. Em relação a tensão máxima de ruptura a orientação das fibras ao longo do

compósito foi determinante, o compósito com orientação horizontal teve uma redução, mas o compósito com orientação vertical onde a força solicitada atua o resultado foi bastante satisfatório quase triplicando a resistência, para o compósito com distribuição aleatória houve um ganho menor, mas importante pois se o material tiver uma força solicitada em diferentes planos o reforço das fibras de bambu atuará em todos.

7. Bibliografia

- Alain, B. B. *Ridigity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling*. Vol. 94. Polymer Degradation, 2009.
- Amorim Rosa, Rafael, Juarez Benigno Paes, Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, Graziela Baptista Vidaurre, e Ana Karla Freire de Oliveira. "INFLUÊNCIAS DA ESPÉCIE, TRATAMENTO PRESERVATIVO E ADESIVOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO BAMBU LAMINADO COLADO." *Ciência Florestal* 26, nº 3 (Julio/Setembro 2016).
- Baley, C., e B. Alain. *Nanoindentation contribution to mechanical characterization of vegetal fibers*. Composites Part B: Engineering, 2012.
- Barbosa, Anderson de Paula. "CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE BURITI." *Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) Rio de Janeiro. UENF, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campo dos Goytacazes, Dezembro de 2011.*
- Calegari, Eliana Paula, e Branca Freitas de Oliveira. "Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos." *Sustentabilidade em Debate* 7, nº 1 (janeiro/abril 2016): 140-155.
- Canevarolo, Sebastião V. "Ciência dos Polímeros." Cáp. 1, 26-27. São Paulo: Artiiber Editora Ltda., 2006.
- Casari, Alexandre, Eduardo Rovaris Gomes, Marcos Roberto Soares, Márcio Celso Fredel, e Hazim Ali Al-Qureshi. "Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas." *Revista Matéria* 12, nº 2 (2007): 408–419.
- Coltro, Leda, e Leda C. Duarte. "Reciclagem de embalagens plásticas flexíveis: contribuição da identificação correta." *Polímeros* 23 (Fevereiro 2013): 128-134.

- Costa, Helson Moreira da, Mônica Calixto de Andrade, Milena Diniz Lessa, e Valéria Dutra Ramos. "Cinética de cristalização não-isotérmica de resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD)." *Polímeros* 24 (Julho/Agosto 2014): 521-528.
- Coutinho, Fernanda M. B., Ivana L. Mello, e Luiz C. de Santa Maria. "Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações." *Polímeros* 13 (2003): 1-13.
- d'Almeida, Ana L. F. S., Verônica Calado, e Daniel W. Barreto. "Acetilação da Fibra de Bucha (*Luffa cylindrica*)." *Polímeros: Ciência e Tecnologia* 15, nº 1 (2005): 59-62.
- Ferreira, Roberto Luiz, e Ruth Marlene Santana. "Estudo comparativo da influência da razão de sopro nas propriedades de filmes tubulares de PEBD e PEAD." *Polímeros* 25 (Janeiro/Fevereiro 2015): 83-93.
- Figueiredo, Aneliése L., Ana Paula M. Alves, Valter José Fernandes Junior, e Antonio S. Araujo. "Reciclagem Terciária do Poli(etileno tereftalato) Visando a Obtenção de Produtos Químicos e Combustível: Uma Revisão." *Virtual Química* 7, nº 4 (Janeiro 2015): 1145-1162.
- Flávio J. Forlin, José de Assis F. Faria. "Considerações Sobre a Reciclagem." *Polímeros*, 2002: 1-10.
- Franchetti, Sandra Mara, e José Carlos Marconato. "A Importância das Propriedades Físicas dos Polímeros na Reciclagem." *Química Nova na Escola* 18 (Novembro 2003): 42-45.
- Gandara, Meriene, Adilson Roberto Gonçalves, e Clodoaldo Saron. "Compostos de PET reciclado com fibra de cana-de-açúcar tratada por explosão a vapor." *Revista Matéria* 22, nº 4 (Abril 2017).
- Gutián, Ramón. "Os polietilenos." *Plástico Moderno*, Agosto de 1995: 45-48.
- Hage, Elias. "Aspectos Históricos sobre o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia de Polímeros." (*Polímeros*) 8, nº 2 (1988).
- José Cláudio Caraschi, Alcides Lopes Leão. "Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos." Em *Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos*, por José Cláudio Caraschi, 1599-1602. Maringá: Eduem, 2002.
- Lakkad, S. C., e J.M Patel. *Mechanical properties of bamboo, a natural composite*. Vol. 14. Science and Technology, 1981.
- Lemos, Alessandra Luiza de, e Ricardo Martins de Martins. "Desenvolvimento e caracterização de compostos poliméricos à base de poli(ácido láctico) e fibras naturais." *Polímeros* 24, nº 2 (Abril 2014): 190-197.

- Luna, Carlos Bruno Barreto, Divânia Ferreira da Silva, Sabrina Kelly Trajano Basílio, Edcleide Maria Araújo, Adriano Lima da Silva, e Ana Flávia Camara Bezerra. "Desenvolvimento de Blendas Poliméricas visando a Tenacificação dos Polímeros: Uma revisão." *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas* 36, nº 1 (Janeiro/Junho 2015): 67-80.
- MARTINS, LAURI TADEU CORREA. *Como montar um serviço de reciclagem de plástico*. SEBRAE, 2013.
- Materia Brasil*. s.d. <http://www.materiabrasil.com/materials/fibra-de-bananeira--2> (acesso em 27 de fevereiro de 2019).
- MELO, SANTINO LORUAN SILVESTRE DE. "INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ADESÃO INTERFACIAL DOS COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO VIRGEM E RECICLADO REFORÇADOS COM FIBRAS E MICROFIBRAS DE BAMBU." *Dissertação de Mestrado*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2015.
- Nogueira, Clara L., José M. F. Marlet, e Mirabel C. Rezende. "Processo de Obtenção de Pré-impregnados Poliméricos Termoplásticos Via Moldagem por Compressão a Quente." *Polímeros: Ciência e Tecnologia* 9, nº 3 (Julho/setembro 1999): 18-27.
- Ostapiv, Fabiano. "RESISTÊNCIA MECÂNICA DO MATERIAL COMPÓSITO: MADEIRA DE EUCALIPTO-LÂMINA DE BAMBU." Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista (Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá), Guaratinguetá, 2011, 148.
- Pistor, Vinicius, Amauri Chiesa, e Ademir J. Zattera. "Estudo do reprocessamento de polietileno de baixa densidade (PEBD) reciclado do processamento de extrusão de filmes tubulares." *Polímeros* 20, nº 4 (2010): 269-274.
- Rodriguez Ferreira, Roberto Luiz, e Ruth Marlene Campomanes Santana. "Estudo comparativo da influência da razão de sopro nas propriedades de filmes tubulares de PEBD e PEAD." *Polímeros* 25 (Janeiro/Fevereiro 2015): 83-93.
- Salan, K., e Z. Pongen. *Hand Book on Bamboo*. Índia: Government of India, 2008.
- Santos, Wilson N. dos, e Rinaldo Gregório F°. "Propriedades Térmicas de Polímeros Por Métodos Transientes de Troca de Calor." *Polímeros: Ciência e Tecnologia* 13, nº 4 (2003): 265-269.
- Silva, Régis. *Blog do Régis*. 20 de Abril de 2010. <http://regisdesigner.blogspot.com/2010/04/tecnologia-textil-fibras-artificiais.html> (acesso em 28 de Março de 2019).

Siqueira, Gilberto Antônio de Freitas. "Produção e Caracterização de Compósitos Fenólicos." *Dissertação de Mestrado*. Ouro Preto: UFOP-UEMG-CENTEC, Março de 2006.

Anexo 1: Ensaio de Tração em Fibras

Figura 1: Ensaio de tração fibras naturais

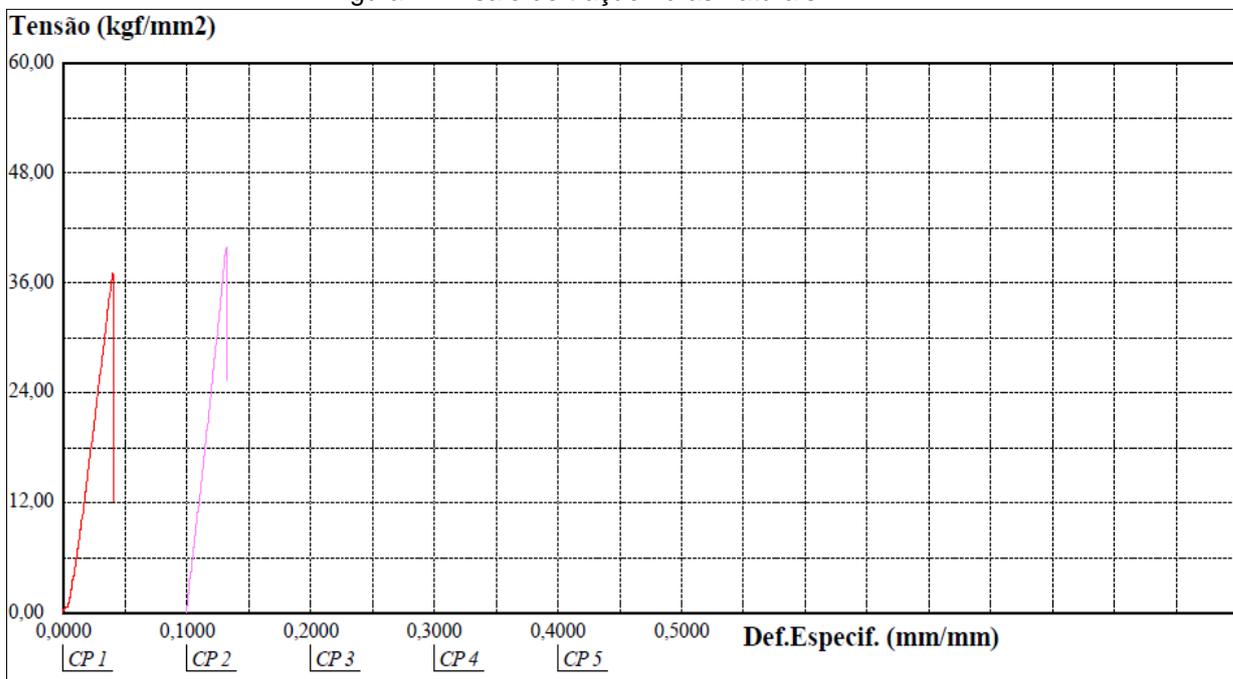


Figura 2: Ensaio de tração de fibras mercerizadas à 2%

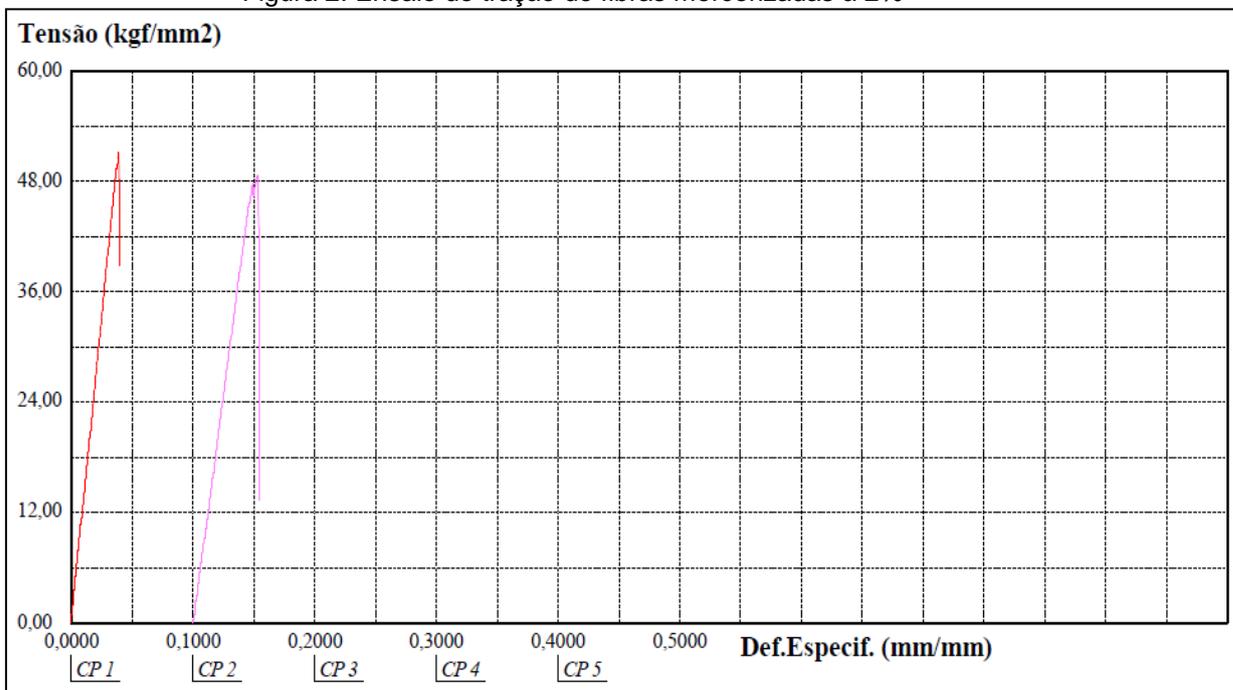


Figura 3: Ensaio de tração de fibras mercerizadas à 2% de NaOH e acetiladas por 1h

