



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

RENARDIR PEIXOTO MACIEL JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DE CARGAS DE REFORÇO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**

FORTALEZA

2017

RENARDIR PEIXOTO MACIEL JÚNIOR

INFLUÊNCIA DE CARGAS DE REFORÇO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus.
Co-orientador: Santino Loruan Silvestre de Melo.

FORTALEZA

2017

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)

M139i Maciel Júnior, Renardir Peixoto.

Influência de cargas de reforço nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica / Renardir Peixoto Maciel Júnior. – 2017.

48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus.

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

1. Polipropileno. 2. Fibra de Bambu. 3. Carbonato de cálcio.. I. Título.

CDD 669

INFLUÊNCIA DE CARGAS DE REFORÇO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em 14 /12 / 2017

BANCA EXAMINADORA

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

Santino Loruan Silvestre de Melo (Co-orientador)
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Prof. Dr. Ricardo Emilio Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

“O importante não é vencer todos os dias, mas lutar sempre”.
(Waldemar Valle Martins)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me dar forças e segurança para superar as dificuldades encontradas até aqui.

Aos meus pais Erinete e Renardir, que sempre apoiaram e incentivaram os meus estudos e decisões.

Aos meus irmãos pela parceria diária mesmo nas dificuldades vividas ao decorrer de todos os meus anos de vida.

A minha namorada Melissa por estar sempre me incentivando e apoiando nos últimos anos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ênio Pontes de Deus, e ao meu co-orientador, Santino Loruan, por serem sempre tão prestativos e pelos ensinamentos valiosos durante a execução deste trabalho.

Aos meus amigos do laboratório LAMEFF, em especial a Beatriz e o Nilis, pelo suporte durante a execução do trabalho.

Agradeço aos laboratórios da UFC por disponibilizar seus equipamentos para concretizar o meu trabalho.

À empresa que ofereceu a matéria prima e maquinaria para confecção dos corpos de prova que foram utilizados neste trabalho.

Aos meus grandes amigos de faculdade que estiveram juntos comigo nos melhores momentos na UFC compartilhando aprendizados e experiências.

Ao Centro Acadêmico de Engenharia Metalúrgica, ao LAMEFF, ao Laboratório de Materiais Cerâmicos, a Metal Soluções Jr, Milplastic e a Aço Cearense Industrial por ter me proporcionado grandes experiências e amizades durante os meus 5 anos de faculdade.

Enfim, a todos os amigos e familiares que contribuíram direta ou indiretamente em minha caminhada até esta conquista. Muito obrigado!

RESUMO

A proposta de aproveitamento de fibras vegetais para utilização em desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica aliada com a necessidade industrial de caracterizar o compósito reforçado com carbonato de cálcio é a motivação do trabalho. Por virtude da importância do desenvolvimento desses materiais, a caracterização mecânica do reforço, da matriz e, finalmente, do compósito é fundamental para estudo de sua aplicação. Nesse trabalho, para o compósito reforçado com bambu variou-se a direção das fibras e os tratamentos superficiais nas fibras e para o compósito com carbonato de cálcio variou-se o percentual do reforço adicionado. Após a obtenção dos dados, verificou-se que o compósito com as fibras de bambu orientadas na mesma direção do ensaio de tração suportou a maior tensão de tração, enquanto que o tratamento de acetilação também proporcionou um aumento na tensão de tração suportada pelo compósito. Além disso, também foi verificado que a adição de carbonato de cálcio na matriz polimérica reduziu a tensão suportada pelo material, no entanto, aumentou a sua rigidez. Logo, foi possível verificar a influência de diversos parâmetros nas propriedades mecânicas de dois diferentes compósitos de matriz de polipropileno reciclado.

Palavras Chave: Polipropileno. Compósito. Fibra de Bambu. Carbonato de cálcio.

ABSTRACT

A proposal for the use of vegetable fibers in polymer matrix composites together with an industrial need to characterize the composite reinforced with calcium carbonate is the motivation of the work. Due to the importance of the development of the materials, a mechanical characterization of the reinforcement, of the matrix and finally of the composite is fundamental for the study of its application. In this work, for the bamboo reinforced composite, the direction of the fibers and the superficial treatments in the fibers were varied and for the composite with calcium carbonate the percentage of the added reinforcement was varied. After obtaining the results, it was realized that the composite with the bamboo fibers oriented in the same direction of the tensile test supported the higher tensile stress, whereas the acetylation treatment also provided an increase in the tensile strength supported by the composite. Besides that, it was also realized that the addition of calcium carbonate in the polymer matrix reduced the stress supported by the material, however, increased its rigidity. Therefore, it was possible to verify the influence of several parameters on the mechanical properties of two different recycled polypropylene matrix composites.

Keywords: Polypropylene. Composite. Bamboo Fiber. Calcium Carbonate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática do Bambu e seus constituintes.	22
Figura 2. Possíveis orientações das fibras.	28
Figura 3. Esquema ilustrativo de uma injetora.	30
Figura 4. Carbonato de cálcio	31
Figura 5. PPI Reciclado na forma de grânulos.	31
Figura 6. Fibras de bambu	31
Figura 7. Fluxograma do processo de obtenção de corpos de prova.....	33
Figura 8. Molde sob aquecimento na chapa elétrica industrial.....	35
Figura 9. Ensaio de tração em compósitos	36
Figura 10. Espectroscopia de infravermelho das fibras de Bambu acetiladas, tratadas com NaOH e Naturais.	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Valores de tensão máxima na tração para cada percentual de CaCO_3 adicionado.	37
Gráfico 2. Valores de modulo de Young para cada percentual de CaCO_3	38
Gráfico 3. Distribuição de tensões máximas dos diferentes corpos de prova.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades Gerais do Polipropileno Virgem.....	18
Tabela 2. Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais.....	20
Tabela 3. Características técnicas principais do Modelo PRIMAX R 800.	32
Tabela 4. Parâmetros principais de processo utilizados	32
Tabela 5. Condições dos materiais ensaiados por tração.....	36
Tabela 6. Tensão máxima de tração e módulo de elasticidade de fibras vegetais naturais e modificadas.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFC	Universidade Federal do Ceará
UECE	Universidade Estadual do Ceará
DEMM	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
LAMEFF	Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LPT	Laboratório de Tecnologia de Produtos e Processos
ASTM	American Society for Testing and Materials

PP	Polipropileno
PPi	Polipropileno Isotático
PPr	Polipropileno Reciclado
PPs	Polipropileno Sindiotático
PPa	Polipropileno Atático
PE	Polietileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila

IFTR	Infravermelho com Transformada de Fourier
------	---

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Polipropileno (PPi)	17
3.2 Fibras naturais lignocelulósicas	19
3.3 Características das fibras de bambu	21
3.4 Tratamentos superficiais de fibras naturais	23
3.5 Cargas minerais	25
3.5.1 Carbonato de cálcio.....	26
3.6 Compósitos laminados com fase dispersa e orientada	26
3.7 Processo de injeção	28
3.7.1 Etapas do processo.....	28
3.7.2 Principais parâmetros de processos.....	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 Matéria prima utilizada	31
4.2 Técnicas para obtenção dos corpos de prova	31
4.2.1 Técnica para obtenção do compósito com carbonato de cálcio	32
4.2.2 Técnica para obtenção do compósito com fibra de bambu	33
4.2.2.1 Tratamentos superficiais nas fibras de bambu	33
4.2.2.2 Confecção dos corpos de prova de compósito com fibras de bambu	34
4.3 Técnicas de caracterização	35
4.3.1 Infravermelho.....	35
4.3.2 Ensaio de tração	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Resultados do compósito com carbonato de cálcio	37
5.2 Resultados do compósito com fibra de bambu	38
5.2.1 Caracterização das fibras naturais por Ensaio de Tração e Infravermelho com Transformada de Fourier (IFTR).....	38
5.2.2 Caracterização mecânica dos compósitos reforçados com fibras de bambu	41
5.3 Análise geral para os dois compósitos em estudo	42
6. CONCLUSÃO.....	43

1. INTRODUÇÃO

Em meados do século XIX iniciou-se a era dos polímeros sendo desenvolvida até os dias de hoje, pois está relacionada ao desenvolvimento crescente em diversas áreas da humanidade, como o setor automobilístico, eletroeletrônico e medicinal até setores como os de embalagem (HAGE, 1998, pag. 1). Obter materiais e métodos com propriedades específicas para determinada aplicação, exige ainda mais dos materiais a serem produzidos, fazendo com que aumente a magnitude de trabalhabilidade dos polímeros e de suas respectivas blendas e compósitos. A demanda em torno dos polímeros é ampla e multidisciplinar possibilitando assim que o desenvolvimento se dê desde áreas como engenharia, física e química, até as ambientais, onde se verifica o fator de impacto de tais materiais na natureza.

As mudanças e avanços tecnológicos ocorridos até hoje estão intimamente ligados à disponibilidade de materiais adequados às solicitações tecnológicas. O desenvolvimento de produtos com propriedades cada vez melhores, mais detalhadas e específicas faz com que a descoberta de novos materiais possa suprir tais necessidades. Os polímeros ocupam lugar de destaque nesse quesito, pois são diversas as variáveis que alteram significativamente as propriedades finais do material que se busca. Como exemplo, pode-se citar o Propileno (C_3H_6), obtido do petróleo pela fração de nafta que se obtém da destilação fracionada do óleo cru (CANEVAROLO, pag. 32, 2002). Esse monômero, por poliadição (ou polimerização em cadeia) gera o polímero Polipropileno (PP). Variáveis de estado como temperatura, tempo e pressão limitam o crescimento da cadeia polimérica, assim como a sua taticidade, delimitando assim as propriedades mecânicas, químicas e físicas que se pretendem atingir.

Quando a modificação das propriedades dos materiais, ou mesmo a disponibilidade de matéria prima é limitada, gerando impacto negativo à natureza, os procedimentos químicos e físicos de alteração da matéria prima pura já não são suficientes. Nesse caso, as blendas e os compósitos se tornam uma alternativa viável. Tanto as blendas como os compósitos são excelentes modificadores das propriedades mecânicas dos polímeros, onde se pode substituir parte da matéria prima principal, fazendo com que o produto final ganhe nas propriedades do material

em direções específicas ou mesmo em todas as direções, para que ocorra uma diminuição de utilização da matéria prima principal.

Neste trabalho serão utilizados compósitos reforçados com fibras de bambu e outros reforçados com carbonato de cálcio ambos com a mesma matriz polimérica. Esses dois materiais possuem aplicação e status de desenvolvimento totalmente diferentes, pois enquanto o primeiro ainda está em fase de desenvolvimento para a indústria automobilística e se apresenta como uma alternativa ao desenvolvimento de materiais mais resistentes mecanicamente aliados ao fator ambiental, o outro já possui aplicações bem definidas no mercado, como em produtos domésticos.

Foi escolhido o Polipropileno isotático (PPi) reciclado como matriz do compósito visando atender ao requisito de uma matéria prima que tem alto fator de impacto sócio ambiental.

Vale ressaltar que as fibras naturais apresentam algumas limitações como: fraca adesão interfacial com os polímeros sintéticos, elevada capacidade de absorção de água, baixa resistência à temperatura, entre outras desvantagens inerentes aos materiais orgânicos. Dessa forma faz-se necessária uma investigação ampla sobre todos os aspectos referentes a esses materiais reciclados. No entanto, essas fibras são muito importantes, pois estão inteiramente ligadas à possibilidade da produção de compósitos com excelentes propriedades mecânicas e baixas densidades que podem substituir materiais convencionais como os metálicos e a madeira (GONÇALVES, 2010), que aliada a busca de novos materiais que atendam as tendências mundiais objetivando a viabilidade econômica e ao mesmo tempo a preocupação com o meio ambiente leva a alternativa de se fazer uso dos recursos naturais renováveis (GOMEZ et.al., 1997). Grandes investimentos têm sido feitos na utilização de fibras e resíduos vegetais para a produção de compósitos poliméricos que apresentam uma série de vantagens, como sua fácil fonte de obtenção (BONELLI et. al., 2005; MATTOSO et. al., 1996).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

- Estudar a influência de diferentes cargas de reforço nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz de polipropileno reciclado.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar mecanicamente os compósitos reforçados com carbonato de cálcio e reforçados com fibras de bambu.
- Verificar a influência dos tratamentos de mercerização e acetilação nas propriedades dos compósitos com fibras de bambu.
- Verificar a influência da variação de direção das fibras nas propriedades dos compósitos com fibras de bambu.
- Verificar a influência da adição de carbonato de cálcio nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com carbonato de cálcio.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Os polímeros são uma importante classe de materiais, abrangendo desde plásticos e borrachas para uso automotivo até fibras têxteis para a produção de tecidos. Tanto os polímeros naturais como os sintéticos são formados por macromoléculas que possuem em sua estrutura unidades repetitivas chamadas de meros, onde a quantidade de meros na cadeia polimérica determina o grau de polimerização do polímero (CANEVAROLO, pag. 21, 2002). Os polímeros naturais podem ser classificados de diferentes maneiras dependendo de sua proveniência, podendo ser de origem vegetal ou animal. Já os sintéticos podem ser classificados quanto a sua estrutura química, processamento, taticidade, dentre outras classificações que serão utilizadas conforme a sua necessidade. De forma geral, todos os polímeros guardam peculiaridades das suas propriedades que dependem da sua estrutura química e grau de polimerização.

3.1 Polipropileno (PPi)

Termoplástico é um material com capacidade de amolecer quando submetido ao aumento da temperatura e pressão. O polipropileno (PP) é o exemplo de termoplástico mais comum, seguidos de polietileno (PE), poliestireno (PS) e PVC. As suas propriedades são restauradas quando esse polímero é novamente resfriado, restabelecendo as suas ligações, que são geralmente covalentes para as ligações intramoleculares (Entre os átomos que compõe o material) e de Van der Waals para as ligações intermoleculares (Entre as cadeias poliméricas) (CANEVAROLO, pág.24,2006).

A capacidade de não formar reticulados é determinante para que esse polímero possa receber inúmeros ciclos de reprocessamento, ao contrário dos termofixos, que para fundirem necessitam de tanta energia, que em vez de as cadeias moleculares ganharem mobilidade, esta destruiria completamente as ligações intramoleculares (Nesse caso os reticulados), destruindo o polímero.

Os polímeros sintéticos não renováveis e não biodegradáveis estão gradativamente se caracterizando como o vilão em relação à questão ecológica. A

sua destruição e degradação, quando ocorrem, necessitam de demasiada energia ou tempo que além de não serem viáveis, introduzem gases tóxicos no meio ambiente. Quando esses não passam por processos de reciclagem ou degradação completa, são introduzidos na natureza gerando impacto ambiental.

O polipropileno, pertencente ao grupo das poli olefinas, de fórmula geral C_nH_{2n} , utilizado com matriz desse trabalho é completamente proveniente do petróleo, matéria prima em constante declínio, que em um dos seus processos de destilação gera o monômero propileno (C_3H_6), polimerizado por um processo de poliadição (WALDIR, pag. 27, 2004). Este é um dos termoplásticos que possui menor peso específico, em torno de $0,91 \text{ g/cm}^3$, elevada resistência química, atóxico e com boa resistência ao impacto. Quanto à taticidade, utilizou-se o PPI, que é bastante utilizado devido as suas propriedades peculiares e estáveis em relação ao polipropileno sindiotático e atático. Na tabela 1 apresentam-se as principais propriedades químicas e físicas do PPI.

Tabela 1. Propriedades Gerais do Polipropileno Virgem

PROPRIEDADE	NORMA	VALOR	UNIDADE
Peso Específico	ASTM D792	0,91	g/cm^3
Temperatura de Trabalhabilidade	-	-10 até 100	$^{\circ}\text{C}$
Absorção de agua	ASTM D570	0	%
Tensão de Escoamento	ASTM D638	~35	Mpa
Tensão Máxima na Compressão	ASTM D695	~60	Mpa
Tensão Máxima na Tração	ASTM D638	~50	Mpa
Modulo de Elasticidade	ASTM D695	~1030	Mpa
Elongação na Ruptura	ASTM D638	~600	%
Coefficiente de Expansão Térmica	-	150	10-6m/K

Fonte: (British Plastic Federation, 2015)

Polietileno (PE) e polipropileno (PP) possuem propriedades bem semelhantes, como a sua apolaridade e inércia química. Portanto, os tratamentos químicos de modificações para a adesão a essas matrizes são semelhantes. Quanto

as principais vantagens do PPI, podemos citar a boa resistência ao impacto, fácil trabalhabilidade e estabilidade mecânica térmica.

As aplicações desse tipo de polímero são inúmeras e vão desde objetos de uso doméstico até aplicações no setor automobilístico e aéreo. As principais desvantagens concentram-se em torno dos problemas socioambientais causados pela quantidade de material prima que é conduzida que é introduzida rotineiramente na natureza. O desenvolvimento de tecnologia para combater e substituir o uso crescente dos termoplásticos é essencial, visto que quando esse produto estiver em real escassez a sua devida substituição parcial possa ocorrer sem grandes problemas.

Da forma como o polipropileno se apresenta comumente na indústria, esse possui uma série relevante de características, podendo ser um polímero semirrígido, translúcido, possuir boa resistência mecânica e ao calor. O polipropileno apresenta também vantagens como a baixa resistência elétrica a altas temperaturas e resistência química à um grande número de ácidos e bases. Sua rigidez e dureza, unidas à todas as boas características já citadas, torna o PP um dos plásticos mais utilizados hoje. Para que o polímero obtenha melhores propriedades, são adicionados diversos tipos de aditivos, desde pigmentos, até aditivos que conferem resistência à flamabilidade (British Plastic Federation, 2015).

3.2 Fibras naturais lignocelulósicas

As fibras naturais vegetais representam a maior classe de materiais renováveis presente na natureza. Sua utilização está atrelada aos aspectos de caráter ambiental, social e econômico, além de apresentar uma série de vantagens socioambientais em relação às fibras sintéticas, principalmente quando estas são utilizadas como elemento de reforço ou de carga volumétrica em compósitos (Alain, 2009). As fibras naturais combinam diversos fatores como boas propriedades mecânicas e baixa massa específica, baixo custo e bom desempenho em compósitos, o que faz desse material um potencial reforço em compósitos de matriz polimérica termoplástica. Os métodos de obtenção de fibras naturais vegetais partem de diversas fontes como Coco, Bambu, Cissampelos, Juta, Curauá, dentre uma sucessão de fontes que tem como principal vantagem a biodegradabilidade sem liberação de componentes tóxicos e fácil reflorestamento (Baley & Alain, 2012).

As fibras naturais como fase dispersa em compósitos ganharam interesse devido a benefícios ecológicos e suas propriedades mecânicas. No entanto, as suas aplicações são limitadas devido a sua polaridade e as cadeias poliméricas dessas fibras serem hidrófilas (Beats, pag.01,2015). Uma solução possível para a polaridade desse material é modificar quimicamente as fibras, método utilizado nesse trabalho e que será detalhado em materiais e métodos.

A hidrofília dessas cadeias também pode ser solucionada quando as fibras estão dispostas e bem aderidas a um material hidrofóbico, sem que os feixes fibrosos estejam em contato com umidade. Os constituintes dos feixes são basicamente Celulose ($C_6H_{10}O_5$)_n, hemicelulose (Pentosas $C_5 H_8 O_4$ e hexosanas $C_6 H_{10} O_5$) e Lignina ($C_9 H_{10} O_2$, $C_{10} H_{12} O_3$, $C_{11} H_{14} O_4$), sendo que a celulose e hemicelulose são responsáveis pela resistência mecânica unidirecional das fibras, enquanto a Lignina é o agente fixador das micro fibrilas, desempenhando papel de matriz na planta. Os constituintes indesejáveis como ceras e açúcares presentes nas fibras não são citados, visto que os processos de limpeza e branqueamento retiram grande parte desses materiais.

A maioria das fibras naturais, como Sisal, que apresenta uma quantidade significativa de pesquisa na literatura, apresenta como principal desvantagem a variação das propriedades mecânicas dessas fibras conforme seção transversal e longitudinal, com diâmetro médios variando entre 10 e 30 μm (Flamínio & Pardine, 2006). As fibras de bambu, da espécie *Bambusa vulgaris*, objeto de estudo dessa pesquisa possui a vantagem de suas fibras possuírem orientação uniforme na seção longitudinal do colmo, com variação de quantidade de feixe de fibras quando a seção avaliada se aproxima da casca. Resultados atuais sobre as fibras de bambu serão apresentados no corpo desse trabalho, visto que foi feito um estudo sobre estas fibras em relação às suas propriedades.

Tabela 2. Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais

Tipo de Fibra	σ_T (MPa)	E (GPa)	ϵ_T (%)	ρ (g/cm³)
Sisal	126 – 800	3,80 – 62,0	2,8 – 10	1,27 – 1,50
Coco	95 – 149	2,80 – 3,70	3,3 – 5,1	1,18 – 1,45
Juta	320 – 500	12,0 – 100	1,3 – 2,8	1,5
Malva	160	17,4	5,2	1,41

Rami	393 – 900	7,30 – 25,0	1,80 – 5,30	1,51
Piaçava	143	5,60	5,9	1,05

Fonte: (Flamínio & Pardine, 2006)

O interesse deste trabalho em fibras naturais vem da sua obtenção por produção agrícola presente em praticamente todo o mundo. Os componentes das fibras são basicamente constituídos por micro fibrilas de celulose dispersas em matriz amorfa de lignina e hemicelulose (Malick, pag. 51,2008).

As fibras são tipicamente observadas quando filamentos possuem diâmetro muito menor que o seu comprimento longitudinal, com uma proporção mínima de $1 \geq 200.d$. Possui geralmente uma elevada tensão máxima na ruptura, assim como módulo elástico elevado no sentido de sua orientação, fazendo com que estas sirvam de reforço quando envoltas por uma matriz. Ensaio de Tensão vs Deformação apresentam outra característica peculiar das fibras: a sua fragilidade, caracterizada pela linearidade correspondente da região elástica, apresentando uma pequena região plástica.

As fibras típicas possuem diâmetros muito pequenos e são de difícil extração, portanto são geralmente utilizados os feixes de fibras devido ao fácil manuseamento e obtenção dos seus compósitos com fase orientada.

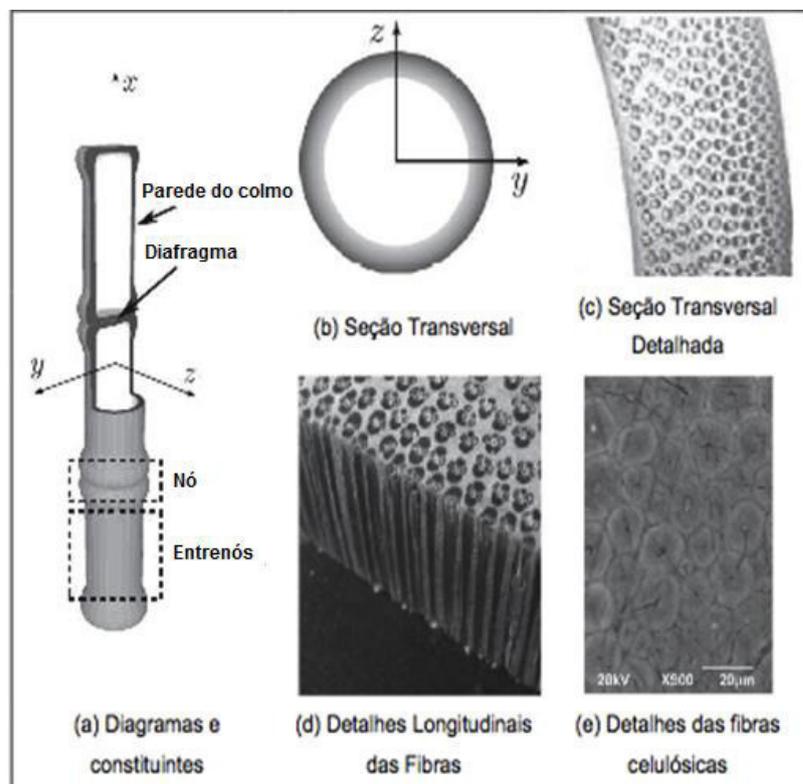
3.3 Características das fibras de bambu

As vantagens da utilização do bambu são relatadas pela literatura, desde suas características morfológicas até as propriedades mecânicas do mesmo. A quantidade de material celulósico nos colmos devidos aos feixes fibrosos orientados dentro do bambu, envoltos pelas suas células parenquimatosas, confere elevada resistência mecânica aos seus colmos, principalmente na parte mais externa, que concentra uma quantidade de fibras por secção maior que no interior. O interesse fundamental na utilização do bambu é aproveitar suas propriedades mecânicas provenientes das fibras, logo a sua compreensão morfológica se faz necessária. O bambu, que pode ser dividido em colmo, raiz e folhas, pode ser encontrado na natureza na forma entouceirante ou alastrante (com raízes rasteiras). O colmo, que nos interessa fundamentalmente é constituído basicamente de nós e entrenós. Na área nodal se encontram os maiores concentradores de tensão devido aos grânulos rígidos presentes (Marco, pag. 72, 2008). Nos internós, as células se encontram em orientação axial, nessa região as fibras são consideradas estreitas longas e

relativamente rígidas devido à orientação da celulose. As fibras que se encontram nessa região são as que mais interessam nesse trabalho, pois é dessas que se pretende fazer uso das suas propriedades mecânicas como reforço em um compósito polimérico.

As fibras vegetais lignocelulósicas conferem à celulose o grau de polímero mais abundante da terra, afinal está presente em alto teor nos vegetais, sendo constituídas basicamente de Celulose, Hemicelulose e Lignina. A celulose se apresenta nas microfibrilas como material polimérico e seu grau de polimerização determina o comprimento da micro fibrila. No seu estado elementar, como unidade de repetição, é chamada de Celobiose, enquanto que a unidade de repetição na macromolécula é designada por anidro-D-glicose. Também é importante ressaltar o arranjo linear das unidades de glicose, que sugerem a forma de agulha para a nanocelulose (Tapina, pag. 1 e 2, 2012). Abaixo, a figura 1 apresenta a distribuição das fibras em um corte transversal de um colmo de bambu até sua morfologia.

Figura 1. Representação esquemática do Bambu e seus constituintes.



Fonte: [29]

A espécie de bambu analisada nesse trabalho é o *Bambusa vulgaris*, espécie inserida no Brasil, comum na região Nordeste e do tipo entouceirante. Essa espécie é constituída basicamente de Colmo, que abrigam os nós, entrenós e a base do caule, que liga o colmo ao rizoma. O colmo cresce linearmente em forma cilíndrica e em solo úmido, geralmente em periferias de terras cultivadas com clima tropical. Esta espécie, quando na idade adulta, pode atingir entre 8 m e 20 m de altura, e seu diâmetro externo entre 5 cm e 10 cm (Razak Wahab, 2012).

A análise de uma seção transversal do colmo na região dos entrenós revela a sua estrutura vascular, que possui em média 50% de parênquima, 40% de fibras e 10% de vasos, com variações conforme espécie. O Xilema e Floema são organizados em feixes vasculares, rodeados pelas fibras e células parenquimatosas, que formam a matriz (Liese, 1987).

3.4 Tratamentos superficiais de fibras naturais

A funcionalização de fibras naturais atinge os constituintes químicos das fibras, provocando modificação da sua cadeia polimérica. A utilização das fibras naturais pode agir como reforço em compósitos com polímero termofixo ou termoplástico, polar, apolar, utiliza-la como produto têxtil ou extrair moléculas e macromoléculas do vegetal. Para que haja compatibilidade entre as fibras naturais e outras fases, a modificação molecular, através da inserção de grupos químicos ou retirada de constituintes das fibras, como ceras, pectina, lignina, dentre outros, depende da aplicação e das propriedades finais que se deseja obter (Mohamed N. Belgacem, 2008).

Modificações nas fibras naturais através de reações químicas podem ser feitas com toda a fibra ou apenas em sua superfície, em que depende do grau de penetração dos agentes modificadores nas macromoléculas. Fibras com diâmetros da ordem de nanômetros ou poucos micrômetros estão com suas cadeias mais expostas, o que pode ocasionar modificações mais intensas devido ao grau de penetração dos reagentes. As hidroxilas (-OH) presentes nas cadeias poliméricas são os grupos mais suscetíveis à funcionalização e também são responsáveis pelas interações do tipo “ligações de hidrogênio”, responsáveis pela estabilidade molecular (Mohamed N. Belgacem, 2008). Manter a estrutura interna das fibras ausente de modificação é então importante quando se pretende manter as propriedades mecânicas naturais

fornecidas pela planta. Parte do foco desse trabalho é a utilização das fibras naturais vegetais como agente de carga e reforço em compósitos termoplásticos, o que exige compatibilidade química entre seus componentes, onde a superfície de separação de fases possa servir como um eficaz transferidor de tensões, sempre que o compósito sofrer solicitação mecânica (Arfin Jahan, 2012). Quando a transferência de tensão entre a matriz polimérica e o reforço fibroso não é eficaz, as fibras podem “escorregar pela matriz” com mais facilidade, fazendo com que a inserção da fase dispersa se comporte como um defeito no compósito. Portanto, limpar, extrair e funcionalizar macromoléculas pode trazer inúmeros benefícios aos compósitos.

A lignina, que é um dos biopolímeros mais predominantes presentes nas plantas (Mohamed N. Belgacem, 2008), se torna então a camada macromolecular mais susceptível à extração e modificação quando tratamos da modificação superficial de fibras naturais, já que estas estão expostas. A lignina é formada através da polimerização dos monolignóis, e sua estrutura depende do tipo de planta que analisamos. Uma particularidade em comum desses monômeros é a presença de hidroxilas, que também é observada na macromolécula, o que torna a lignina altamente hidrofílica. Os monolignóis fenilpropanóides como o ácido cumarílico, ácido coniferílico e ácido sinaptílico são os precursores majoritários da lignina. Suas ligações cruzadas envolvem os locais reativos, que por sua vez envolvem os átomos de carbono do anel aromático e da cadeia lateral (MONTEIRO, PEREIRA, & ABREU, 2004).

Nesse trabalho serão realizados dois processos de modificação superficial de fibras naturais. A mercerização (hidrólise básica) e a acetilação. Todas as plantas derivadas de fibras lignocelulósicas são polares e hidrofílicas, enquanto matrizes termoplásticas, em especial as poliolefinas são apolares e hidrofóbicas, causando assim incompatibilidade química entre suas fases. A adesão entre esses materiais pode ser providenciada quando se modifica superficialmente as fibras naturais, para que suas características hidrofílicas sejam superficialmente modificadas.

O processo inicial de tratamento superficial é a remoção parcial da lignina da parede das fibras, que consiste basicamente na retirada desses constituintes através de uma hidrólise básica, onde utiliza-se o NaOH como agente modificador (Masud S. Hudaa, 2008). Esse processo remove a lignina por meio da clivagem de

ligações éter alcalina que pode ser acompanhada de reações de condensação, com a taxa de remoção da lignina dependente da concentração de NaOH (G. W. Beckermann, 2008). Após esse processo, ocorre a exposição da cadeia microfibrilar aumentando sua rugosidade e quantidade de hidroxilas livres. O processo posterior, a acetilação, é realizado para a substituição dessas hidroxilas livres por grupos apolares, tornando a superfície das fibras mais compatíveis com matrizes poliméricas apolares, como são a maioria das poliolefinas.

A modificação superficial de fibras naturais com o objetivo de diminuir a polaridade da superfície das fibras para a sua utilização como reforço em compósitos de matriz apolares é um recente alvo de investigação (Michael George, 2015). A acetilação de fibras naturais é um método que causa plastificação, substituindo os grupos hidroxílicos por grupos acetil, modificando assim suas propriedades de polaridade superficial, o tornando mais hidrofóbico e causando estabilidade quando em contato com materiais apolares. O princípio básico do método de acetilação é a reação dos grupos hidroxílicos (-OH) para a formação de grupos acetil (CH₃CO-) (A. K. Bledzki, 2008). Muitas vezes, para que ocorra o processo de acetilação, é utilizado algum tipo de catalisador. O seu uso deve ser feito com cautela, pois a maioria deles pode hidrolisar a celulose, danificando a estrutura de tal forma que haja perda de propriedades essenciais para um bom desempenho mecânico dessas fibras (N.E. Zafeiropoulos, 2002).

3.5 Cargas minerais

Carga mineral é o termo empregado para definir o uso de determinados minerais em misturas com polímero para a produção de materiais compósitos termofixos, termoplásticos e elastoméricos. As cargas minerais utilizadas correspondem a minerais ou rochas que são encontrados na natureza, tais como calcário (calcita, dolomita), filito, mica (muscovita, flogopita, biotita), sílica (quartzo, zeólita), caulim, talco, pirofilita (agalmatolito), gesso, barita, wolastonita, esmectita (bentonita, montmorilonita, hectorita) e elita.

A maioria das cargas utilizadas como enchimento é inerte, isto é, não desempenha qualquer papel na reação de polimerização e atua como dissipadores de calor ou diluentes. A adição destas cargas na resina aumenta sua viscosidade, o que implica em aumento no tempo de preenchimento na moldagem líquida. Como o

aumento da viscosidade é um problema na moldagem, a utilização de solventes como estireno ou o aumento da temperatura na moldagem, diminuem a viscosidade do sistema resina/carga e assim minimizam este defeito deletério.

A adição de cargas inertes também afeta o comportamento de cura do sistema de resina. De fato, pode-se encontrar na literatura estudos do efeito da adição de cargas inertes na cura da resina poliéster usando DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) e os resultados mostraram que os principais efeitos foram a redução da condutividade térmica do sistema matriz/carga e do número de ligações duplas reativas por unidade de volume.

3.5.1 Carbonato de cálcio

O carbonato de cálcio é um composto inorgânico com fórmula CaCO_3 e uma estrutura molecular tetraédrica. Tem características alcalinas (ou seja, é um sal com características básicas) e é resultado da reação do óxido de cálcio (cal virgem) com dióxido de carbono (Equação 1).



Na natureza, os minerais de CaCO_3 são encontrados sob duas formas cristalinas:

- Aragonita: Quando seus cristais apresentam a forma ortorrômbica.
- Calcita: Quando seus cristais apresentam a forma romboédrica ou trigonal.

O CaCO_3 tem aparência de um pó branco com uma densidade de 2,83 g/cm³, ponto de fusão de 850 °C, sendo insolúvel em água. Dentre as cargas minerais usadas em compósitos, o CaCO_3 está entre as mais utilizadas, pois possui baixo custo e é de fácil aplicação.

3.6 Compósitos laminados com fase dispersa e orientada

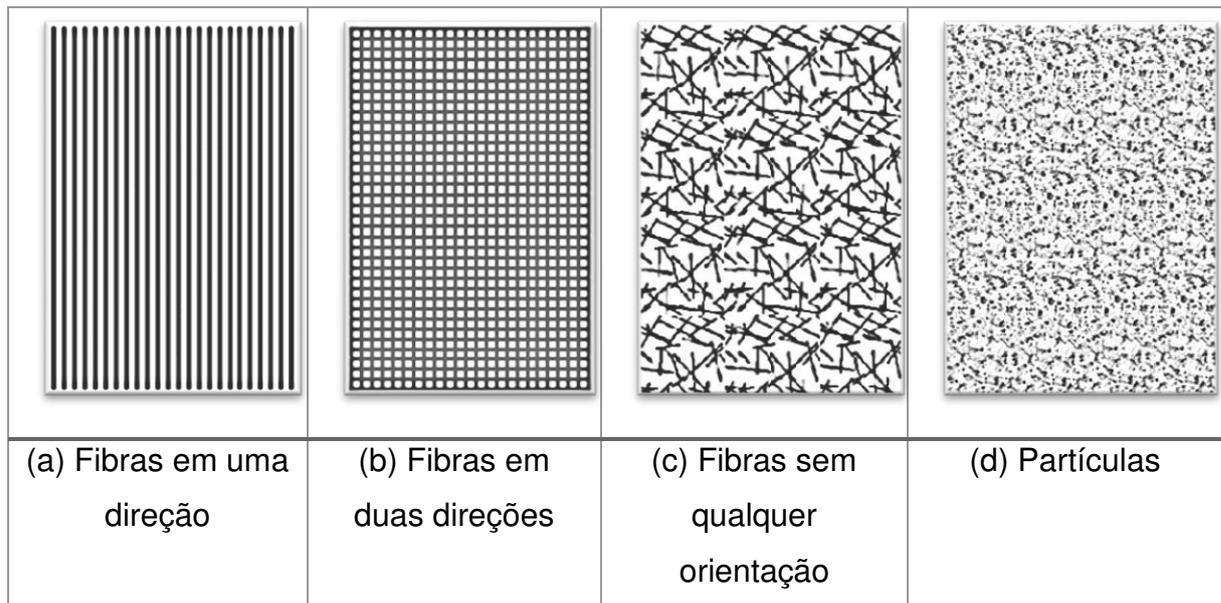
Os compósitos são materiais constituídos de duas ou mais fases que podem ser divididos em sintéticos e naturais. Os compósitos naturais são aqueles que se

formam naturalmente, sem a intervenção humana. Compósitos sintéticos são aqueles sintetizados.

A função do componente disperso no compósito é responsável pelo reforço em dureza, resistência à tração, tenacidade e rigidez; já a da matriz a de manter as fibras na direção de orientação, proteger contra as intempéries e transferir as distribuições de tensões. O processo de fabricação de compósitos laminados reforçado com fibras deve ser cuidadoso e criterioso, para que o compósito obtenha propriedades melhoradas pelas fibras nas direções que pretendemos. Deve-se analisar qual a direção das forças aplicadas nas peças a serem desenvolvidas, visto que o reforço só ocorre nas direções longitudinais de orientação e a matriz como ligante e distribuidor de tensões. As bolhas e defeitos nos materiais também são um fator extra de cuidados a serem tomados, visto que quando as fibras estão secas e prontas para a utilização, a quantidade de poros internos é aumentada devido à penetração da matriz nos interstícios do reforço, fazendo com o ar proveniente dos poros faça surgir bolhas em todo o material. As fibras contínuas proporcionam altos valores de tensão na direção de orientação dos feixes fibrosos, entretanto, é mais difícil manusear e produzir compósitos com fibras contínuas. Fases descontínuas são fáceis de manusear, porém proporcionam baixo valor de tensão máxima e baixo módulo, em contrapartida, as propriedades mecânicas e físicas são as mesmas em todas as direções.

Assim, pela definição adotada por Flaminio & Pardine, os compósitos são divididos quanto ao tipo de reforço. As partículas na matriz podem se orientar de forma aleatória ou ordenada. Já as fibras podem se apresentar de forma curta ou contínua (Longas). As fibras curtas, assim como as particuladas, podem se dispersar como as partículas, ou seja, de forma curta ou orientadas. As fibras longas se apresentam uni e bidireccionalmente. A grande vantagem de orientar fibras longas é que estas distribuem melhor as tensões na direção da solicitação mecânica, desde que estas estejam orientadas para tal finalidade, o que difere das fibras curtas e contínuas. Dessa maneira, os diferentes tamanhos e orientações das fibras na matriz polimérica é que vão determinar quais propriedades vão ser obtidas, além da fração de fibras nos compósitos.

Figura 2. Possíveis orientações das fibras.



Fonte: [29]

3.7 Processo de injeção

É uma técnica de moldagem que consiste basicamente em forçar, através de uma rosca simples, a entrada de material fundido para o interior da cavidade de um molde. O processo de injeção é amplamente utilizado para fabricação de peças plásticas por sua flexibilidade, produtividade, qualidade dimensional e superficial atingidas com a sua utilização. Basicamente, esse processo segue as etapas a seguir:

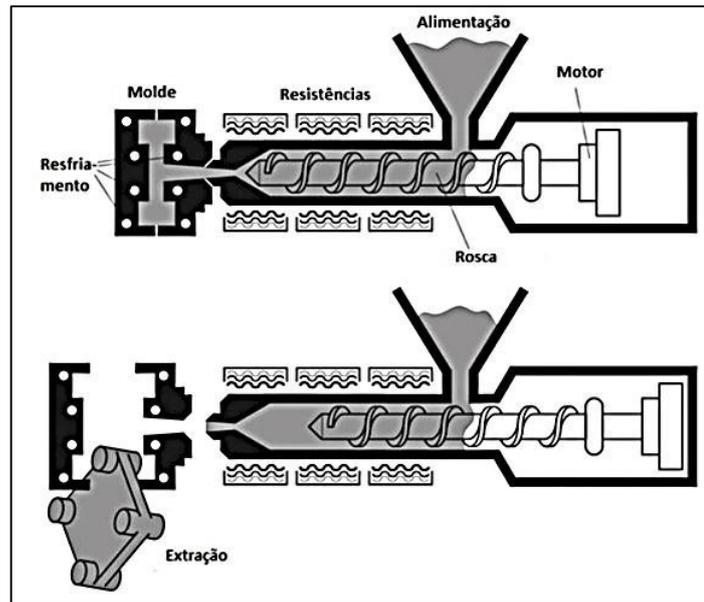
3.7.1 Etapas do processo

- I. Fechamento do molde: A primeira etapa do ciclo de moldagem ocorre com o fechamento do molde, que é realizado através da movimentação hidráulica ou elétrica das placas da máquina injetora. É importante que o molde esteja fechado e as placas da injetoras travadas para possibilitar a injeção do material nas cavidades e evitar a formação de rebarbas e outras imperfeições provenientes da alta pressão envolvida no processo.
- II. Dosagem: É na dosagem que ocorre o amolecimento do material plástico que será injetado nas cavidades na quantidade adequada para cada produto. Diferentes produtos podem ter diferentes quantidades de dosagem. O amolecimento do material plástico ocorre através de resistências elétricas no conjunto extrusor da injetora, composto de canhão e rosca.
- III. Preenchimento das cavidades: Depois da dosagem correta de material já estar

amolecida, ocorre a injeção nas cavidades do molde. Esta etapa acontece de forma muito rápida com a finalidade de evitar que haja congelamento da frente de fluxo da matéria prima, antes amolecida no processo de dosagem. O congelamento precoce impede que o preenchimento se complete.

- IV. Recalque: Normalmente a quantidade de matéria prima que é dosada para o preenchimento das cavidades é ligeiramente maior do que o volume final do produto. O excesso de material ocasiona o aumento da pressão interna das cavidades. O recalque consiste na manutenção desta pressão com a finalidade de minimizar a ação da contração da matéria prima decorrente do seu resfriamento. Esta etapa tem o objetivo de tornar o preenchimento homogêneo, reduzindo a possibilidade de defeitos conhecidos como “rechupes”.
- V. Resfriamento: O início do processo de resfriamento ocorre imediatamente após a matéria prima ser dosada nas cavidades. Normalmente os moldes possuem um sistema que acelera este processo de resfriamento através de circuitos de refrigeração. Nestes circuitos usualmente ocorre a circulação de água. A função desta etapa é a solidificação do material plástico para que ele adquira a forma final do produto sem que ocorram deformações.
- VI. Extração: A extração do produto já resfriado se dá através de mecanismos internos no molde, podendo ser através de pinos extratores, placa extratora, mandíbulas e outros mecanismos.

Figura 3. Esquema ilustrativo de uma injetora.



Fonte: <http://www.caramuru.com.br/page2injecaio.html>

3.7.2 Principais parâmetros de processos

- Características da matéria prima;
- Forma do produto;
- Quantidade de cavidades no molde;
- Pressão na rosca do canhão;
- Temperatura das zonas;
- Tempo de dosagem;
- Pressão de recalque;
- Tempo de resfriamento do molde.

Para uma boa moldagem é necessário que o ar residual do meio fibroso seja totalmente eliminado e a resina impregne todos os espaços vazios do reforço. Alguns parâmetros como: propriedades das matérias-primas, do produto e do processo são de fundamental importância para que isso ocorra. Caso contrário, defeitos nos componentes moldados podem ocorrer, por exemplo, devido à impregnação parcial do reforço ou à formação de micro vazios durante o estágio de infiltração.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Matéria prima utilizada

Os materiais utilizados nesse trabalho são respectivamente a matriz polimérica e a fase dispersa. Sendo a matriz o Polipropileno Isotático reciclado e a fase dispersa para um compósito o carbonato de cálcio e para o outro as fibras de bambu.

Figura 5. Carbonato de cálcio



Fonte: próprio autor.

Figura 4. PPI. Reciclado na forma de grânulos.



Fonte: próprio autor.

Figura 6. Fibras de bambu



Fonte: próprio autor.

4.2 Técnicas para obtenção dos corpos de prova

Os compósitos foram fabricados por diferentes processos, logo serão explicados separadamente.

4.2.1 Técnica para obtenção do compósito com carbonato de cálcio

Os compósitos utilizando carbonato de cálcio foram produzidos em uma injetora modelo ROMI PRIMAX R 800. Abaixo seguem características técnicas da injetora e parâmetros do processo de injeção utilizados.

Tabela 3. Características técnicas principais do Modelo PRIMAX R 800.

Painel Controlador	-	CM10
Força de fechamento do molde	t	800
Curso máximo de abertura	mm	1170
Altura do molde (máx. x mín.)	mm	1170 x 300
Espaço entre colunas (hor. x ver.)	mm	1060 x 1060

Fonte: próprio autor.

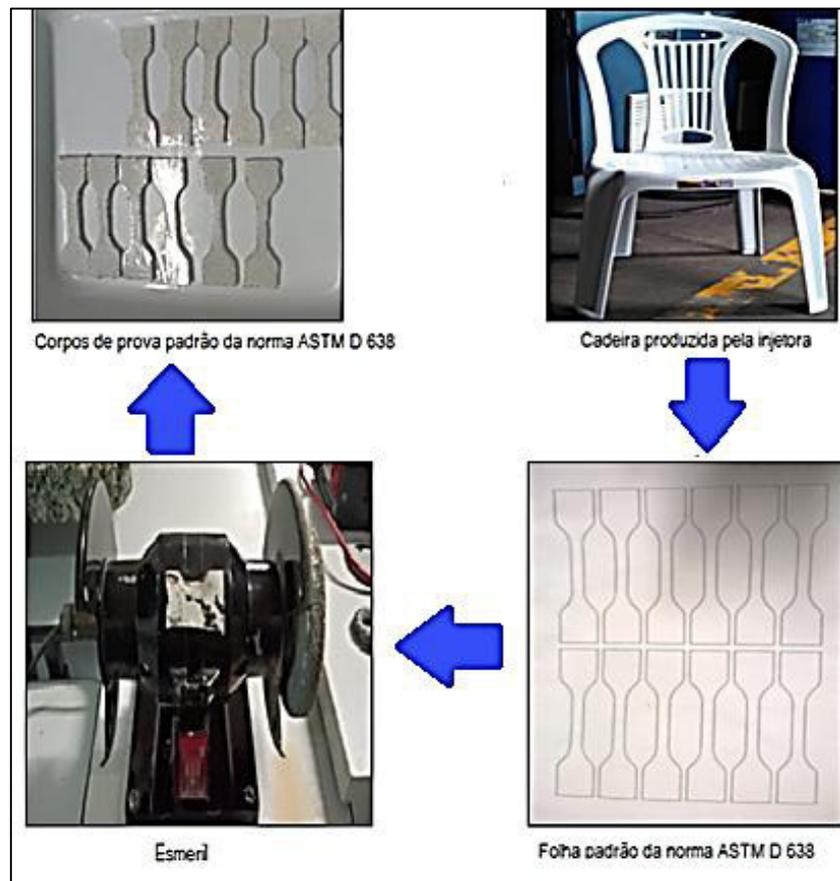
Tabela 4. Parâmetros principais de processo utilizados

Pressão no molde	bar	5
Pressão de recalque	bar	70
% de carbonato de cálcio	% em peso	0%, 15%, 23%, 28% e 33%

Fonte: próprio autor.

O produto final produzido na injetora é uma cadeira doméstica. Foi utilizada a perna da cadeira para confecção do corpo de prova que segue as etapas do fluxograma abaixo.

Figura 7. Fluxograma do processo de obtenção de corpos de prova.



Fonte: próprio autor.

4.2.2 Técnica para obtenção do compósito com fibra de bambu

Os compósitos utilizando fibra de bambu foram produzidos em um molde aquecido por uma chapa elétrica industrial. Antes disso, as fibras passaram por diferentes tratamentos superficiais.

4.2.2.1 Tratamentos superficiais nas fibras de bambu

- Mercerização das fibras

Inicialmente as fibras foram entumecidas em água deionizada e aquecidas à 80 °C, durante 30 minutos depois lavadas.

A mercerização, tratamento superficial com NaOH para a retirada de constituintes indesejáveis das fibras e fazer a sua respectiva limpeza foi elaborada em diferentes concentrações para avaliação das suas propriedades após o tratamento. Fibras de bambu contínuas e curtas foram imersas em solução de NaOH nas

concentrações de 2%, 5%, 10% e 15% (p/v) na proporção de 1/10 ou até que o material fosse completamente entumecido. A reação ocorreu a 60°C durante 2 horas, depois lavadas em água deionizada. Esse procedimento foi repetido duas vezes. Ao final do procedimento, as fibras foram lavadas diversas vezes até estas atingirem pH=7. As fibras foram então submetidas à secagem em estufa a 60°C por 24 horas.

- Acetilação das fibras

A acetilação é utilizada para tornar a superfície das fibras apolar visando maior compatibilidade com a matriz polimérica com relação a polaridade, haja vista que a fibra natural é polar e o polipropileno é apolar.

A solução preparada foi de anidrido acético e ácido acético (1,5: 1,0 em massa) e na solução foram adicionadas 20 gotas de ácido sulfúrico para cada 500 ml de solução. As fibras foram então entumecidas na solução, na proporção de 1/10. As reações foram conduzidas a 100°C durante 1h e 2h. Foram então removidas, lavadas em água deionizada sob banho de ultrassom por 40 min. diversas vezes, até pH=5. As fibras foram então submetidas à secagem em estufa a 60°C por 24 horas.

4.2.2.2 Confeção dos corpos de prova de compósito com fibras de bambu

Considerando a densidade do Polipropileno, pesou-se quantidade suficiente de material para a confecção de uma placa de (260 mm X 80 mm X 4 mm). O material na forma de pellets foi então disperso no molde e aquecido a 180°C, quando as fibras foram orientadas sob a camada de PP fundido. O molde foi então fechado e o fluxo de calor cessado, introduzindo pressão de forma paulatina, ao mesmo tempo em que a temperatura do molde foi arrefecida, para que o material, ainda fundido, não escapasse pelas laterais do molde. Quando a temperatura do molde estava em torno de 140°C, a pressão máxima foi acionada, estando assim até que a temperatura ambiente fosse atingida e a placa fosse retirada.

Figura 8. Molde sob aquecimento na chapa elétrica industrial.



Fonte: Próprio Autor

O processo de usinagem seguiu o mesmo fluxo de obtenção dos corpos de prova do compósito com carbonato de cálcio.

4.3 Técnicas de caracterização

4.3.1 Infravermelho

É um tipo de espectroscopia de absorção, em que a energia absorvida se encontra na região do infravermelho do espectro eletromagnético. O ensaio foi realizado no Laboratório do Departamento de Química da Universidade Federal do Ceará (UFC). Esse ensaio visa identificar um composto ou investigar a composição de uma amostra. Os materiais utilizados foram:

- Fibra de bambu natural, mercerizada e acetilada;
- Sal de alta pureza.

4.3.2 Ensaio de tração

O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente a um corpo de prova especificado, ao mesmo tempo em que são medidas as variações no comprimento e valores de força aplicada. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos da UFC. Esse ensaio visa o levantamento de várias propriedades mecânicas referentes à resistência do material. Os materiais utilizados foram:

- Máquina de Ensaio de Tração Universal EMIC com célula de carga de 100KN.
- 6 Corpos de prova para cada tipo de polímero e compósito seguindo a norma ASTM D638 – Tipo IV.
- 6 fibras de 80 mm de comprimento para cada condição de tratamento foram ensaiadas seguindo a norma ASTM D3822-2013.

Tabela 5. Condições dos materiais ensaiados por tração.

Condições das fibras de bambu	
Fibra de Bambu Natural	
Tratada com NaOH 2%	
Tratada com NaOH 5%	
Tratada com NaOH 10%	
Tratadas com NaOH 2% seguida de Acetilação por 1h	
Tratadas com NaOH 2% seguida de Acetilação por 2h	
Compósitos com fibras de bambu	
Tratamento das fibras	Direção das fibras
Mercerização	0°, 90°, bidimensional, aleatórias
Acetilação	0°, 90°, bidimensional, aleatórias
Compósitos com carbonato de cálcio	
% de Carbonato de cálcio	0%, 15%, 23%, 28% e 33%

Fonte: próprio autor.

Figura 9. Ensaio de tração em compósitos



. Fonte: Próprio Autor

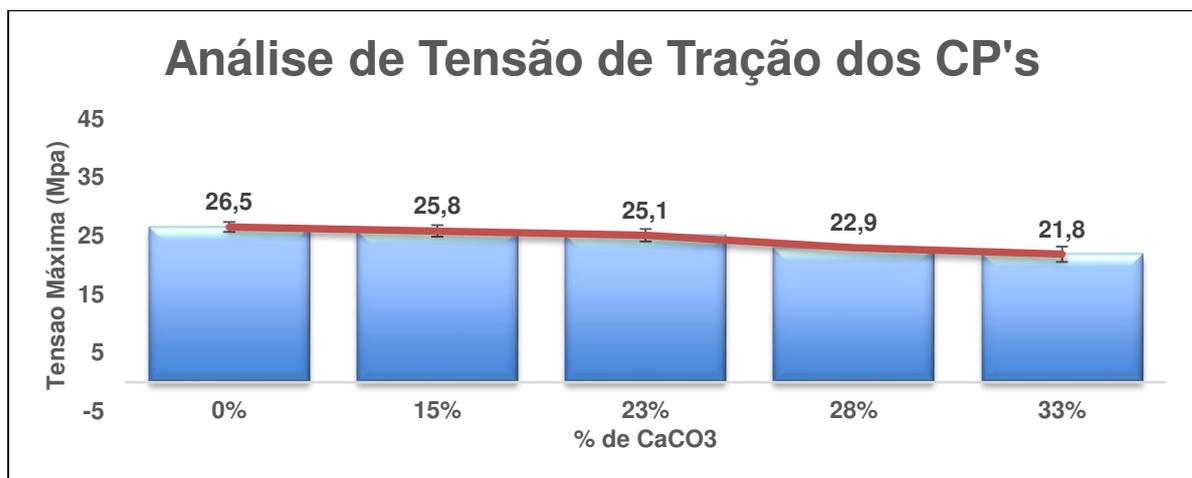
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por se tratar de materiais diferentes com variação de diferentes parâmetros de processos, os resultados serão estudados separadamente para cada compósito e, ao fim, será realizada uma análise geral.

5.1 Resultados do compósito com carbonato de cálcio

Como já citado anteriormente, foi realizado ensaio de tração em várias amostras de compósito reforçado com carbonato de cálcio visando verificar a influência do percentual de carbonato de cálcio nas propriedades mecânicas do mesmo. No gráfico 01 abaixo tem-se os valores de tensão máxima de tração para cada percentual adicionado.

Gráfico 1. Valores de tensão máxima na tração para cada percentual de CaCO_3 adicionado.



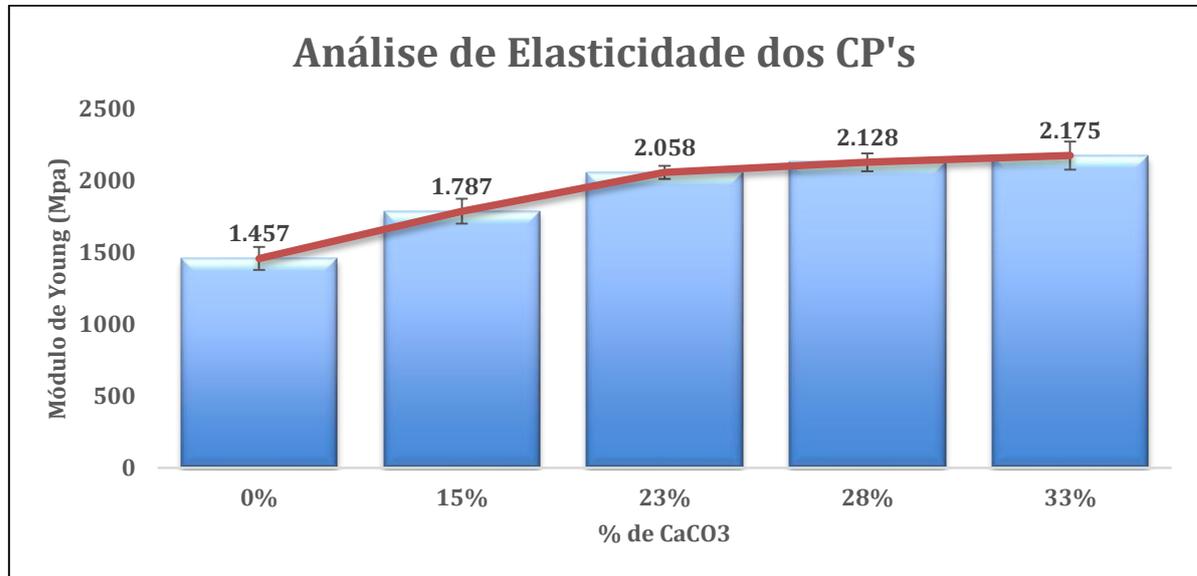
Fonte: próprio autor.

Do gráfico 01, percebe-se que com o aumento no percentual de carbonato de cálcio adicionado, ocorre a diminuição da tensão de tração suportada pelo compósito. Isso é devido essa fase dispersa atuar como concentradores de tensão, o que reduz a resistência mecânica do material, haja vista que se tem uma interface entre um polímero e uma cerâmica que são materiais com características bastante diferentes, principalmente no que se refere a características de superfície.

No entanto, essa fase dispersa aumenta a rigidez do compósito, característica essa que é muito procurada em alguns produtos, como cadeiras e

mesas domésticas. Esse aumento de rigidez é representado pelo módulo de Young do material. Esses valores são mostrados no gráfico 02 abaixo.

Gráfico 2. Valores de módulo de Young para cada percentual de CaCO_3 .



Fonte: próprio autor.

Além desse aumento de rigidez, a utilização do carbonato de cálcio em produtos poliméricos é bastante explorada devido ao seu baixo custo que é cerca de 50% menor do que o do polipropileno reciclado. No entanto, também deve ser considerado a maior densidade do CaCO_3 em comparação com o PP e o aumento da viscosidade do composto com sua adição. Logo, cabe aos responsáveis técnicos a realização de estudo de viabilidade de utilização desse aditivo na produção dos diversos produtos plásticos.

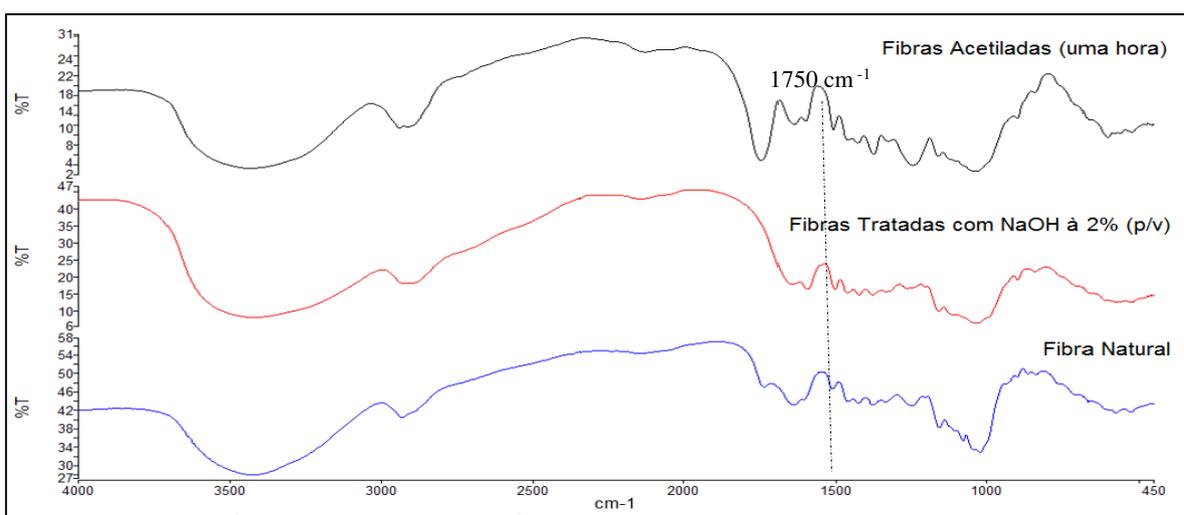
5.2 Resultados do compósito com fibra de bambu

5.2.1 Caracterização das fibras naturais por Ensaio de Tração e Infravermelho com Transformada de Fourier (IFTR)

No intuito de avaliar a influência das modificações superficiais das fibras naturais nas suas propriedades mecânicas, assim como apresentar a modificação química da superfície das fibras, foram realizados ensaios de tração e IFTR das fibras. Na figura 10, tem-se o IFTR das fibras naturais, fibras modificadas com NaOH à 2% (p/v) e fibras modificadas com NaOH seguidas da acetilação (por uma hora).

Observando o espectro das fibras naturais em relação às fibras acetiladas e mercerizadas, constata-se que houve modificação superficial devido à modificação dos espectros observados. Entre $3300 - 3700 \text{ cm}^{-1}$, os três espectros apresentam forte intensidade devido à vibração axial provocada pelas hidroxilas (D'Almeida A. L. F. S., 2005). Percebe-se, entretanto, que essa banda é mais intensa nas fibras naturais e mercerizadas, indicando assim a diminuição da intensidade devido à acetilação parcial. Como a reação é superficial, a banda apenas diminui de intensidade. O incremento observado na banda de 1750 cm^{-1} no IFTR das fibras acetiladas, indica o aparecimento vibracional do grupo carbonila (C=O), que desapareceu conforme as fibras foram tratadas apenas com NaOH à 2%. A evidência do aparecimento da carbonila é um indicador forte da acetilação, conforme analisado na literatura (Fernanda, Araújo, Nascimento, Gadelha, & Silva, 2010).

Figura 10. Espectroscopia de infravermelho das fibras de Bambu acetiladas, tratadas com NaOH e Naturais.



. Fonte: Próprio autor

Na tabela 6, são apresentados os resultados de tensão máxima na ruptura e módulo de elasticidade para as fibras naturais e modificadas. Foram avaliadas cinco composições de tratamentos para que se pudesse perceber a influência da modificação química superficial das fibras.

Para os valores de tensão máxima de tração das fibras, percebe-se que os tratamentos de mercerização aumentaram a tensão máxima na ruptura das fibras, como pode ser observado para os tratamentos com NaOH à 2% e 5%. Quando a

porcentagem de NaOH em solução é de 10%, a fibra se degrada de tal forma que sua tensão máxima na ruptura decresce. O mesmo se observou com os valores de Módulo de Elasticidade, que decresceram com as porcentagens de 2% e 5% em relação às fibras naturais e decresceu bruscamente quando o tratamento foi realizado a 10% de NaOH.

Tabela 6. Tensão máxima de tração e módulo de elasticidade de fibras vegetais naturais e modificadas.

Tipo de Fibra	Tensão Máxima de Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Fibra de Bambu Natural	378 ± 25	11,8 ± 0,65
Tratada com NaOH 2%	489 ± 30	11,7 ± 0,70
Tratada com NaOH 5%	507 ± 39	10,3 ± 1,0
Tratada com NaOH 10%	277 ± 18	6,6 ± 1,1
Tratadas com NaOH 2% seguida de Acetilação por 1h	426 ± 19	9,3 ± 0,9
Tratadas com NaOH 2% seguida de Acetilação por 2h	337 ± 16	10,13 ± 0,9

. Fonte: Próprio autor

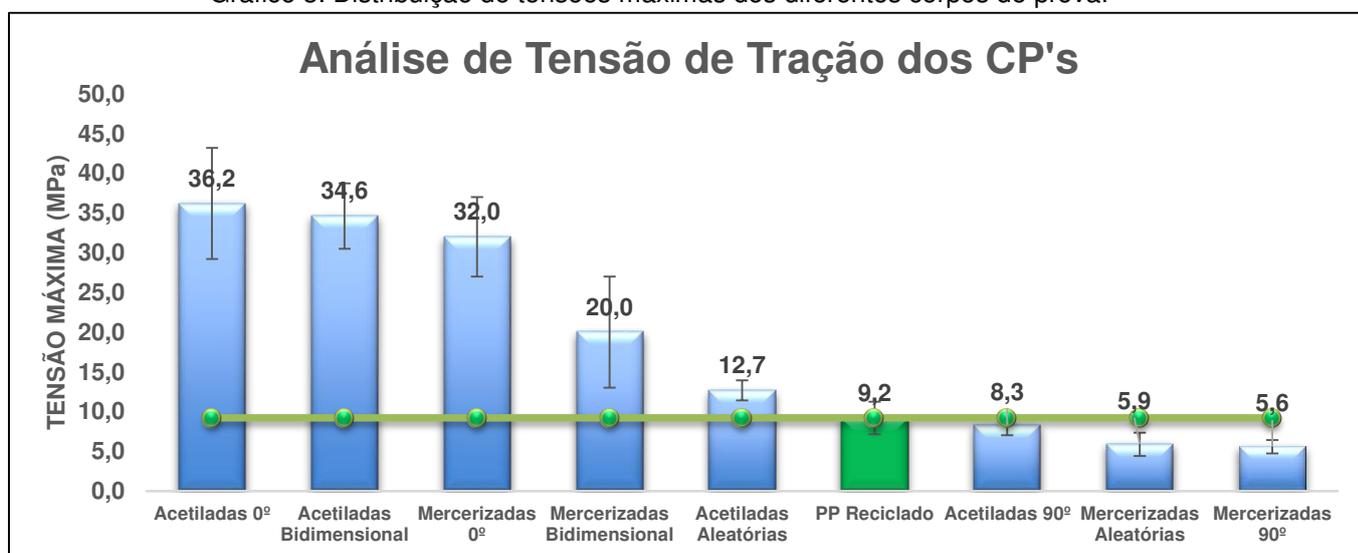
No intuito de degradar o mínimo possível às fibras, os tratamentos prévios de mercerização para limpeza superficial foram realizados utilizando NaOH a 2% e posteriormente o procedimento da acetilação foi realizado. A critério de avaliação, foram utilizados dois tempos de acetilação e assim verificar a influência do tempo de acetilação e como esse se reflete nas propriedades mecânicas das fibras. A literatura relata que o tempo mínimo de acetilação para uma acetilação superficial favorável é de uma hora, portanto, foram realizados os procedimentos para uma e duas horas de acetilação. Com uma hora de acetilação, as propriedades mecânicas das fibras ainda eram melhores que as propriedades mecânicas das fibras naturais, porém, em relação às fibras tratadas com NaOH à 2%, a tensão máxima na ruptura apresentou uma queda, assim como seu Módulo de Elasticidade. O procedimento realizado com duas horas de acetilação afetou de forma significativa as propriedades mecânicas das fibras modificadas. A tensão máxima na ruptura decresceu em relação às propriedades

mecânicas das fibras naturais e o Módulo de Elasticidade, apesar de apresentar um aumento em relação ao das fibras acetiladas por uma hora, foi menor que o das fibras naturais e mercerizadas.

5.2.2 Caracterização mecânica dos compósitos reforçados com fibras de bambu

Os compósitos confeccionados foram caracterizados mecanicamente por ensaio de tração para avaliar a tensão máxima suportada sem a ruptura do material.

Gráfico 3. Distribuição de tensões máximas dos diferentes corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

O gráfico 3 mostra em ordem decrescente as tensões máximas para cada tipo de compósito reforçado com fibras de bambu. Considerando o PP reciclado como base, percebe-se que a adição de fibras aumentou a resistência mecânica do compósito, sendo que para o compósito com fibras acetiladas na direção 0° o aumento foi de 293%.

Os compósitos com fibras na direção de 90° juntamente com as fibras mercerizadas em direções aleatórias apresentaram os piores resultados. Isto ocorreu porque as fibras a 90° estão orientadas totalmente fora da direção de ensaio, logo a contribuição da adição das fibras não contribuiu positivamente na resistência desse material. Já para as fibras mercerizadas em várias direções também apresentaram impacto negativo na resistência mecânica desse compósito, pois como a interface fibra-matriz é uma região de concentração de tensões, ao reduzir o comprimento dessas fibras e, conseqüentemente, aumentar a quantidade de fibras, há também um

aumento na área de interface fibra- matriz, aumentando, dessa forma, o acúmulo de tensões no compósito. O fato das fibras, nesse caso, não ter passado pelo processo de acetilação contribuiu ainda mais para esse resultado.

Os compósitos com fibras em 2 direções (0° e 90°) também apresentaram bons resultados devido 50% da quantidade de fibras estarem na mesma direção do ensaio de tração.

Analisando a influência dos tratamentos superficiais aplicados nas fibras, percebe-se que a acetilação melhorou a resistência mecânica dos compósitos em todas as direções estudadas como já era previsto devido à redução de concentração de tensões na interface fibra-matriz ao tornar a superfície da fibra apolar igualmente a da matriz.

5.3 Análise geral para os dois compósitos em estudo

Ao analisar a propriedade de tensão máxima de tração suportada pelo PP reciclado sem reforços obtidos pelos dois processos de fabricação mostrados na parte de materiais e métodos, percebe-se que o PP produzido pelo processo de obtenção dos compósitos reforçados com fibras de bambu suporta uma menor tensão de tração, logo, pode-se inferir que esse processo fornece um produto com menor qualidade, isto é, apresenta mais vazios devido esse processo disponibilizar um menor controle dos parâmetros do processo, tais como pressão e temperatura.

No entanto, mesmo com esse decréscimo, a resistência mecânica do compósito com fibra de bambu com fibras orientadas na direção de 0° é bastante superior ao compósito reforçado com carbonato de cálcio. Mostrando, dessa forma, a elevada resistência mecânica do compósito reforçado com fibra de bambu em comparação a compósitos já utilizados em produtos domésticos.

6. CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados, percebeu-se que a adição das fibras de bambu melhorou as propriedades mecânica do compósito resultante. Foi possível verificar também a influência dos tratamentos superficiais nas fibras de bambu e da orientação das fibras nas propriedades mecânicas do compósito.

Além disso, verificou-se também que a adição de carbonato de cálcio em PP reciclado reduz a tensão máxima de tração suportada pelo material, no entanto, aumenta a sua rigidez que, em alguns produtos, como mesas e cadeiras doméstica, é um fator positivo. Além da redução de custo com a utilização desse aditivo.

Em suma, foi possível realizar os objetivos do trabalho, conseguindo verificar a influência de diferentes cargas de reforços e parâmetros de processos nas propriedades mecânicas dos dois compósitos resultantes.

Vale ressaltar que para obter um estudo mais aprofundado sobre esses materiais seria importante a realização de outros ensaios, tais como ensaio charpy, ensaio de flexão, correlação de imagens para medição de coeficiente de Poisson, ensaio de adesão interfacial entre a matriz e o reforço para ambos os compósitos e ensaio de fluidez para o compósito com carbonato de cálcio, dentre outras análises.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, STANDARD TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTIES OF PLASTICS, ASTM D 638, Philadelphia, USA, 2001.
2. HAGE JR., Elias. **ASPECTOS HISTÓRICOS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA DE POLÍMEROS.** Polímeros [online]. 1998, vol.8, n.2, pp. 6-9. ISSN 0104 1428.
3. CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **CIÊNCIA DOS POLÍMEROS: UM TESTO BÁSICO PARA TECNÓLOGOS E ENGENHEIROS**, São Paulo, Artliber Editora, 2002.
4. MARINELLI L., Marcos R. M., D. Ambrósio, Márcio Kobayashi, Antônio D. Nobre, **DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS VEGETAIS NATURAIS DA BIODIVERSIDADE: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE AMAZÔNICA**, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº 2, p. 92-99, 2008.
5. MANRICH Satiyy, et al., **IDENTIFICAÇÃO DE PLÁSTICOS: UMA FERRAMENTA PARA RECICLAGEM**, São Carlos: Ed. UFSCAR, 2007.
6. WALDIR N. O., **ANÁLISE DE COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO E FIBRAS DE VIDRO UTILIZADOS PELA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA NACIONAL**, Dissertação de Mestrado, Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Curitiba, 2004.

7. Baets J. , K. Wouters, K. Hendrickx, A.W. Van Vuure, **COMPRESSIVE PROPERTIES OF NATURAL FIBRE COMPOSITES**, Materials Letters, 2015.
8. Estrada; Martin, Dorian L. Linero, Fernando Ramírez, **CONSTITUTIVE RELATIONSHIP OF THE FIBER CLUSTER OF BAMBOO GUADUA ANGUSTIFOLIA, DETERMINED BY MEANS OF A WEIBULL PROBABILITY 14.FUNCTION AND A MODEL OF PROGRESSIVE FAILURE, MACHANICS OF MATERIALS**, Volume 63, 15 August 2013, Pages 12–20, 2013.
9. ASTM D3822-2013 Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers, American Society for Testing and Materials.
10. ASTM D3039M-2013 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, American Society for Testing and Materials.
11. ASTM D 7136 - Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. American Society for Testing and Materials.
12. BONELLI, C. M. C. et al., **Compósitos de polietileno de alta densidade reciclado com fibra de piaçava**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 15, n. 4, p. 256-260, 2005.
13. CALLISTER, Jr.W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. John Wiley&Sons, Inc. 2000. Tradução de SOARES, S. M. S., 5ª edição, 589p. 2002.
14. CANEVAROLOJR, S.V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. Artliber editora, SãoPaulo, 2007.

15. CORREIA, S. M. et al., **Estudo do dano em tubos de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas**. Revistada Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, v.17, p.13-18, 2009.
16. DOS SANTOS, A. M. Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná) Curitiba, Paraná, 2006.
17. GUELBERT, T. F.; GUELBERT, M.; CORREA, M.; LESZCZYNSKI, S. A. C.; GUERRA, J. C. C. **A embalagem pet e a reciclagem: uma visão econômica sustentável para o planeta**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, PR, Brasil 2007.
18. KACHANOV, L. M.; **Introduction to Continuum Damage Mechanics**. Martinus Nijhoff Publishers, Holanda, 1986.
19. KURUVILLA, J.; THOMAS, S.; PAVITHRAN, C. **Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites**. Polymer, v.37, n.23, p.5139-49, 1996.
20. MALLICK, P. K. Figueira-do-reino composites: materials, manufacturing and design. Ne wYork, Marcel Dekker, p. 312, 1988.
21. MALVERN, L.E., **Introduction to the Mechanics of a Continuous Media**, Prentice Hall, 1969.
22. MARCELO JR. A. O. Aplicação da mecânica da danificação em materiais compósitos poliméricos reforçados por fibra de

vidro.204p.Dissertação(Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará. Orientador: Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus. 2004.

23. MATTHEWS, F.L. & RAWLINGS, R.D. **Composite Materials: Engineering and Science**. [S.L.]: Chapman & Hall.
24. MATTOSO, L.H.C., PEREIRA, N., SOUZA, M.L., AGNELLI, J.A.M. **Utilização de Fibras Vegetais para Reforço de Plásticos**. EMBRAPA, São Carlos- SP, nº 3, p. 1-4, 1996.
25. MILAGRE, M.X., MACHADO, C.de S.C., SILVA, R.V. da, Compósito laminado híbrido de matriz polimérica reforçada por fibras de coco e vidro: comportamento mecânico em tração. Jornada de Iniciação Científica e III Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, ES, 2010. MORSYLEIDE, F. R. et al., Nanocelulose de fibras de coco imaturo para aplicação em nanocompósitos. V workshop de rede de nanotecnologia aplicada ao agronegócio. São Carlos, SP, setembro de 2009.
26. MURAKAMI, S. **Notion of Continuum Damage Mechanics and its Application to Anisotropic Creep Damage Theory**. Journal of Engineering Mechanics and Technology, vol. 105, 1983, pp. 99-105. PAVAN, R.C. & CREUS, G.J. Modelo construtivo para dano anisotrópico em material compósito. Anais das XXXII Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural, p.2650-58, Campinas, São Paulo, 2006.
27. ROMÃO, C. M. N. **Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras**

naturais.147p.Dissertação(Mestrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) 2003.

28.VAN DAM, J. E. G. et al. Process for production of high density/high performance binderless board from whole coconut husk. Part II: Coconut husk morphology, composition and properties. Industrial Crops and Products, in press, 2004.

29.MELO, S. L. S. **Investigação das propriedades mecânicas e adesão interfacial dos compósitos de polipropileno virgem e reciclado reforçados com fibras e microfibras de bambu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará), 2015.

30. **Manual de Injeção da INNOVA**. Disponível em: http://www.abfer.com.br/wpcontent/uploads/2016/02/11_Manual_de_Injecao_innova.pdf. Acesso em 10 de novembro de 2017.