

JOÃO PEDRO AQUILES CAROBOLANTE

**EFEITO DO TRATAMENTO ALCALINO DA FIBRA NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DO COMPÓSITO EPÓXI/CAPIM-SAPÊ**

Guaratinguetá

2015

JOÃO PEDRO AQUILES CAROBOLANTE

**EFEITO DO TRATAMENTO ALCALINO DA FIBRA NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DO COMPÓSITO EPÓXI/CAPIM-SAPÊ**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Andressa Cecília Milanese

Guaratinguetá
2015

C292e Carobolante, João Pedro Aquiles
Efeito do tratamento alcalino da fibra na resistência mecânica do compósito epóxi/capim-sapê / João Pedro Aquiles Carobolante – Guaratinguetá : [s.n], 2015.
66 f. : il.
Bibliografia: f. 55-61

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.
Orientadora: Prof^a Dr^a Andressa Cecilia Milanese

1. Materiais compostos 2. Resinas Epóxi 3. Compósitos poliméricos
4. Fibras I. Título

CDU 620.1

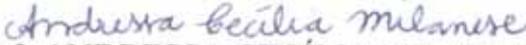
João Pedro Aquiles Carobolante

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

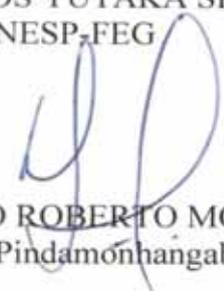
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Dr^a. ANDRESSA CECÍLIA MILANESE
Orientador/UNESP-FEG


MD. MARCOS YUTAKA SHIINO
UNESP-FEG


Prof. Dr. SÉRGIO ROBERTO MONTORO
FATEC-Pindamonhangaba

Fevereiro de 2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Pedro Vanderlei Carobolante e Vera Lucia Aquiles de Sousa Carobolante e meu irmão, Lucas Aquiles Carobolante, pelo incondicional apoio e incentivos;

A todos que de alguma forma contribuíram à realização deste trabalho;

As professoras,

Andressa Cecília Milanese, minha orientadora pelo apoio, ajuda, paciência e incentivos;

Maria Odila Hilário Cioffi, pelos ensinamentos e apoio;

Aos técnicos,

Manoel Francisco dos Santos Filho, Wilson Roberto Monteiro e Odir Vieira da Silva pela ajuda e dedicação;

Ao grupo de pesquisa GFMA – Grupo de Fadiga e Materiais Aeronáuticos, Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini, Marcos Yutaka Shiino, Midori Yoshikawa Pitanga, Sérgio Roberto Montoro, Thatiane Brocks pelo companheirismo, ajuda e apoio;

E aos meus amigos,

Juliana Bovi de Oliveira, Rúbia Eri Teruya, Mariana Gomes Moura Costa, Karina Ayumi Fucuhar pelo apoio, ajuda, carinho e amizade.

CAROBOLANTE, J. P. A. **Efeito do tratamento alcalino da fibra na resistência mecânica do compósito epóxi/capim-sapê**. 2015. 66f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Devido a preocupações crescentes em diminuir os danos ambientais causados pelo uso de matérias-primas não renováveis, nos últimos anos, houve um crescimento de pesquisas relacionadas a agregar tecnologia com preservação ambiental. Logo, o uso de materiais renováveis e menos agressivos ao meio ambiente vem ganhando destaque. Em relação aos materiais compósitos, a troca de fibras sintéticas por fibras naturais, principalmente fibras de origem vegetal, no uso como reforço vem se destacando, devido as suas propriedades, como alta resistência mecânica, atóxicas, baixo custo, baixa massa específica, flexibilidade de processamento, não abrasivas aos equipamentos de processo, requerem tratamentos superficiais simples, entre outras. Portanto, este trabalho se propôs a processar compósitos reforçados com fibras longas e unidirecionais de capim-sapê em matriz epóxi e caracterizá-los por meio de ensaios mecânicos. Foram confeccionados três grupos de compósitos segundo o tratamento recebido pelo reforço: sem tratamento alcalino, tratado em meio alcalino em concentração de 5% m/v e tratado em meio alcalino em concentração 10% m/v. Os materiais foram analisados por ensaios mecânicos de tração e flexão, além da microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Por fim, os resultados foram analisados estatisticamente. Como principal resultado, o tratamento alcalino de 5% nas fibras de capim-sapê aumentou sua resistência mecânica, ocasionado pela melhora na adesão entre reforço e matriz.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito com fibras naturais. Fibra de capim-sapê. Resina epóxi. Tratamento alcalino.

CAROBOLANTE, J. P. A. **Effect of alkali treatment of fiber in the mechanical strength of epoxy/sapegrass composite.** 2015. 66f. Undergraduate (Degree in Materials Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Due to growing concerns for reducing environmental damage caused by the use of non-renewable raw materials, there is a growing demand for research related to aggregate technology with environmental preservation. Thus, the use of non-renewable materials and less aggressive materials has been gaining attention. About composite materials, the exchange of synthetic fibers by natural fibers, especially vegetable fiber as reinforcement, has been increasing, due to its physical-chemical properties such as mechanical strength, nontoxic, low cost, low density, processing flexibility, non-abrasive to the process equipment, requiring simple surface treatments, etc. This objective was to process composites reinforced with long fibers of sapegrass in epoxy matrix and characterize the composites through mechanical tests. Three groups of composites were prepared according to the treatment received by the reinforcement: without treatment, alkali treatment at concentration of 5% w/v and alkali treatment at 10% w/v concentration. The materials were analyzed by tensile and flexural, and tests also optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). The results were statistically analyzed. As the main result, the alkali treatment of 5% in the sapegrass fibers increases the tensile and flexural strength, as a consequence of the improve adhesion between matrix and reinforcement.

KEYWORDS: Natural fibers composite. Sapegrass fiber. Epoxy resin. Alkaline treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capim-sapê: a) após colheita; b) camada interna do caule, c) lâminas foliares (camada externa) que foram extraídas do caule	25
Figura 2 – Fibras longas selecionadas do caule	26
Figura 3 – Etapas do tratamento alcalino: a) fibras selecionadas; b) início do tratamento; c) após 1 hora de tratamento; d) após secagem das fibras em estufa	28
Figura 4 – Fibras fixadas lado a lado	28
Figura 5 – Representação dos moldes usados durante o processamento dos compósitos.....	29
Figura 6 - Ensaio de flexão estática por 3 pontos, em corpo de prova retangular, sendo “L” a distância entre apoios, “b” a largura e “d” a espessura.....	31
Figura 7 – Compósito com fibra não tratada apresentando região com falta de resina devido ao vazamento entre o molde de silicone	33
Figura 8 – Compósitos processados: a) fibra não tratada; b) fibra tratada em solução alcalina, com concentração de 5% de NaOH (m/v); c) fibra tratada em solução alcalina, com concentração de 10% de NaOH (m/v)	34
Figura 9 – Os tecidos presentes na fibra de capim sapê. Aumento de 40x	35
Figura 10 – Fibras de capim-sapê: a) não tratadas quimicamente. Aumento de 40x; b) tratadas em solução com 5% de NaOH (m/v). Aumento 40x; c) tratadas em solução com 5% de NaOH (m/v). Aumento 40x	35
Figura 11 – Gráfico tensão x deformação das amostras de resina epóxi.....	36
Figura 12 – Detalhe do rompimento da resina e deslizamento (arrancamento) da fibra na matriz	37
Figura 13 – Gráfico tensão x deformação do compósito reforçado com fibra sem tratamento alcalino	38
Figura 14 – Corpos de prova do compósito epóxi/sape tratado com 5% de NaOH após ensaio de tração.....	39
Figura 15 – Gráfico tensão x deformação do compósito reforçado com fibras tratadas em solução de 5% de NaOH	40
Figura 16 - Gráfico tensão x deformação do compósito reforçado com fibras tratadas em solução de 10% de NaOH	41
Figura 17 – Corpos de prova do compósito epóxi/sapê 10% NaOH após ensaio de tração.....	42

Figura 18 – Gráfico tensão x deformação do ensaio de flexão da resina epóxi43
Figura 19 - Corpos-de-prova de resina epóxi após o ensaio de flexão44
Figura 20 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de flexão compósito com reforço não tratado45
Figura 21 – Corpos-de-prova do compósito com reforço não tratado após ensaio de flexão46
Figura 22 – Gráfico tensão x deformação do compósito com reforço tratado em solução com 5% de NaOH47
Figura 23 – Amostras do compósito com reforço tratado em solução com 5% de NaOH: a) antes do ensaio de flexão; b) após ensaio de flexão47
Figura 24 - Gráfico tensão x deformação do compósito com reforço tratado em solução com 10% de NaOH48
Figura 25 - Amostras do compósito com reforço tratado em solução com 10% de NaOH: a) antes do ensaio de flexão; b) após ensaio de flexão49
Figura 26 – Região da ruptura no ensaio de tração da fibra tratada em solução com 5% de NaOH: a) aumento de 70x; b) aumento 500x; c) aumento 500x; d) aumento 500x.....	50
Figura 27 – Região da ruptura no ensaio de tração da fibra tratada em solução com 10% de NaOH: a) aumento de 70x; b) aumento 500x; c) aumento 500x; d) aumento 500x.....	51
Figura A.1 – Dados gerados por “ANOVA: único fator” para ensaio de tração.....	62
Figura A.2 – Resultado para comparação entre às resistências à tração dos materiais.....	63
Figura A.3 – Dados gerados por “ANOVA: único fator” para ensaio de flexão64
Figura A.4 - Resultado para comparação entre às resistências à flexão dos materiais.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudo comparativo do valor de resistência à flexão de alguns compósitos reforçados com fibras vegetais.....	20
Tabela 2 – Estudo comparativo do valor de resistência à tração de alguns compósitos reforçados com fibras vegetais.....	22
Tabela 3 – Dados da análise de variância	23
Tabela 4- Dados da resina epóxi composta pelo reagente RL3135-LV e endurecedor EL3135-L	26
Tabela 5 – Condições dos tratamentos.....	27
Tabela 6 - Dimensões dos corpos de prova, em função da espessura.....	30
Tabela 7 – Dados do ensaio de tração da resina epóxi.....	37
Tabela 8 – Dados do ensaio de tração do compósito epóxi/sapê não tratado (sem tratamento alcalino)	38
Tabela 9 – Dados do ensaio de tração do compósito com reforço tratado em meio alcalino com 5% de NaOH	39
Tabela 10 – Dados do ensaio de tração do compósito com reforço tratado em meio alcalino com 10% de NaOH	41
Tabela 11 – Valor médio da resistência à tração dos materiais estudados	42
Tabela 12 – Dados do ensaio de flexão da resina epóxi	44
Tabela 13 – Dados do ensaio de flexão do compósito epóxi/sapê não tratado (sem tratamento alcalino)	44
Tabela 14 – Dados do ensaio de flexão do compósito com reforço tratado em meio alcalino com 5% de NaOH	46
Tabela 15 – Dados do ensaio de tração do compósito com reforço tratado em meio alcalino com 10% de NaOH	48
Tabela 16 – Valores médios das resistências dos materiais estudados	49
Tabela A.1 – Dados usados para comparação entre às resistências à tração dos materiais.....	62
Tabela A.2 – Dados usados para comparação entre às resistências à flexão dos materiais.....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	COMPÓSITOS.....	13
2.2	MATRIZ POLIMÉRICA.....	14
2.3	RESINA EPÓXI.....	15
2.4	FIBRAS NATURAIS.....	16
2.5	CAPIM-SAPÊ.....	18
2.6	TRATAMENTO ALCALINO.....	18
2.7	ENSAIO DE FLEXÃO.....	19
2.8	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	20
2.9	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	22
2.10	MÉTODO TUKEY.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	MATERIAIS.....	25
3.1.1	Capim-sapê	25
3.1.2	Resina epóxi	26
3.1.3	Outros materiais	26
3.2	PROCESSAMENTO.....	27
3.2.1	Tratamento das fibras	27
3.2.2	Processamento dos compósitos	27
3.2.3	Ensaio de tração	30
3.2.4	Ensaio de flexão	30
3.2.5	Análise estatística	32
3.2.6	Microscopia	32
4	RESULTADOS	33
4.1	PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS.....	33
4.2	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	34
4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	36
4.4	ENSAIO DE FLEXÃO.....	43
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	50
5	CONCLUSÕES	52
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICE A – Análise estatística	62
	ANEXO A – Tabela Studentized	66

1 INTRODUÇÃO

A busca por matérias-primas renováveis e de baixo custo tem sido de significativa importância no direcionamento das pesquisas que envolvem o uso de fibras vegetais em compósitos. Além disso, existem outras vantagens em usá-las, como baixa massa específica, abrasividade reduzida em equipamentos de processamento, não serem tóxicas, são recicláveis, necessitam de baixo consumo de energia na produção, além de estimular a criação de empregos na zona rural (LEVY e PARDINI, 2006; MACHADO et al., 2010; SILVA et al., 2012; JAWARD et al., 2012).

Dentre os parâmetros a serem considerados com a utilização das fibras vegetais, podem ser citados a influência referente ao solo e à época de colheita da fibra, e a baixa compatibilidade com materiais poliméricos, pois essas fibras apresentam caráter hidrofóbico enquanto que a matriz polimérica possui caráter hidrofílico. Essa diferença causa baixa aderência superficial o que impede a transferência de tensões efetivas que por sua vez reduz as propriedades mecânicas do compósito (LEVY e PARDINI, 2006; MACHADO et al., 2010). Porém, pode-se melhorar a adesão por meio de tratamentos químicos na fibra.

O capim-sapê (*Imperata brasiliensis*) é considerado uma planta invasora perene, que ocorre em pastagens degradadas e em áreas cultivadas. Tem ampla distribuição geográfica no Brasil, ocorrendo nas Regiões Sul, Sudeste, Nordeste e, em parte, no Centro-Oeste. Sua disseminação é facilitada pela produção de sementes leves e pela presença de rizomas que contribuem para a reprodução da espécie (CARVALHO e XAVIER, 2006; CARVALHO et al., 2000).

Todas as fibras vegetais, como algodão, juta, sisal e o capim-sapê, têm celulose em sua composição. A celulose, $(C_6H_{10}O_5)_n$, é o polímero natural mais abundante do planeta. É um polímero linear do tipo β -(1 \rightarrow 4)-D-glucopironose, um polissacarídeo regular construído de unidades repetidas de D-glucopironose por ligações 1,4- β glucosídicas. Forma longas cadeias, chamadas fibras elementares, com ligações intermoleculares de pontes de hidrogênio e forças de Van de Walls (PEREIRA, 2012; BIANCHI, 1995; SALAZAR et al., 2013; GUPTA et al., 2013; QIN et al., 2013).

Os outros principais constituintes das fibras vegetais são hemicelulose e lignina, polímeros naturais que aglutinam e envolvem as microfibras.

A hemicelulose é um polímero carboidrato complexo, um polissacarídeo de massa molecular inferior a da celulose, de fórmula química não definida, altamente ramificada

e aleatória, formada de diferentes tipos de sacarídeos. Sua estrutura é definida como amorfa. A principal diferença entre celulose e hemicelulose é que esta tem ramificações com cadeias curtas laterais constituídas por diferentes açúcares. Outra diferença é que a hemicelulose é facilmente hidrolisável (PEREIRA, 2012; BIANCHI, 1995; SALAZAR et al., 2013).

A lignina é o segundo polímero mais abundante na natureza e está presente na parede celular, conferindo suporte estrutural, impermeabilidade e resistência contra ataques microbianos e estresse oxidativo. A lignina é um heteropolímero amorfo, não solúvel em água e opticamente inativo (PEREIRA, 2012; BIANCHI, 1995; SALAZAR et al., 2013).

Ao se trabalhar com qualquer material sempre há uma preocupação sobre o comportamento final, o mesmo ocorre com o uso das fibras vegetais. Buscando as propriedades desejadas são feitos tratamentos, sendo um deles o tratamento alcalino.

O tratamento alcalino, ou mercerização, constitui-se, basicamente, da imersão da fibra em uma solução de NaOH sob agitação. Nesse processo ocorre a remoção de parte da lignina, hemicelulose e, principalmente, outros componentes da fibra, como ácidos graxos. Fatores como concentração da solução, proporção fibra/solução, tempo de exposição e temperatura influenciam na remoção dos componentes que pode ser desde branda até a degradação (PEREIRA, 2012; VALLS, 2013).

Machado et al. (2010) estudou a fibra de sapê “*in natura*” e após tratamento químico com NaOH, e concluiu que o tratamento alcalino com 15% de NaOH por 90 minutos aumentou a cristalinidade da fibra. Segundo o pesquisador o aumento na cristalinidade melhorou as propriedades mecânicas do compósito (MARTINS et al., 2008; PEREIRA, 2010; PIRES et al., 2012).

Para análise mecânica foram realizados ensaios de tração e flexão.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho de graduação tem como objetivo processar compósitos poliméricos, via compressão manual, utilizando como matriz a resina epóxi reforçado com fibra de capim-sapê, não tratadas e tratadas em meio alcalino e, posteriormente, analisar seu comportamento mecânico por tração e flexão, além de conhecer suas características físicas por meio da microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são multifásicos formados por dois ou mais materiais distintos numa escala microscópica, insolúveis entre si e separados por uma interface. A relação entre os dois materiais é apenas física. São materiais, em sua maioria, artificialmente construídos. (MOTA, 2010; MILANESE, 2008; MANO, 2003; KOH, 2011; HILLING, 2011; CALLISTER, 2006, SHIINO, 2011; BENINI, 2011).

O compósito é dividido em duas partes: a matriz, parte contínua, mas nem sempre em maior escala, e o reforço, geralmente usado na forma de fibras ou partículas, suportado pela matriz. O reforço atua aprimorando as características da matriz, que além de envolvê-lo, também atua na transmissão dos esforços, através da interface. Além disso, a matriz protege o reforço da abrasão, da degradação e de danos, tanto de origem física, quanto de origem química, e dá forma ao compósito (MOTA, 2010; MILANESE, 2008; SHIINO, 2011; BENINI, 2011).

Ao desenvolver os compósitos procura-se como resultado materiais com características diferentes e realçadas em comparação aos materiais de origem. Parâmetros que influenciam nas características finais dos compósitos são: a adesão entre matriz e reforço, forma e geometria do reforço, o processamento do compósito e a proporção matriz/reforço (MOTA, 2010; MILANESE, 2008).

Para agir como reforço, deve-se ter no mínimo 10% em volume do material, quando na forma de fibras. Alguns requisitos para a escolha de um reforço são: melhorias nas qualidades desejadas, alguma compatibilidade com a matriz, baixa adsorção de umidade, baixo custo e disponibilidade (MOTA, 2010; MILANESE, 2008).

Uma infinidade de materiais pode ser usada como matriz, sendo os polímeros os materiais mais usados, isso devido a algumas características como não envolver altas pressões e temperaturas durante o processamento e o uso de equipamentos mais simples na produção, por isso houve um desenvolvimento mais rápido desse tipo de material (MOTA, 2010; MILANESE, 2008; SHIINO, 2011).

Os compósitos ainda podem ser classificados conforme a natureza dos materiais que o compõem: naturais e sintéticos. E entre os compósitos sintéticos ainda existe uma subdivisão: macro e microcompósitos (MOTA, 2010).

Tecnologicamente os compósitos mais importantes são aqueles, cujos reforços estão sob a forma de fibras. Os compósitos desse tipo, geralmente, apresentam alta resistência e rigidez. Suas propriedades são influenciadas pela geometria, tamanho, orientação e tipo da fibra (CALLISTER, 2006; MILANESE, 2008).

Os compósitos são aplicados nos mais diversos setores: saneamento básico, transporte, químico, petroquímico, construção civil, eletroeletrônico e lazer. Sendo o setor de transporte, indústrias automotivas, marítimas e aeroespaciais, os pioneiros no uso de compósitos estruturais. (MOTA, 2010; KEULEN, 2010).

2.2 MATRIZ POLIMÉRICA

Além de dar forma ao compósito, a matriz polimérica atua na transferência de carga para o compósito e na proteção deste contra abrasão, danos e degradação. Devido aos custos, mais baratas e versáteis, as matrizes poliméricas são mais usadas que as outras matrizes existentes (MOTA, 2010).

Os polímeros são macromoléculas formadas por ligações covalentes entre unidades químicas que se repetem, denominadas meros, e que se caracterizam pelo tamanho, interações químicas e estrutura. Todos os polímeros são macromoléculas, entretanto o inverso não é verdadeiro (MANO e MENDES, 1999).

O número de meros em uma cadeia polimérica é denominado grau de polimerização, e está relacionado com as propriedades do polímero, geralmente quanto maior esse grau, melhores elas serão (MOTA, 2010; MANO e MENDES, 1999).

A forma com que as cadeias se desenvolvem, apresentando ramificações ou não, também influencia nas propriedades dos polímeros, pois estas estão relacionadas com as ligações intra e intermoleculares, portanto polímeros com cadeias ramificadas apresentam maior densidade de ligações (MOTA, 2010; MANO e MENDES, 1999).

Existem diversas formas de classificar um polímero: segundo a origem, ao número de monômeros, ao método de preparação do polímero, conforme os grupos funcionais presentes na molécula, a solubilidade, entre outras formas (MANO e MENDES, 1999). Segundo a solubilidade, os polímeros se classificam em termoplásticos, que se fundem e solidificam em um processo reversível e são solúveis em solventes adequados, e termorrígidos que por aquecimento ou outra forma assumem uma estrutura reticulada que os torna infusíveis, podendo ou não ser dissolvido dependendo da força das ligações covalentes. Os termorrígidos que apresentam ligações

covalentes mais fortes são completamente insolúveis, já os outros podem ser solúveis, quando usado solventes adequados e extremamente polares (MOTA, 2010; MANO e MENDES, 1999).

Os polímeros termorrígidos são geralmente mais duros, fortes, frágeis e apresentam melhor estabilidade dimensional do que os polímeros termoplásticos. As matrizes termorrígidas são mais leves, de menor custo e apresentam resistência à exposição ambiental, porém são quebradiças e apresentam sensibilidade à umidade, radiação e oxigenação. As matrizes mais comuns são do tipo epóxi, fenólica e de poliéster insaturada (LEVI e PARDINI, 2006; MOTA, 2010; MANO e MENDES, 1999).

2.3 RESINA EPÓXI

A resina epóxi é um polímero que apresenta no mínimo dois anéis do grupo funcional epóxi (ALMEIDA, 2005).

É uma resina de alto desempenho, com excelentes propriedades mecânicas e térmicas. A epóxi é um dos mais importantes polímeros termorrígidos, devido ao alto módulo e resistência mecânica, por manter suas propriedades a altas temperaturas e, também, por ter várias formas de processamento. A resina epóxi é aplicada em vários setores da indústria: eletroeletrônica, de transporte, indústria civil, de embalagens e de tintas, ganhando mais destaque em aplicações como recobrimentos de proteção, adesivos, equipamentos para a indústria química, encapsuladores eletrônicos e compósitos estruturais laminados (LEVY e PARDINI, 2006; COSTA et al., 2011; SHIINO, 2011; SHIH et al., 2012; ALAMRI et al., 2012).

As resinas epóxi apresentam fragilidade e baixa resistência à propagação de trincas, devido à alta densidade de ligações cruzadas, mesmo assim apresentam boas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas (COSTA et al., 2011).

As resinas epóxi mais usadas têm como base o diglicidil éter do bisfenol (DGEBA) e é sintetizada a partir da epicloidrina e do bisfenol-A, e dependendo da relação entre esses dois reagentes, a resina pode ser encontrada na forma líquida e até sólida (LEVY e PARDINI, 2006).

Existe uma enorme variedade de agentes de cura, cada um, destinado ao tipo de processamento usado, pois influencia na cinética de cura, afetando, conseqüentemente, as propriedades do material curado (LEVY e PARDINI, 2006).

A estequiometria entre resina e endurecedor é fundamental na definição das propriedades do produto, porque ela afeta, por exemplo, a temperatura de transição vítrea, o módulo elástico e a resistência mecânica (LEVY e PARDINI, 2006). A proporção entre o agente de cura e a resina está relacionada com o número de grupos epóxi presentes na resina (ALMEIDA, 2005).

2.4 FIBRAS NATURAIS

Nos últimos anos tem aumentado o interesse na tecnologia que possibilite o uso de materiais com menor impacto ambiental, com a finalidade de se preservar para as gerações futuras, e que também apresentem baixo custo, disponibilidade e economia de energia (MARIELLI et al., 2008; MACHADO et al., 2010; MILANESE, 2008; BENINI, 2011; DOAN et al.;2012).

Nesse contexto, recebe grande atenção o uso de fibras naturais em compósitos poliméricos, pois estas são abundantes na natureza, atóxicas, resistentes, de baixo custo, de baixa densidade, de fonte renovável, apresentam flexibilidade no processamento, requerem tratamentos simples da superfície, são moldáveis, não abrasivas quando comparadas a fibras sintéticas como, por exemplo, a fibra de vidro, porosas, viscoelásticas, biodegradáveis, combustíveis e reativas (MARTINS et al., 2004; ANJOS et al., 2003; TITA et al., 2003; MACHADO et al., 2010).

Porém, têm baixa compatibilidade com a matriz e baixa aderência superficial. Um dos fatores da baixa aderência é a relação da matriz e da fibra com a água, pois a matriz apresenta caráter hidrofóbico enquanto a fibra natural tem alta absorção de umidade. (MARTINS et al., 2004; ANJOS et al., 2003; TITA et al., 2003; MACHADO et al., 2010; IOZZI et al., 2010; MARTINS et al., 2008; TITA et al., 2002; BENINI, 2011).

As fibras naturais se dividem quanto à origem em: vegetal, animal e mineral. Dentre estas se destacam as de origem vegetal, devido à grande variedade de plantas disponíveis e que são produzidas em praticamente todos os países (MARIELLI et al., 2010; BENINI, 2011; HO et al., 2011).

As fibras vegetais são constituídas, basicamente, por celulose, hemicelulose e lignina (BENINI, 2011). As fibras vegetais apresentam como principais tecidos: parênquima, colênquima, esclerênquima, epiderme e cutícula, a sequência apresenta os tecidos na ordem dos mais internos para os mais externos no corpo da fibra.

O parênquima é o tecido mais interno da fibra, apresenta células com diâmetros parecidos, é uma região rica em celulose e apresenta função de preenchimento e reserva.

O colênquima surge de células derivadas do parênquima, suas células são compostas por uma parede flexível de celulose, tem função de sustentação e suas células podem dar origem a um terceiro tecido, o esclerênquima. Este também apresenta função de sustentação, suas células são ricas em celulose, o que as tornam resistentes e flexíveis, apresentam uma parede espessa devido à deposição de lignina, que tem uma função de impermeabilização, talvez seja o tecido de maior importância, pois é a região que forma as fibras usadas na indústria têxtil, como o linho e a juta, e conseqüentemente é uma região que apresenta grande influência nas propriedades finais do compósito, pois as fibrilas são formadas de celulose, que é o componente que atua como reforço.

O próximo tecido é a epiderme que tem como função o revestimento e por fim tem-se a cutícula, que é um óleo formado por ácidos graxos, que impermeabiliza e protege a fibra. Além desses tecidos podem-se destacar os vasos condutores, floema e xilema.

A proporção e localização desses tecidos podem sofrer variações devido às condições de cultivo e da localização da fibra no corpo da planta.

As fibras vegetais podem ser usadas na retenção de metais pesados, na construção civil, em argamassas e na substituição das placas de madeira, e como reforços em compósitos (BENINI, 2011; MARIELLI et al., 2010).

O uso de fibras lignocelulósicas, outro nome dado às fibras vegetais, em compósitos envolve aspectos sociais, ambientais e econômicos. Na fabricação do compósito, a escolha da fibra está, principalmente, condicionada aos requisitos do projeto final (LEVY e PARDINI, 2006).

Outra vantagem do uso de fibras naturais vegetais, em relação às fibras sintéticas, é o estímulo de empregos na zona rural, além da economia de energia envolvida na sua produção (MARIELLI et al., 2010; LEVY e PARDINI, 2006).

Entre as desvantagens estão à variabilidade da composição química e morfologia devido ao solo, à época de colheita, do processamento após a colheita e a localização da fibra no corpo da planta. Essa variabilidade afeta as propriedades das fibras, como a baixa estabilidade dimensional, alta sensibilidade a efeitos ambientais, como umidade e temperatura. As fibras lignocelulósicas apresentam propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais estruturais tradicionais, não tolerando altas temperaturas durante o processamento do compósito (LEVY e PARDINI, 2006; BENINI, 2011).

2.5 CAPIM-SAPÊ

O capim-sapê (*Imperata brasiliensis*) é uma planta invasora perene encontrada em áreas degradadas ou cultivadas e em praticamente todo território brasileiro, com exceção da região Norte e parte da região Centro-oeste. Na região Sudeste, sua ocorrência é maior em áreas degradadas ou abandonadas. Por possuir rizomas e produzir sementes leves, sua disseminação é facilitada, o que torna difícil seu controle (CARVALHO e XAVIER, 2006; CARVALHO et al., 2000). Seu maior uso está relacionado com a construção de moradias rudimentares fazendo parte do telhado (OLIVEIRA et al., 2014).

Segundo Machado (2010), é possível aumentar as propriedades mecânicas da fibra de capim-sapê, para isso, deve-se aumentar a cristalinidade da fibra com a remoção de ceras e graxas através de um tratamento alcalino.

2.6 TRATAMENTO ALCALINO

O tratamento alcalino, ou mercerização, constitui-se, basicamente, da imersão da fibra em uma solução de NaOH sob agitação. Nesse processo ocorre a remoção de lignina, hemicelulose e outros componentes da fibra. Fatores como concentração da solução, proporção fibra/solução, tempo de exposição e temperatura influenciam na remoção dos componentes que pode ser desde branda até a degradação (PEREIRA, 2012; VALLS, 2013). O tratamento alcalino causa um aumento da rugosidade da superfície, que melhora a ancoragem, melhorando a adesão entre fibra/reforço e, conseqüentemente, aumenta a resistência mecânica.

Li et al. (2000) observou aumento da adesão fibra/matriz após tratamento alcalino do reforço. Segundo Ray et al. (2002), após tratamento das fibras de juta em solução de NaOH 5% ocorreu desfibrilação, aumento da cristalinidade e redução da densidade das fibras o que resultou em maior resistência à tração. No estudo de Bachtiar et al. (2008), os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de palmeira (*Arenga pinnata* e *Arenga saccharifera*) apresentou um aumento de 16,4% na resistência a tração quando as fibras foram tratadas com uma solução de 0,25 M NaOH por 1h. Sobre o comportamento à flexão, Pires (2009) observou um aumento na resistência do compósito epóxi/juta quando a fibra era tratada em meio alcalino.

Machado et al. (2010) estudou a fibra de sapê in natura e após tratamento químico com NaOH, e concluiu que o tratamento alcalino com 15% de NaOH por 90 minutos aumentou a cristalinidade da fibra. Segundo o pesquisador, o aumento na cristalinidade melhorou as propriedades mecânicas do compósito (MARTINS et al., 2008; PEREIRA, 2010).

2.7 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio de flexão é o esforço que se caracteriza por induzir numa peça tensões de compressão em uma região, enquanto na região oposta são exercidas tensões de tração (VENTURA et al, 2006;).

O ensaio de flexão é realizado tanto em materiais frágeis como em materiais com alta resistência e tem como objetivo determinar a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade em flexão. A sua grande vantagem é a utilização dos corpos de prova de geometria simples. No entanto, para materiais muito frágeis, os resultados obtidos podem apresentar grande dispersão, de modo que, nesses casos devem ser realizados um maior número de ensaios para estabelecer um valor médio (CALLISTER JR, 2002).

O ensaio de flexão em três pontos consiste em apoiar o corpo de prova, em geral de seção retangular ou circular, sobre dois apoios fixados a um suporte com travessa fixa e o carregamento é realizado por meio de um terceiro apoio (travessa móvel), o qual é posicionado no centro do mesmo. A carga aplicada parte do zero e aumenta até a ruptura do corpo de prova. No ponto de carregamento, a superfície superior do corpo é colocada em um estado de compressão, enquanto a superfície inferior encontra-se em tração (CANTO e PESSAN, 2007).

Os ensaios de flexão são, geralmente, aplicados a materiais poliméricos rígidos e semirrígidos. O corpo de prova é defletido até que a ruptura aconteça na superfície externa do mesmo, na parte oposta ao carregamento, ou até que uma deformação máxima de 5,0% seja atingida, o que ocorrer primeiro (CANTO e PESSAN, 2007).

A tabela 1 exhibe um quadro comparativo entre as resistências à flexão de alguns compósitos reforçados com fibras vegetais.

2.8 ENSAIO DE TRAÇÃO

Um dos ensaios mais utilizados é o ensaio por tração por ser relativamente simples e de fácil realização. Propriedades mecânicas importantes são obtidas através desse ensaio, como módulo de elasticidade, limite de resistência à tração e alongação na ruptura (BENINI, 2011; CALLISTER, 2006).

Tabela 1 – Estudo comparativo do valor de resistência à flexão de compósitos reforçados com fibras vegetais.

Compósitos	Disposição das Fibras	Tipo de processamento	Resistência à Flexão (MPa)
Epóxi/bambu	Unidirecional	Moldagem por Compressão	192
Epóxi/coco	Manta	Moldagem por Compressão	37
Epóxi/juta	Tecido	Laminação manual com auxílio de prensa hidráulica	164
Epóxi/sisal	Tecido bidirecional	Moldagem por transferência de resina (RTM)	75

Fonte: (OLIVEIRA, 2013).

A resistência à tração e a tenacidade do material são obtidas por curvas do tipo tensão versus deformação. O valor que ela representa é o da carga aplicada ao material por unidade de área (MANO 2003; CANEVAROLO, 2004).

Os ensaios são realizados por meio da aplicação controlada de cargas sob o material e geralmente a taxa de alongamento é constante. Durante o ensaio, os valores de tensão e alongamento são registrados, para que, posteriormente possa-se construir a curva de onde são retirados os valores correspondentes ao módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação do material (CANEVAROLO, 2004).

A forma de uma curva tensão-deformação de um material dependerá de sua composição, história anterior de deformação plástica, e da taxa de deformação, temperatura e estado de tensões impostas durante o teste (CALLISTER, 2006).

A curva pode ser dividida em duas partes: região elástica onde a tensão é linearmente proporcional à deformação, quando a carga ultrapassa o valor correspondente ao limite de escoamento, o corpo de prova sofre deformação plástica generalizada. A partir desse ponto ele está permanentemente deformado, mesmo se a

carga for reduzida a zero, esta região é conhecida como região plástica (CALLISTER, 2006).

Sobre as propriedades mecânicas pode-se citar a resistência à tração, ou tensão máxima, que é a carga máxima dividida pela área da seção reta transversal do corpo de prova, o valor mais citado no resultados de um ensaio de tração. Limite de escoamento é a máxima tensão que um corpo possa sofrer e ainda se manter dentro da sua faixa elástica, ele é obtido verificando-se a descontinuidade na escala da força durante o ensaio e o patamar formado no gráfico exibido pelo gráfico, com esse dado é possível calcular o limite de escoamento do material, o valor convencionalizado corresponde a um alongamento percentual, geralmente o valor usado é 0,2%. Gráficamente, o limite de escoamento dos materiais citados pode ser determinado pela construção de uma linha paralela ao trecho linear do diagrama tensão-deformação. Quando essa linha interceptar a curva, o limite de escoamento estará determinado. E módulo de elasticidade é a medida da rigidez do material, quanto maior o módulo, menor é a deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada carga (CALLISTER, 2006).

Comparados aos metais e cerâmicas, os polímeros apresentam baixa resistência mecânica, devido às questões de ordem química e estrutural, entretanto, quando combinados a outros materiais, como fibras, na forma de compósito, atingem índices tão bons ou melhores que os materiais metálicos ou cerâmicos (CANEVAROLLO, 2004; MANO, 2003; BENINI, 2011).

A tabela 2 apresenta um quadro comparativo entre as resistências à tração de diversos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais.

Tabela 2 – Estudo comparativo do valor de resistência à tração de compósitos reforçados com fibras vegetais.

Compósitos	Disposição das Fibras	Tipo de processamento	Resistência à tração (MPa)
Epóxi/bambu	Unidirecional	Moldagem por compressão	176,0
Epóxi/coco	Manta	Moldagem por compressão	17,7
Epóxi/juta	Tecido	Laminação manual com auxílio de prensa hidráulica	44,7
Epóxi/juta tratada em NaOH	Tecido	Laminação manual com auxílio de prensa hidráulica	51,4
Poliuretano/sisal	Tecido	Moldagem por compressão	17,0
Fenólica/sisal	Tecido	Moldagem por compressão	25,2

Fonte: PIRES, 2009 (juta); GONÇALVES, 2010 (coco); TARGA, 2011 (bambu); MILANESE, 2012 (sisal).

2.9 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é um modelo estatístico, desenvolvido por Fisher, que estuda a influência de variáveis em um processo. É recomendado quando se deseja testar se existe diferença entre três ou mais grupos de dados independentes e paramétricos (ANJOS, 2009; SPIEGEL, 1993).

Este teste estatístico decompõe a variação total da variável resposta em uma parte comparando a variância entre os tratamentos e a variância do erro experimental. Essas variâncias são obtidas pela soma dos quadrados (SQ). A tabela 3 apresenta a organização dos dados necessários para realização deste teste (ANJOS, 2009; MONTORO, 2014).

Tabela 3 – Dados da análise de variância.

Causas da variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F_{calculado}
Tratamentos	I-1	SQ _{trat}	MQ _{trat}	QM _{trat} /QM _{erro}
Erro	I (J-1)	SQ _{erro}	MQ _{erro}	---
Total	IJ-1	SQ	---	---

I – quantidade de tratamentos, J – unidades experimentais, SQ_{trat} – soma dos quadrados da variável, SQ_{erro} – soma dos quadrado do erro, MQ_{trat} – quadrado médio da variável, MQ_{erro} – quadrado médio do erro.

Fonte: Adaptado (ANJOS; 2009).

Para testar se a hipótese de que todas as médias amostrais são iguais faz-se uso do teste F. Compara-se o F_{calculado}, que é a razão entre os quadrados médios do fator (MQ_{trat}) e do erro (MQ_{erro}), com o F_{crítico} que é tabelado por Snedecor-Fisher em função do nível de confiança, pelo grau de liberdade do fator e pelo grau de liberdade do erro. Caso o F_{calculado} seja maior que o F_{crítico}, a hipótese de igualdade entre os fatores é rejeitada, se for menor, não se rejeita esta hipótese, ou seja, não há evidência de diferença significativa entre as variáveis ao nível de significância escolhido (ANJOS, 2009; MONTORO, 2014; SPIEGEL, 1993).

Além da comparação entre F_{crítico} e F_{calculado} pode-se avaliar hipóteses pela comparação entre o p-valor e o nível de significância escolhido. O p-valor varia entre 0 e 1 e representa a probabilidade dos valores estarem dentro do intervalo de confiança escolhido. O nível de significância (α) é a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula, ou seja, aquela onde há igualdade entre os fatores, sendo ela verdadeira. Desta forma, 1- α é a probabilidade da decisão ser correta, este é o valor do coeficiente de confiança, o nível de significância é escolhido pelo pesquisador. Assim, se o p-valor for maior que α , rejeita-se a hipótese nula, caso contrário, nada se pode afirmar (ANJOS 2009; MONTORO, 2014).

2.10 MÉTODO TUKEY

O teste proposto por Tukey, em 1953, é um teste de comparações múltiplas, onde são comparadas as médias, duas a duas, dos tratamentos. O método se baseia na diferença mínima significativa (zeta) segundo a Equação (1) (ANJOS, 2009):

$$\text{zeta} = q \cdot \sqrt{QM_e} \quad (1)$$

Onde q é a amplitude studentizada, que é um valor tabelado e depende do número de fatores, do número de graus de liberdade do erro e do nível de significância escolhido, e QM_e é o quadrado médio do erro. O quadrado médio é obtido pela razão entre a soma dos quadrados e os graus de liberdade. Caso o valor de zeta seja maior que o módulo da diferença entre as médias comparadas se aceita a hipótese que elas são iguais, se zeta for menor, os tratamentos diferem significativamente entre si (ANJOS, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

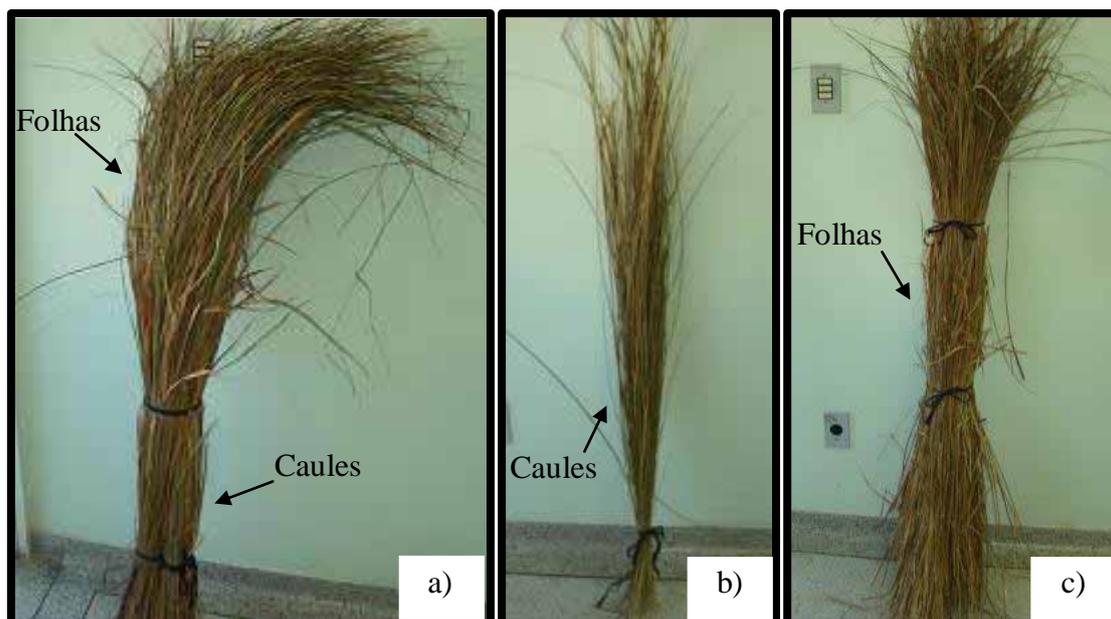
3.1 MATERIAIS

3.1.1 Capim-sapê

O capim-sapê foi obtido na cidade de Guaratinguetá, estado de São Paulo e utilizado como fibra longa.

Primeiramente, o capim após corte (Figura 1a) passou por uma seleção manual, em que foram separadas as camadas internas do “caule” que deram origem às fibras longas (Figura 1b), com a retirada das lâminas foliares que são as camadas mais externas e menos resistentes (Figura 1c).

Figura 1 – Capim-sapê: a) após colheita; b) camada interna do caule, c) lâminas foliares (camada externa) que foram extraídas do caule.



Fonte: O autor.

O caule foi, então, cortado no tamanho do molde, 27 cm, caracterizando as fibras longas (Figura 2).

Depois da obtenção das fibras longas, elas foram lavadas com água destilada fervente e levadas a secagem em estufa por no mínimo 3 (três) dias, a uma temperatura de 60°C.

Posteriormente a secagem, parte do material foi separado para realização do tratamento alcalino.

Figura 2 – Fibras longas selecionadas do caule.



Fonte: O autor.

3.1.2 Resina epóxi

Para o processamento dos compósitos foi utilizada a resina epóxi bicomponente da marca POLIPOX, composta pela resina RL3135-LV, de alta viscosidade, e pelo endurecedor EL3135-L (Tabela 4). A proporção da resina e endurecedor usada foi de 1:0,35 (m/m), de acordo com a recomendação do fabricante.

Tabela 4- Dados da resina epóxi composta pelo reagente RL3135-LV e endurecedor EL3135-L.

	Resina RL3135-LV	Endurecedor EL3135-L
Proporção (gramas)	100	35
Massa específica a 25°C (g/cm³)	1,12 – 1,16	0,99 – 1,00
Viscosidade a 25°C (mPas)	540 – 810	58 – 87
Tempo de gel da resina após mistura com endurecedor a 25°C (min)	110 min	

Fonte: (POLIPOX, 2012).

3.1.3 Outros materiais

Outros materiais usados para o processamento foram: molde de silicone, placas temperadas de vidro, grampos de metal e desmoldante 700 NC da marca FREKOTE.

3.2 PROCESSAMENTO

3.2.1 Tratamento das fibras

As fibras foram separadas em três grupos, cada um recebeu um tratamento específico. O primeiro grupo foi composto por fibras “não tratadas” que foram apenas lavadas com água destilada fervente e secas em estufa a 60°C.

O segundo e terceiro grupos receberam tratamento alcalino com diferença na concentração da solução de NaOH. O segundo grupo com 5% (m/v) e para o terceiro com 10% (m/v) (Figura 3). O tratamento alcalino foi conduzido da seguinte forma: foi preparada uma solução com água destilada e hidróxido de sódio na concentração desejada; fibras foram imersas nessa solução; aquecidas a 70°C; agitadas manualmente por 1h e após esse período foram lavadas com água destilada e secas em estufa a 60°C. A tabela 5 apresenta os dados utilizados nos tratamentos.

Tabela 5 – Condições dos tratamentos.

Condições	Grupos		
	Não tratadas	Tratadas - 5%	Tratadas – 10%
Concentração de NaOH (% m/v)	0	5	10
Temperatura da solução	100 °C	70 °C	70 °C
Tempo de tratamento	---	60 min	60 min
Temperatura de secagem	60 °C	60 °C	60 °C

3.2.2 Processamento dos compósitos

Foram processadas placas de compósitos por compressão manual entre placas de vidro utilizando molde de silicone e desmoldante. As placas foram prensadas por grampos metálicos.

A resina e o endurecedor foram misturados manualmente por cerca de 5 minutos e na proporção recomendada pelo fabricante. Após a mistura, a resina foi desgaseificada por cerca de 20 minutos para eliminação de gases incorporados durante a mistura e para aumento da viscosidade.

Na preparação do reforço, as fibras foram fixadas lado a lado, formando uma placa para diminuição do espaçamento entre as fibras (Figura 4).

Figura 3 – Etapas do tratamento alcalino: a) fibras selecionadas; b) início do tratamento; c) após 1 hora de tratamento; d) após secagem das fibras em estufa.



Fonte: O autor.

Figura 4 – Fibras fixadas lado a lado.



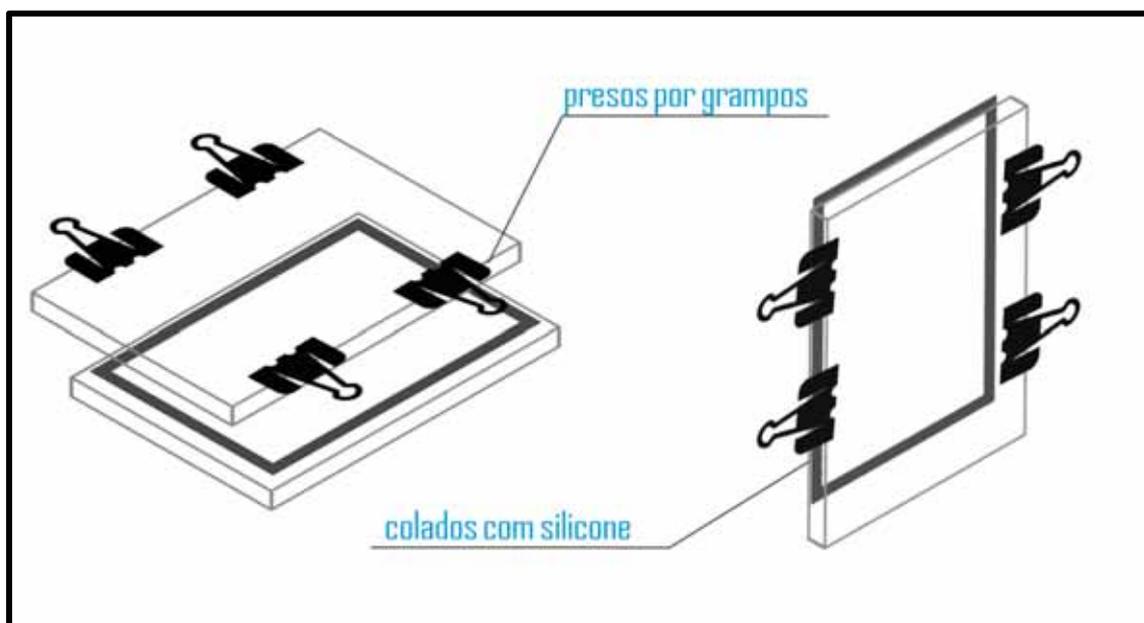
Fonte: O autor.

Foram utilizadas duas placas de vidro para a composição do molde (Figura 5). No processamento do compósito, o molde de silicone (formato retangular) foi fixado com silicone em pasta em uma das placas de vidro, as fibras foram colocadas sobre o vidro e, então, a resina foi despejada sobre as fibras, sendo fechada com a segunda placa de vidro. Toda a estrutura foi pressionada por grampos metálicos e o molde mantido na posição vertical para facilitar a saída dos voláteis produzidos e dos gases incorporados durante o fechamento. Porém, nesse método ocorreu vazamento da resina e a colocação da segunda placa para o fechamento favorecia a formação de bolhas, portanto, adotou-se uma segunda forma de fechamento do molde.

Na segunda forma de fechamento do molde, o molde de silicone (formato de U) foi colado com silicone em pasta em uma das placas de vidro. Então, colocou-se a fibra e a outra placa de vidro também foi colada ao molde de silicone. Antes de verter a resina, vedando todo o molde. O molde foi colocado na posição vertical e, então, se verteu a resina lentamente entre as fibras, facilitando a saída de ar do molde.

Em ambos os casos, a resina curou em temperatura ambiente e a desmoldagem foi realizada após 7 (sete) dias.

Figura 5 – Representação do molde utilizado para o processamento dos compósitos.



Fonte: O autor.

3.2.3 Ensaio de tração

Os ensaios de tração, assim como a confecção dos corpos de prova, foram baseados em normas internacionais. Para os compósitos foi utilizada a norma ASTM3039 e para as amostras de resina epóxi a norma ASTM D638.

Os ensaios de tração foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, utilizando a máquina universal de ensaios da marca SHIMADZU, modelo AG-X, com uma célula de carga de 50 KN.

A velocidade de ensaio para os compósitos foi de 2 mm/min e as amostras de resina foram ensaiadas a uma velocidade de 5 mm/min.

3.2.4 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão e a confecção das amostras de resina e dos compósitos foram baseados na norma ASTM D790.

Os ensaios de flexão foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, utilizando a máquina universal de ensaios da marca SHIMADZU, modelo AG-X, em temperatura ambiente.

As dimensões dos corpos de prova de flexão obedeceram à relação proposta pela norma, que varia em função da espessura da placa produzida.

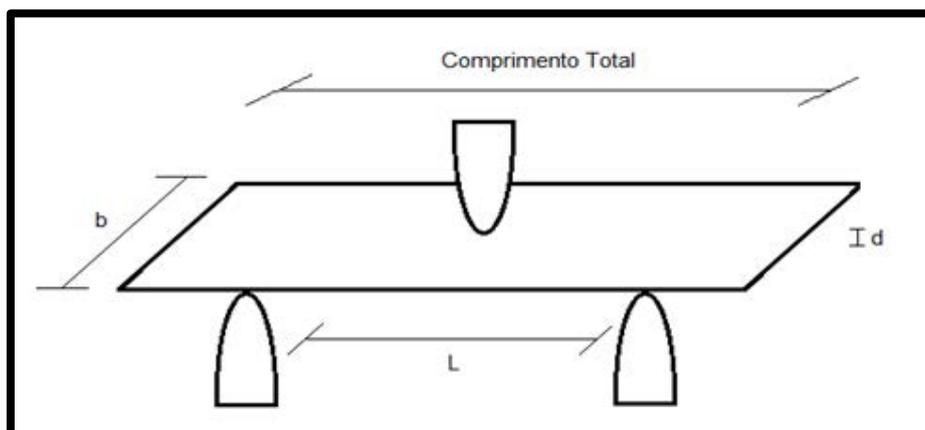
Na tabela 6 são apresentadas as dimensões dos corpos de prova utilizados para cada material estudado, e a Figura 6 esquematiza o ensaio de flexão por 3 pontos.

Tabela 6 - Dimensões dos corpos de prova, em função da espessura.

Especificações	Dimensões (mm)			
	Resina epóxi	Compósito Sem tratamento	Compósito Tratado 5%	Compósito Tratado 10%
D	3,42	3,94	3,90	3,58
L = 16d	54,72	63,04	62,40	57,30
b < L/4	13,68	15,76	15,60	14,30
Comprimento total = 1,2L	65,66	75,65	74,90	68,80

d – espessura do corpo de prova; L – distância entre apoios; b – largura do corpo de prova.

Figura 6 - Ensaio de flexão estática por 3 pontos, em corpo de prova retangular, sendo “L” a distância entre apoios, “b” a largura e “d” a espessura.



Fonte: (OLIVEIRA, 2013).

Os corpos de prova utilizados foram defletidos até que a ruptura na superfície oposta ao carregamento, ou até que uma deformação máxima de 5,0% fosse atingida. Para 5% de deformação máxima foram calculados os valores máximos da deflexão para cada material ensaiado, segundo a norma ASTM D790, utilizando a Equação (2):

$$D = \frac{rL^2}{6d} \quad (2)$$

Em que:

D = deflexão máxima dos corpos de prova em mm;

r = deformação máxima de 0,05 em mm/mm;

L = distância entre os apoios do equipamento em mm;

d = espessura dos corpos de prova em mm.

A velocidade de carregamento no ensaio de flexão foi calculada, segundo a norma ASTM D790, utilizando a Equação (3):

$$D = \frac{ZL^2}{6d} \quad (3)$$

Em que:

V = velocidade de carregamento em mm/min.;

Z = taxa de esforço em mm/mm/min. (cm/pol./min.), sendo Z é igual a 0,01;

L = distância entre os apoios do equipamento em mm;

d = espessura dos corpos de prova em mm.

A tensão de carregamento, após o ensaio de flexão, foi calculada utilizando a Equação (4):

$$\sigma_f = \frac{3PL}{(2bd)^2} \quad (4)$$

Em que:

σ_f = tensão de carregamento em MPa;

P = carga aplicada aos corpos de prova em N;

L = distância entre os apoios do equipamento em mm;

b = largura dos corpos de prova em mm;

d = espessura dos corpos de prova em mm.

3.2.5 Análise estatística

Neste trabalho, foi realizado o estudo estatístico ANOVA (Análise de Variância) e o método de Tukey para a comparação entre os resultados dos ensaios tanto de tração como de flexão, utilizando como auxílio o *software* Excel, da Microsoft.

3.2.6 Microscopia

A microscopia óptica foi realizada nos três grupos de fibras utilizadas nesta pesquisa. Para isso elas foram embutidas em resina epóxi, a mesma utilizada no processamento dos compósitos, e após a cura do polímero foi realizado o lixamento com lixas d'água nas granulometrias de 600, 1000, 1500 e polimento para planificação das amostras. As imagens foram capturadas com ampliações de 6,5x, 10x, 20x e 40x pela câmera AxioCam/Cc3 acopladas ao estéreo microscópio Zeiss Stemi 2000, disponível no Departamento de Engenharia de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP.

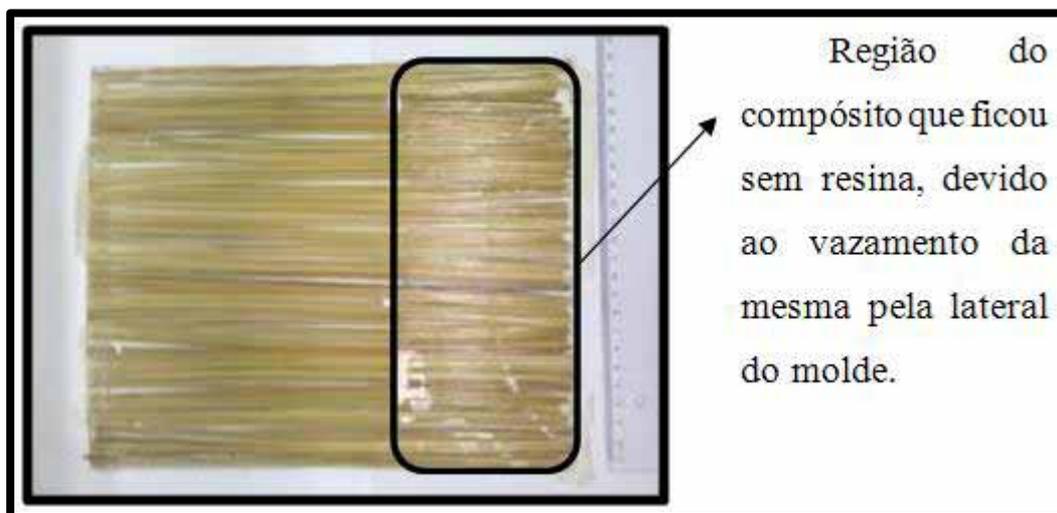
A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para a análise da região da fratura por tração dos compósitos reforçados com fibras quimicamente tratadas (5% e 10%). Para essa análise, as regiões fraturadas foram seccionadas do corpo de prova e fixadas no amostrador, recebendo uma camada de metalização em ouro. As imagens foram feitas utilizando o microscópio eletrônico de varredura da marca ZEISS, modelo EVO LS 15, disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP.

4 RESULTADOS

4.1 PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS

Nas placas confeccionadas com o polímero, cuja resina foi submetida à degaseificação antes da moldagem, foi possível observar menor quantidade de vazios e bolhas incorporadas à resina, além de apresentarem menor quantidade de vazamento, pois durante o tempo de degaseificação houve também o aumento da viscosidade da resina dificultando o seu vazamento (Figura 7).

Figura 7 – Compósito com fibra não tratada apresentando região com falta de resina devido ao vazamento entre o molde de silicone.



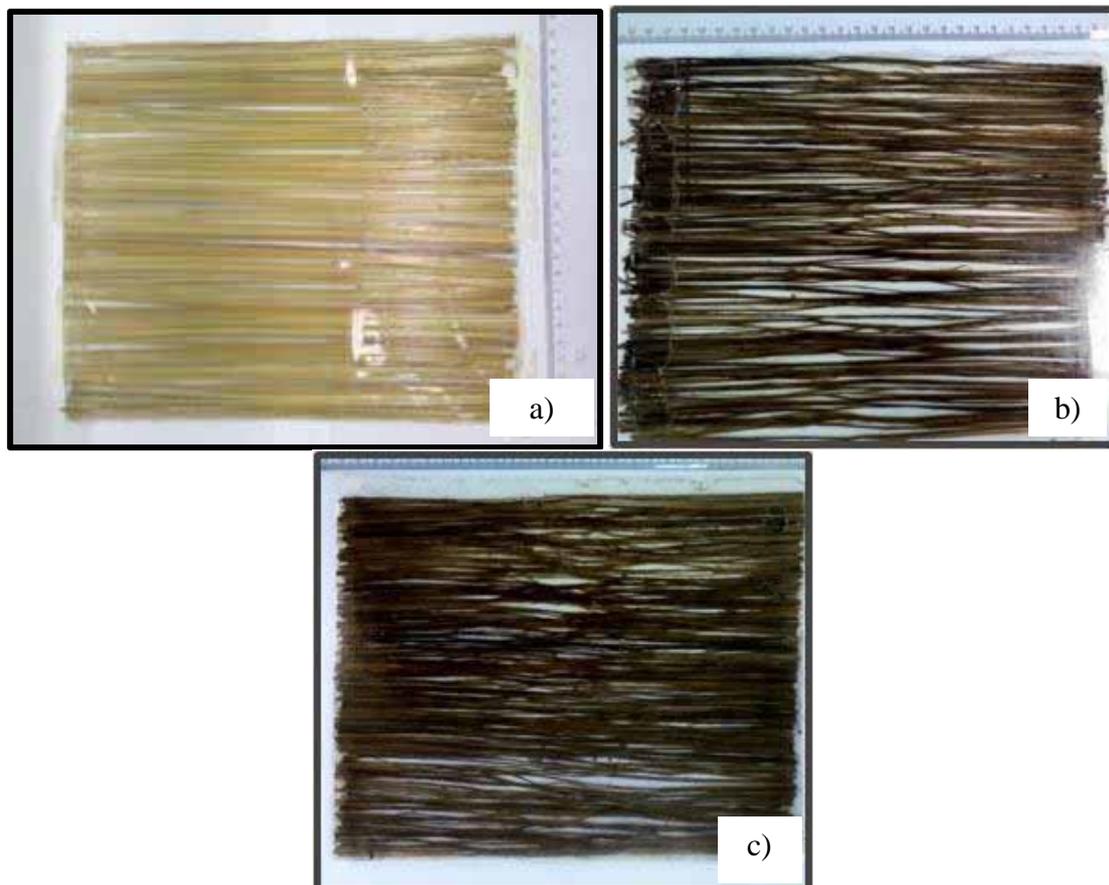
Fonte: O autor.

O método utilizado para o fechamento do molde também possibilitou a redução da indução de bolhas e vazios contidos na resina, pois facilitou a saída de ar do molde, reduzindo, conseqüentemente, as bolhas e vazios formados pela incorporação do ar na resina. A utilização do molde de silicone colado em ambas as faces das placas de vidros foi o que apresentou menor vazamento e menor incidência de vazios, em comparação com o molde que era fechado por grampos.

O reforço apresentou distribuído de forma mais homogênea pela placa quando fixado lado a lado, assim conseguiu-se preencher melhor a área do molde e com menor espaçamento entre as fibras, diferentemente do que ocorria quando as fibras eram apenas colocadas sem fixação no molde.

A Figura 8 ilustra as placas dos compósitos processados.

Figura 8 – Compósitos processados: a) fibra não tratada; b) fibra tratada em solução alcalina, com concentração de 5% de NaOH (m/v); c) fibra tratada em solução alcalina, com concentração de 10% de NaOH (m/v).



Fonte: O autor.

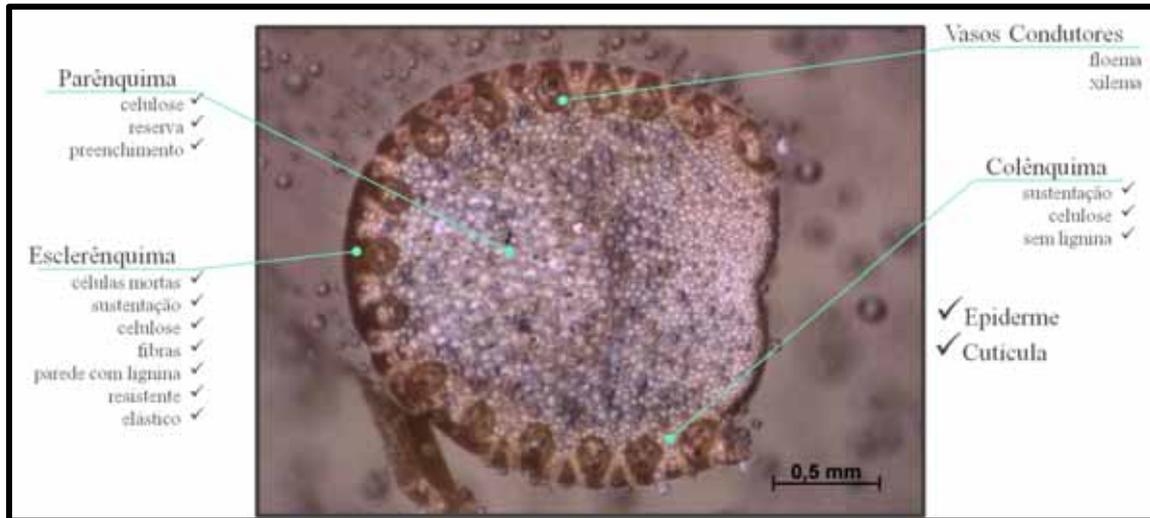
4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

É possível observar na Figura 9, nas imagens obtidas pela microscopia óptica, os tecidos que constituem a fibra de capim-sapê, com a presença de parênquima, colênquima, esclerênquima e dos vasos condutores. As fibras de capim-sapê apresentam um formato oval ou semi-oval e com uma superfície aparentemente mais uniforme o que desaparece após o tratamento químico.

Além dos seus constituintes observou-se, também, uma mudança de coloração conforme a concentração da solução de hidróxido de sódio foi aumentada. Próximo a superfície da fibra a área em que ocorre a mudança de cor se torna maior na fibra tratada

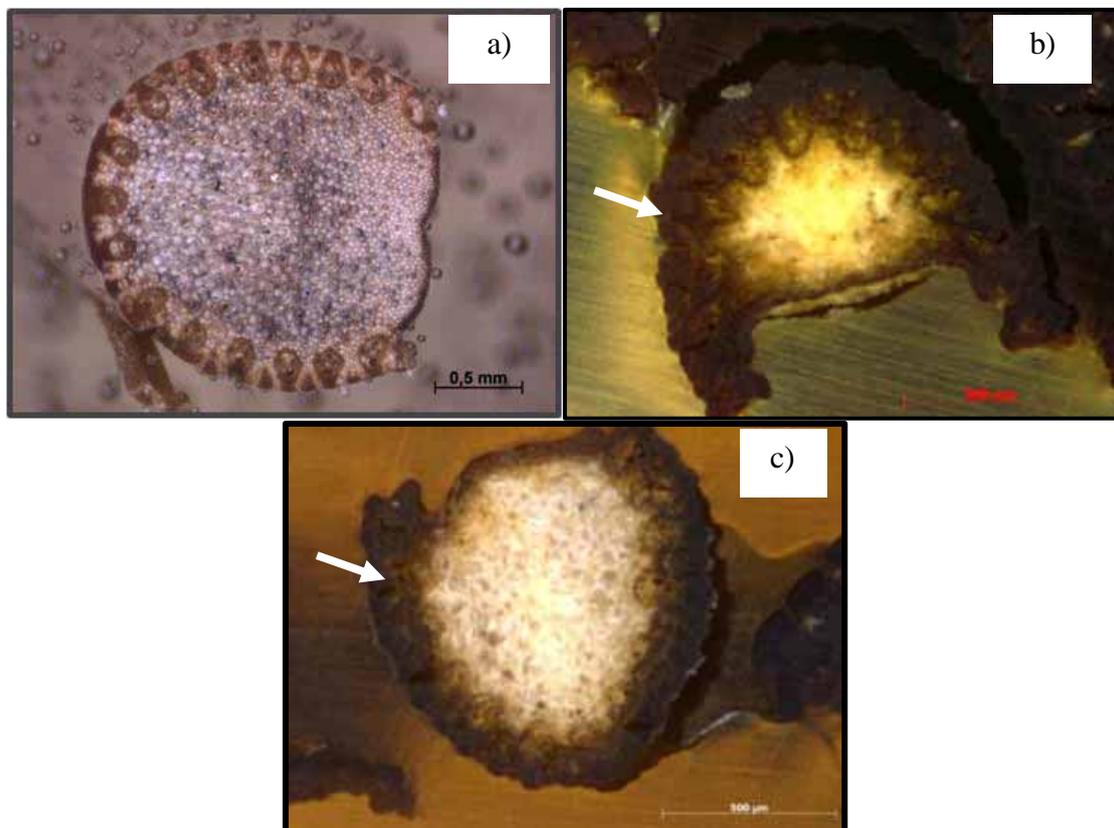
em uma solução com concentração de 10% de NaOH e é inexistente nas fibras que foram apenas lavadas com água destilada fervente (Figura 10).

Figura 9 – Os tecidos presentes na fibra de capim sapê. Aumento de 40x.



Fonte: O autor.

Figura 10 – Fibras de capim-sapê: a) não tratadas quimicamente. Aumento de 40x; b) tratadas em solução com 5% de NaOH (m/v). Aumento 40x; c) tratadas em solução com 5% de NaOH (m/v), aumento 40x.



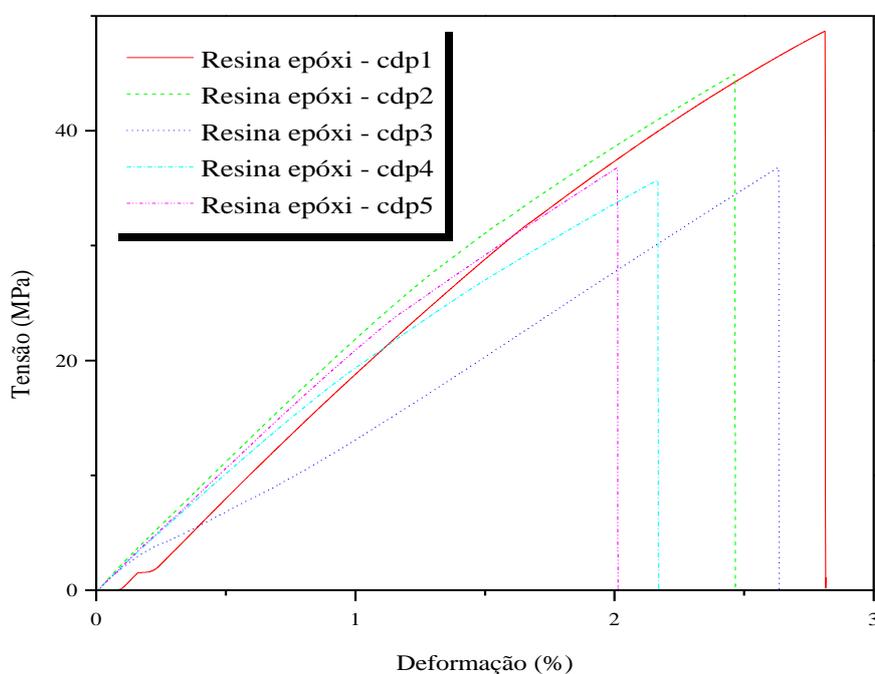
Fonte: O autor.

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

As amostras de resina epóxi apresentaram tensão máxima igual à tensão de ruptura durante os ensaios (Figura 11), e apresentou uma resistência média à tração de 40,47 MPa e deformação de 2,47%. Foram ensaiados 7 (sete) corpos de prova, porém em dois deles a fratura ocorreu fora da área útil e por esse motivo os dados não foram considerados para o cálculo da resistência. A Tabela 7 apresenta as resistências individuais dos corpos de prova ensaiados.

O compósito reforçado com fibras não tratadas não rompeu na área útil do corpo de prova durante o ensaio (Figura 12). Após a fratura da resina na região da garra, o reforço desliza pela matriz, sem rompimento da fibra. Isso ocorreu devido à baixa adesão entre o reforço e a matriz, havendo uma redução da resistência à tração se comparado a resina epóxi pura. Esse compósito apresentou resistência máxima à tração de 30,31 MPa e deformação de 1,15% (Tabela 8).

Figura 11 – Gráfico tensão versus deformação das amostras de resina epóxi.



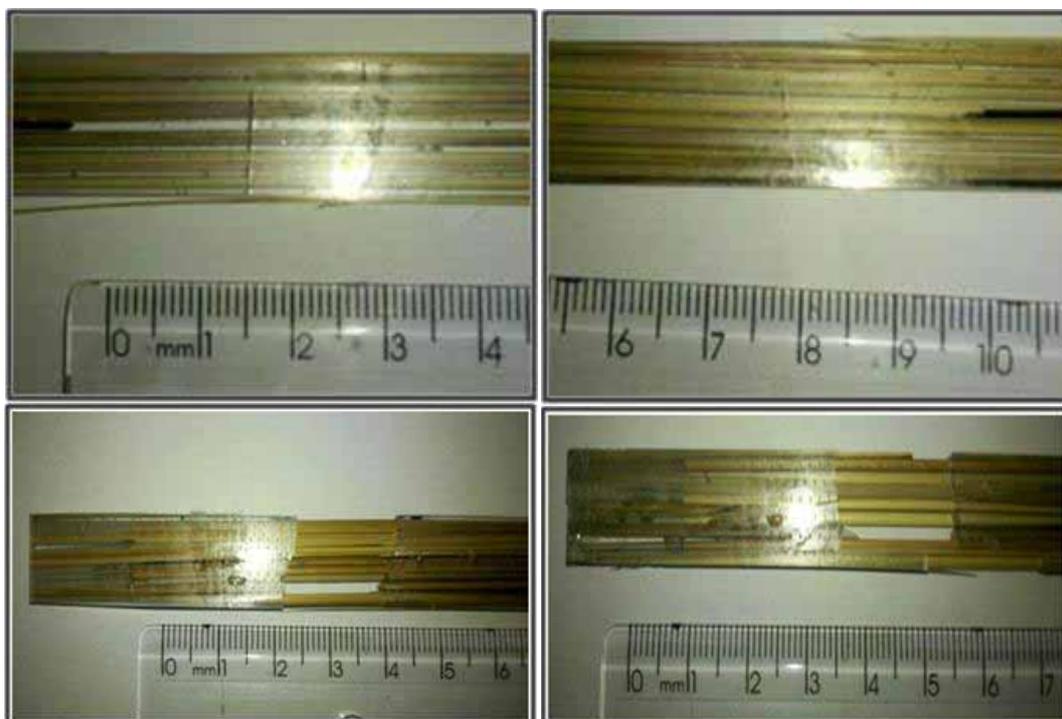
Fonte: O autor.

Tabela 7 – Dados do ensaio de tração da resina epóxi.

Amostras	Resina epóxi		
	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	48,68	2,81	1,66
2	44,93	2,46	1,83
3	36,23	2,63	1,38
4	35,72	2,17	1,65
5	36,78	2,01	1,83
Média	40,47	2,42	1,67
Desvio padrão	5,95	0,33	0,18

Fonte: O autor.

Figura 12 – Detalhe do rompimento da resina e deslizamento (arrancamento) da fibra na matriz.



Fonte: O autor.

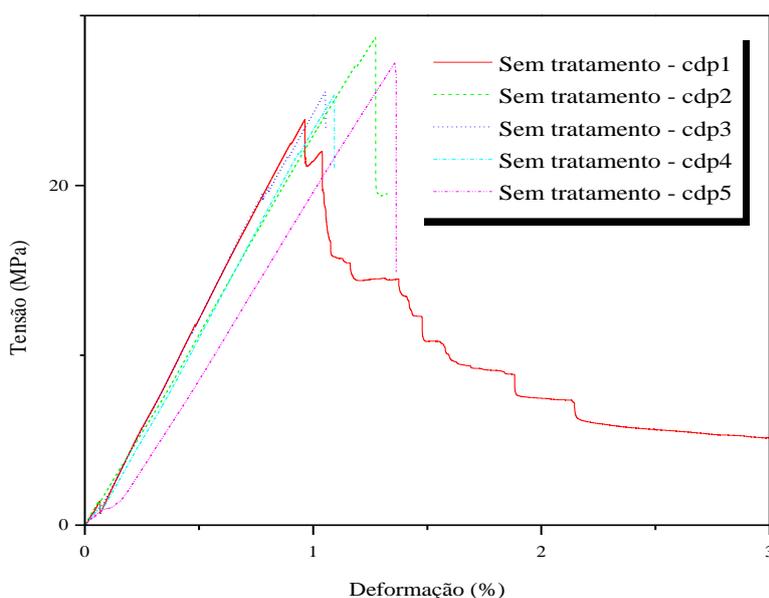
Tabela 8 – Dados do ensaio de tração do compósito epóxi/sapê não tratado (sem tratamento alcalino).

Amostras	Compósito sem tratamento		
	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	24,38	0,97	2,51
2	43,23	1,27	3,40
3	23,74	1,05	2,26
4	27,80	1,09	2,55
5	32,41	1,36	2,38
Média	30,31	1,15	2,62
Desvio padrão	8,00	0,16	0,45

Fonte: O autor.

A Figura 13 apresenta as curvas tensão x deformação das amostras do compósito epóxi/sapê não tratado onde foi possível observar uma pequena resistência após a tensão máxima, essa resistência foi gerada pelo deslizamento (arrancamento) das fibras pela matriz.

Figura 13 – Gráfico tensão versus deformação das amostras do compósito reforçado com fibra sem tratamento alcalino.



Fonte: O autor.

Com relação aos compósitos reforçados com fibra tratada em solução de 5% de NaOH (Figura 14) houve rompimento de quase todas as fibras, em que as poucas fibras que resistiram (não romperam) ficaram muito próximas da fratura. O comportamento das amostras foi semelhante ao das amostras de resina epóxi (Figura 15). O compósito com fibra tratada a 5% de NaOH apresentou um valor médio de resistência à tração maior do que a resina epóxi e maior do que o compósito com fibras não tratadas, apresentando resistência máxima à tração de 43,53 MPa e deformação de 1,43% (Tabela 9).

Figura 14 – Corpos de prova do compósito epóxi/sape tratado com 5% de NaOH após ensaio de tração.

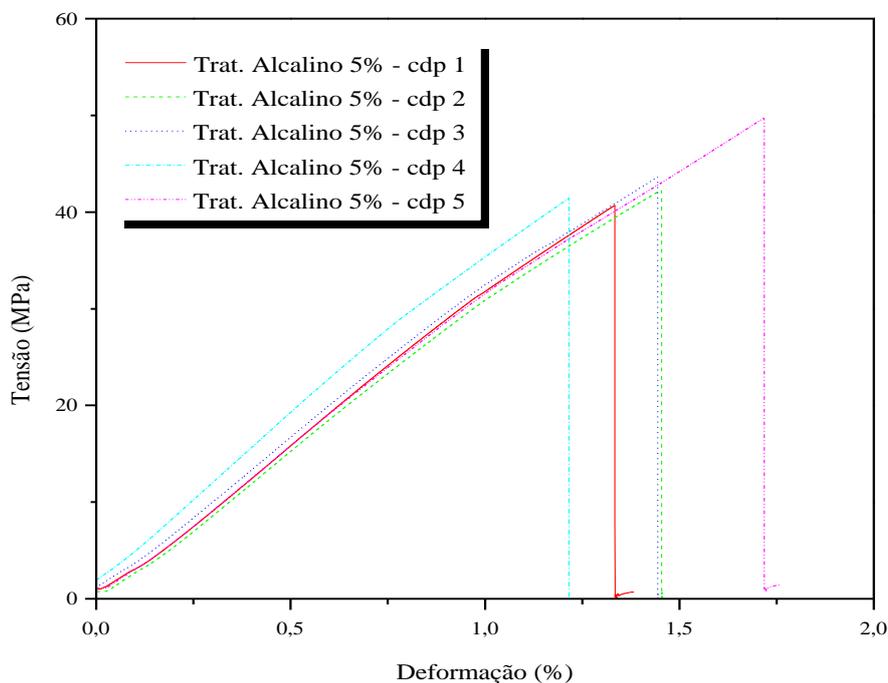


Tabela 9 – Dados do ensaio de tração do compósito com reforço tratado em meio alcalino com 5% de NaOH.

Amostras	Compósito epóxi/sapê 5%NaOH		
	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	40,68	1,33	3,06
2	42,20	1,45	2,91
3	43,62	1,44	3,03
4	41,43	1,21	3,42
5	49,74	1,72	2,89
Média	43,53	1,43	3,06
Desvio padrão	3,63	0,19	0,21

Fonte: O autor.

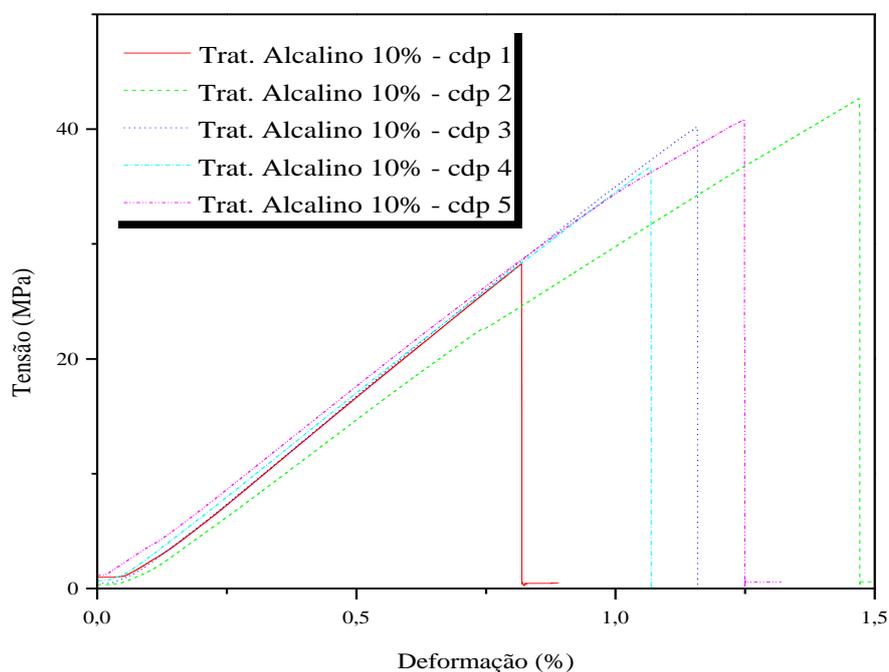
Figura 15 – Gráfico tensão versus deformação do compósito reforçado com fibras tratadas em solução de 5% de NaOH.



Fonte: O autor.

As amostras do compósito epóxi/sapê tratado com 10% de NaOH submetidas ao ensaio de tração apresentaram comportamento similar ao apresentado pela resina epóxi pura e pelo compósito epóxi/sape 5% NaOH (Figura 16). O material apresentou resistência máxima à tração de 37,76 MPa e deformação de 1,15%, como pode ser observado na Tabela 10 e na Figura 17, que apresenta os corpos de prova do compósito reforçado com capim-sapê tratado a 10% após o ensaio.

Figura 16 - Gráfico tensão versus deformação do compósito reforçado com fibras tratadas em solução de 10% de NaOH.



Fonte: O autor.

Tabela 10 – Dados do ensaio de tração do compósito com reforço tratado em meio alcalino com 10% de NaOH.

Compósito epóxi/sapê 10% NaOH			
Amostras	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	28,28	0,82	3,45
2	42,68	1,47	2,90
3	40,19	1,16	3,46
4	36,76	1,07	3,44
5	40,86	1,25	3,27
Média	37,76	1,15	3,30
Desvio padrão	5,72	0,24	0,24

Fonte: O autor.

Figura 17 – Corpos de prova do compósito epóxi/sapê 10% NaOH após ensaio de tração.



Fonte: O autor.

Para comparar se houve diferença entre os valores obtidos da resistência à tração entre os materiais estudados: resina epóxi pura compósito epóxi/sapê não tratado, compósito epóxi/sapê 5% NaOH e compósito epóxi/sapê 10% NaOH foi realizado a Análise de Variância (ANOVA) e aplicado o método Tukey. A um nível de significância (α) de 10%, ou seja, essa análise tem uma confiabilidade de 90%, e encontrou-se diferença entre o compósito epóxi/sapê sem tratamento e a resina epóxi, e entre o compósito epóxi/sapê não tratado e o compósito epóxi/sape 5% NaOH, sendo que, tanto a resina epóxi quanto o compósito com reforço tratado a 5% de NaOH apresentaram uma resistência máxima à tração superior ao compósito com fibras sem tratamento. Os dados utilizados nessa análise podem ser conferidos no apêndice A.

A Tabela 11 apresenta os valores médios das resistências dos materiais ensaiados por tração.

Tabela 11 – Valor médio da resistência à tração dos materiais estudados.

Material	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Resina epóxi	40,47 ± 5,95	2,42	1,67
Compósito sem tratamento	30,31 ± 8,00	1,15	2,62
Compósito epóxi/sapê NaOH 5%	43,53 ± 3,63	1,43	3,06
Compósito epóxi/sapê NaOH 10%	37,76 ± 3,72	1,15	3,30

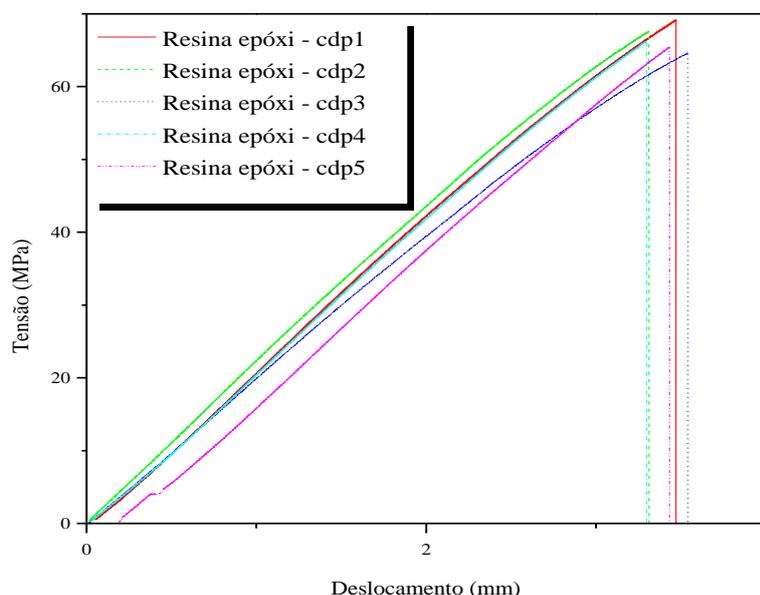
Fonte: O autor.

O compósito epóxi/sapê NaOH 5% apresentou valores intermediários de resistência à tração quando comparado aos compósitos reforçados com fibras vegetais desenvolvidos por outros pesquisadores, sendo que sua resistência à tração tem valor próximo ao apresentado pelos compósitos epóxi/juta (44,69 MPa) e epóxi/fibra de palmeira (41,88 MPa) (PIRES, 2009 e BACHTIAR et al., 2008). Os demais compósitos estudados nesse trabalho, apesar de apresentarem valores inferiores de resistência à tração, ainda estão dentro da faixa de resistência de compósitos reforçados com fibras vegetais. O material mais rígido foi o compósito com fibras tratadas em solução com 10% de NaOH (m/v), apresentando um módulo elástico de 3,30 GPa, seguido do compósito com fibras tratadas em solução com 5% de NaOH (m/v), 3,06 GPa, e do compósito reforçado com fibras não tratadas, 2,62 GPa, ou seja, a adição das fibras vegetais tornou o material mais rígido comparado com a resina epóxi, que apresentou módulo de elasticidade igual a 1,67 GPa.

4.4 ENSAIO DE FLEXÃO

As amostras de resina epóxi ensaiadas apresentaram tensão de ruptura igual à tensão máxima (Figura 18), a resistência à flexão média foi de 75,75 MPa e deslocamento de 3,41 mm. Na Tabela 12 são apresentadas as resistências de cada corpo de prova. A Figura 19 ilustra as amostras após o ensaio de flexão.

Figura 18 – Gráfico tensão versus deformação do ensaio de flexão da resina epóxi.



Fonte: O autor.

Tabela 12 – Dados do ensaio de flexão da resina epóxi.

Amostras	Resina epóxi	
	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
1	76,01	3,47
2	74,65	3,31
3	76,40	3,54
4	71,97	3,30
5	74,65	3,43
Média	74,74	3,41
Desvio padrão	1,77	0,104

Fonte: O autor.

Figura 19 – Corpos de prova de resina epóxi após o ensaio de flexão.

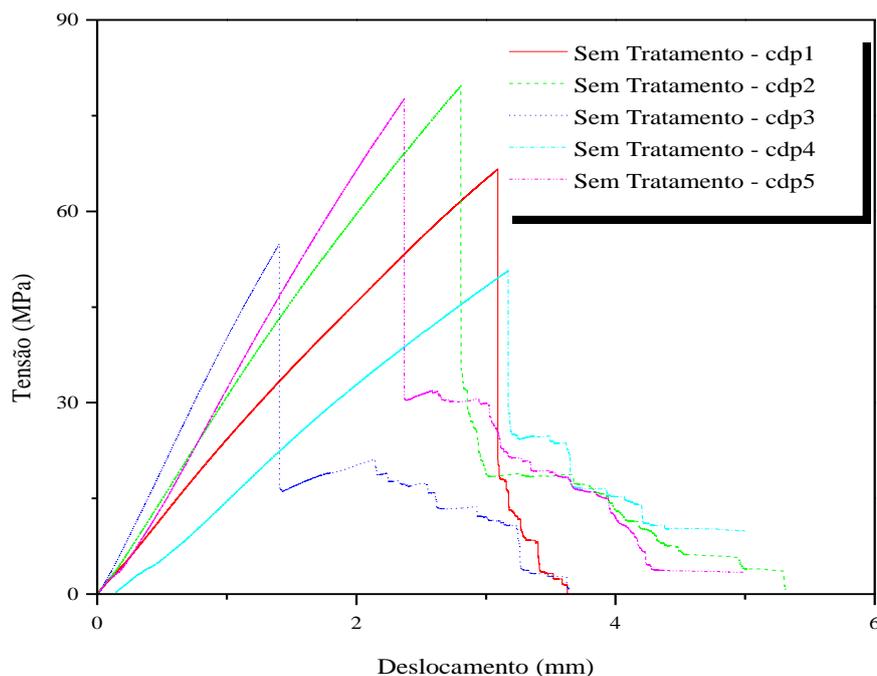


Fonte: O autor.

O compósito reforçado com fibras sem tratamento não apresentou um rompimento característico de materiais frágeis, sendo notada uma resistência após o início da ruptura, como pode ser observado na Figura 20. A primeira queda no gráfico representa a fratura da matriz e, depois, tem-se uma resistência gerada pelo reforço. A resistência a flexão foi de 70,14 MPa e deslocamento de 2,57 mm, como mostrado na Tabela 13. A resistência do corpo-de-prova 3 foi muito inferior as demais resistências, o que fez com que o desvio-padrão aumentasse, essa diferença pode ser explicada pela presença de defeitos, como vazios, na amostra, pela variabilidade das fibras e, principalmente, pela

difícil distribuição homogênea do reforço pela placa, ou seja, nesse corpo-de-prova a densidade de reforço pode ter sido menor do que nas outras amostras, diminuindo a resistência à flexão. A Figura 21 ilustra as amostras após o ensaio.

Figura 20 - Gráfico tensão versus deformação do ensaio de flexão compósito com reforço não tratado.



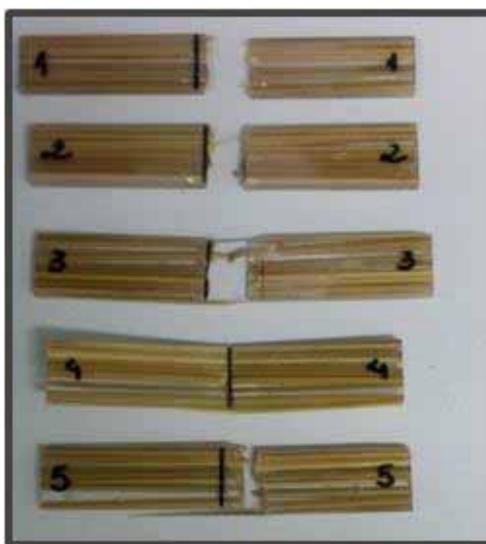
Fonte: O autor.

Tabela 13 – Dados do ensaio de flexão do compósito epóxi/sapê não tratado (sem tratamento alcalino).

Amostras	Compósito sem tratamento	
	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
1	79,80	3,09
2	85,28	2,81
3	47,01	1,41
4	67,32	3,17
5	71,27	2,37
Média	70,14	2,57
Desvio padrão	14,72	0,72

Fonte: O autor.

Figura 21 – Corpos de prova do compósito com reforço não tratado após ensaio de flexão.



Fonte: O autor.

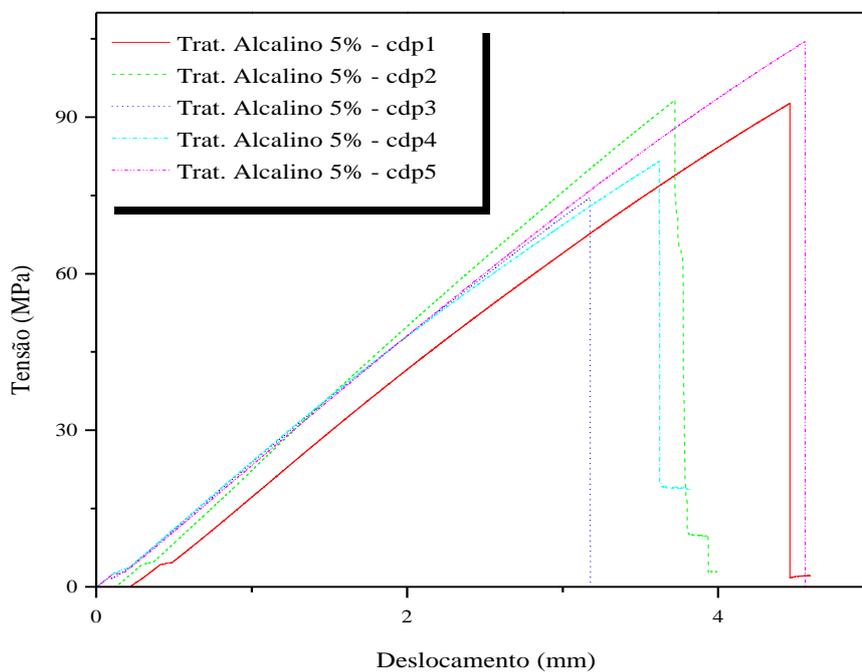
Os corpos de prova do compósito de epóxi/sapê NaOH 5% apresentaram um comportamento semelhante ao comportamento da resina durante o ensaio de flexão (Figura 22). Na Tabela 14 são apresentados os valores das resistências obtidos no ensaio, sendo a resistência média à flexão de 89,29 MPa e deslocamento de 3,91mm. A Figura 23 apresenta os corpos de prova antes e depois do ensaio.

Tabela 14 – Dados do ensaio de flexão do compósito com reforço tratado em meio alcalino com 5% de NaOH.

Amostras	Compósito epóxi/sapê 5%NaOH	
	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
1	92,63	4,46
2	93,24	3,72
3	74,59	3,18
4	81,55	3,62
5	104,46	4,56
Média	89,29	3,91
Desvio-padrão	11,54	0,59

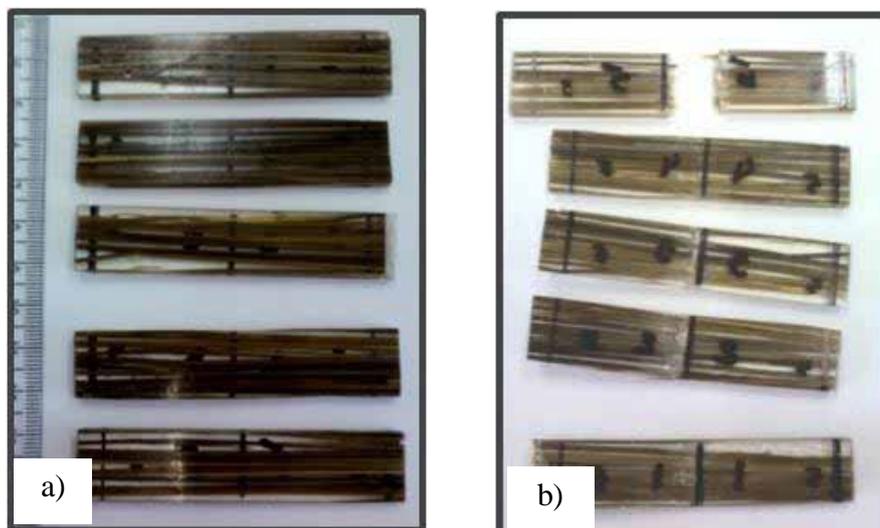
Fonte: O autor.

Figura 22 – Gráfico tensão versus deformação do compósito com reforço tratado em solução com 5% de NaOH.



Fonte: O autor.

Figura 23 – Amostras do compósito com reforço tratado em solução com 5% de NaOH:
a) antes do ensaio de flexão; b) após ensaio de flexão.



Fonte: O autor.

Na Figura 24 pode-se observar o comportamento à flexão do compósito 10%, que apresentou resistência à flexão de 65,81 MPa e deslocamento de 2,54 mm (Tabela 15). Alguns corpos de prova (3, 4 e 5) apresentam resistência após a fratura da matriz,

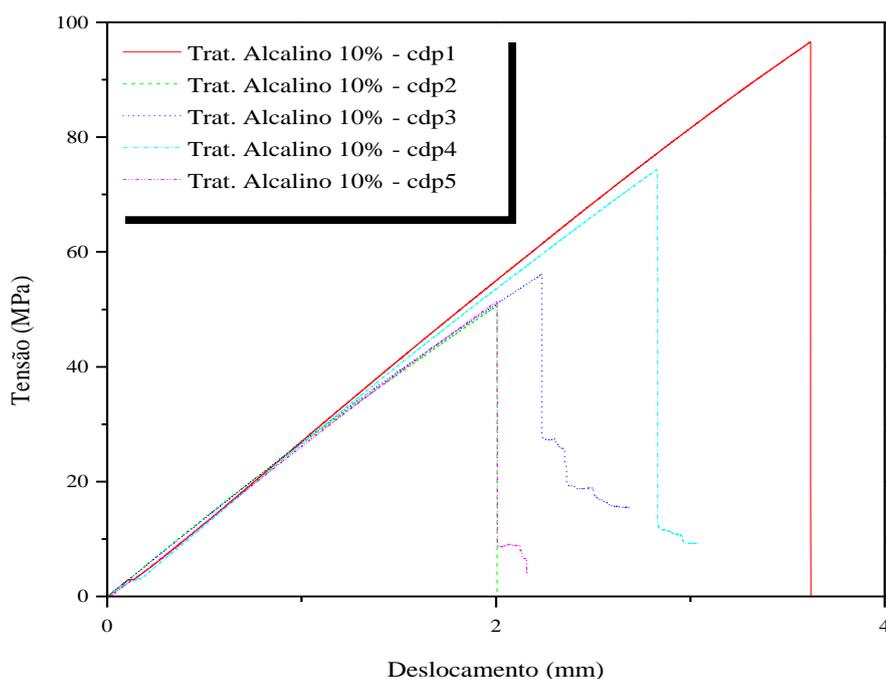
devido a regiões do reforço (fibra) que não romperam. Isso ocorre em razão das variações naturais da morfologia e composição química das fibras vegetais, essa característica lhes confere uma menor uniformidade de suas propriedades, fazendo com que as fibras de um mesmo material apresentem diferentes resistências. A Figura 25 ilustra as amostras antes e após o ensaio de flexão.

Tabela 15 – Dados do ensaio de tração do compósito com reforço tratado em meio alcalino com 10% de NaOH.

Amostras	Compósito epóxi/sapê 10%NaOH	
	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
1	96,59	3,62
2	58,65	2,01
3	58,12	2,24
4	74,43	2,83
5	51,40	2,01
Média	65,84	2,54
Desvio padrão	19,70	0,691

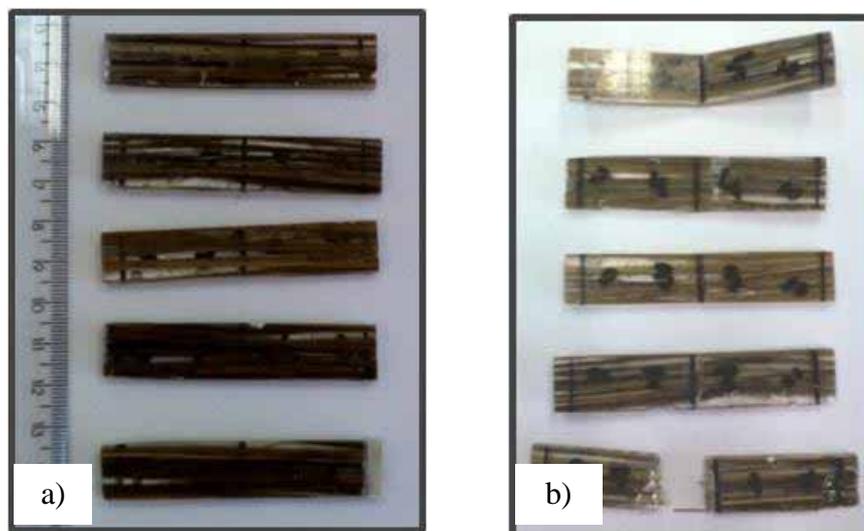
Fonte: O autor.

Figura 24 - Gráfico tensão versus deformação do compósito com reforço tratado em solução com 10% de NaOH.



Fonte: O autor.

Figura 25 - Amostras do compósito com reforço tratado em solução com 10% de NaOH: a) antes do ensaio de flexão; b) após ensaio de flexão.



Fonte: O autor.

Para comparar os resultados obtidos pelo ensaio de flexão, em busca de diferenças significativas entre as resistências dos materiais estudados, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) e o método Tukey. A um nível de significância (α) de 10%, ou seja, com um nível de confiabilidade de 90%, encontrou-se diferença significativa entre o compósito epóxi/sapê NaOH 5% e o compósito epóxi/sapê NaOH 10%, sendo o compósito epóxi/sapê NaOH 5% mais resistente, 89,29 MPa. Os dados utilizados nessa análise podem ser observados no Apêndice A.

A Tabela 16 apresenta os valores médios das resistências dos materiais ensaiados por flexão.

Tabela 16 – Valores médios das resistências dos materiais estudados.

Material	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (mm)
Resina epóxi	74,74 ± 1,77	3,41
Compósito sem tratamento	78,14 ± 14,72	2,57
Compósito epóxi/sapê NaOH 5%	89,29 ± 8,54	3,91
Compósito epóxi/sapê NaOH 10%	65,84 ± 19,70	2,54

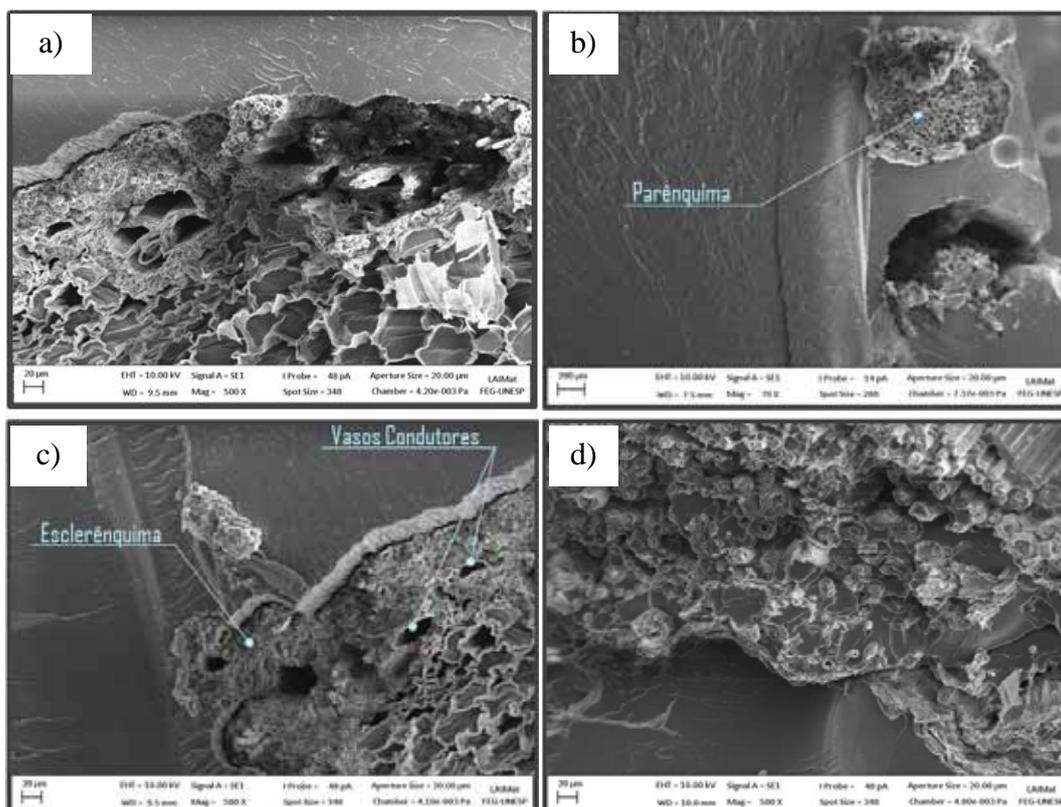
Fonte: O autor.

O compósito epóxi/sapê NaOH 5% apresentou uma resistência à flexão intermediária quando comparado aos compósitos reforçados com fibra vegetal desenvolvidos por outros pesquisadores, apresentados na Tabela 1. Porém, seu desempenho em flexão foi superior aos compósitos reforçados com coco (37 MPa) e sisal (75 MPa) (OLIVEIRA, 2013). Os demais compósitos processados e estudados nesse trabalho, apesar de apresentarem menor resistência à flexão, ficaram com valores próximos aos valores de outros compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais.

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Nas imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura (Figuras 26 e 27), se observa claramente que existem microfibras apenas na região do esclerênquima, justamente na área onde o tratamento alcalino foi mais intenso. As microfibras são protegidas por uma camada de lignina. Além das células esclerênquima is, também estão presentes células que formam o parênquima e vasos condutores.

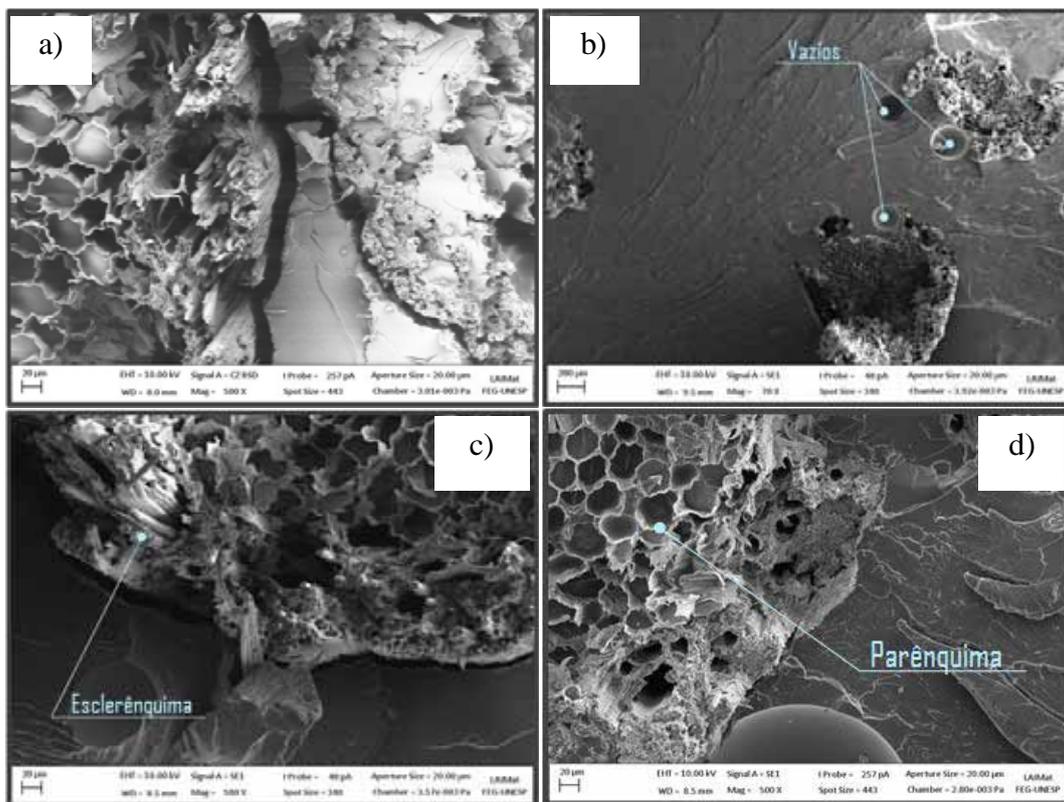
Figura 26 – Região da ruptura no ensaio de tração da fibra tratada em solução com 5% de NaOH: a) região da interface matriz/reforço, aumento de 70x; b) aumento 500x; c) aumento 500x; d) aumento 500x.



Fonte: O autor.

As fibras tratadas em solução de 10% de NaOH apresentaram uma região de lignina que envolve as fibrilas menores, provavelmente, devido ao tratamento mais intenso. Apesar dessas fibras de apresentarem uma rugosidade superficial maior, que levaria a uma melhor ancoragem e maior resistência mecânica, obtiveram resultado inferior as fibras tratadas em um solução com concentração de 5% NaOH (m/v), pois o tratamento em uma concentração superior fragilizou as fibras.

Figura 27 – Região da ruptura no ensaio de tração da fibra tratada em solução com 10% de NaOH: a) aumento de 70x; b) aumento 500x; c) aumento 500x; d) aumento 500x.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

Os objetivos desse trabalho foram atingidos, uma vez que o processamento e a caracterização mecânica por tração e flexão dos compósitos epóxi/sapê propostos foram realizados. Como estudo complementar, foram realizadas análises por microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV).

Quanto ao processamento pode-se concluir que, apesar de não haver mudança significativa nos valores de resistência, o uso da desgaseificação e da forma de fechamento do molde com as placas de vidro coladas facilitou o processamento das placas dos compósitos e evitou o desperdício de material, pois diminuiu o vazamento de resina, além de reduzir o número de bolhas e vazios incorporados a resina polimerizada, pois houve a facilitação da eliminação de gases incorporados quando se vertia a resina utilizando o molde em formato de U.

O estudo de microscopia óptica revelou a presença dos tecidos parênquima, colênquima, esclerênquima, vasos condutores e epiderme na constituição da fibra de capim-sapê e a combinação entre esses tecidos varia conforme a localização da fibra no corpo da planta.

Por meio das imagens de microscopia eletrônica de varredura foi possível observar que o único tecido que apresenta microfibras é o esclerênquima e, portanto, a combinação entre os tecidos que formam a fibra influencia nas propriedades finais do compósito, pois está relacionado com o teor de celulose na fibra, sendo que foi possível detectar a redução do esclerênquima nas fibras tratadas com 10% de NaOH.

O tratamento químico nas fibras resultou em melhor adesão reforço/matriz, uma vez que, houve diferença significativa entre o compósito reforçado com fibras sem tratamento e a resina epóxi e entre, o compósito com fibras não tratadas e o compósito epóxi/sapê tratado em solução alcalina de 5% NaOH. Considerando apenas o comportamento em tração, não houve diferença significativa entre os compósitos epóxi/sapê tratados.

Com relação ao comportamento em flexão apenas o compósito epóxi/sapê 5% NaOH e o compósito epóxi/sapê 10% NaOH apresentaram diferenças significativas, sendo o compósito epóxi/sapê 5% NaOH, com resistência de 89,29 MPa, o material mais resistente em flexão.

Portanto, como não houve diferença significativa à tração entre os compósitos com fibras tratadas e, como no comportamento à flexão o compósito epóxi/sapê 5%

NaOH apresentou maior resistência, conclui-se que o compósito epóxi/sapê 5% NaOH apresentou o melhor comportamento mecânico.

E por fim, a adição de fibras de capim-sapê a matriz epóxi além de proporcionar um aumento tanto na resistência à tração quanto à flexão, reduz o uso de material sintético (resina), contribuindo ao meio ambiente.

Sugere-se aplicar esse material em peças onde não haja uma exigência estética e estrutural, como por exemplo, em peças do interior de automóveis, no pára-brisa e em peças do painel. Outras aplicações seriam em utensílios domésticos e no restauro ou reforço de estruturas, desde que estas não sejam submetidas a grandes esforços mecânicos.

A principal contribuição científica desse estudo está relacionada ao tratamento alcalino em fibras vegetais, pois apesar de se esperar que tratamentos mais severos resultassem em aumento da resistência mecânica do compósito, devido à maior adesão mecânica entre matriz e reforço causada pela maior rugosidade das fibras, houve uma diminuição da resistência no compósito com reforço tratado em uma condição mais severa, devido à fragilização da fibra. Portanto, é necessário um estudo específico para cada tipo de fibra usada, para se encontrar o ponto ótimo entre o tratamento químico e a resistência do reforço.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar a influência do tratamento químico nas resistências à flexão e tração do compósito, variando suas condições, tais como temperatura, concentração e tempo de tratamento, de maneira que se obtenha maiores resistências mecânicas.

Devido à dificuldade na distribuição do reforço de forma homogênea sobre as placas de vidro, para obtenção da placa de compósito processado, quando esse é utilizado na forma de fibras unidirecionais, sugere-se o uso da fibra em outros formatos, como: na forma de manta ou fibras picadas.

REFERÊNCIAS

ALAMRI, H.; LOW, I. M.; ALOTHMAN, Z. Mechanical, thermal and micro structural characteristics of cellulose fiber reinforced epoxy/organoday nanocomposites. **Composites Part B: Engineering**, [S.l.], v. 43, n. 7, p. 2762-2771, Oct. 2012.

ALMEIDA, C. N. **Propriedades mecânicas e térmicas do sistema epóxi dgeba/etilenodiamina modificado com nanoplataformas de silsesquioxano substituídas com grupos ésteres**. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ANJOS, A. **Análise de variância**. In: DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA (Paraná). Universidade Federal do Paraná (Org.). Estatística II: Notas de Aula. Curitiba: Departamento de Estatística, 2009. Cap. 7. p. 109-118. Disponível em: <<http://www.est.ufpr.br/ce003/material/apostilace003.pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2015.

ANJOS, M. A. S.; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Compósito à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte I: determinação do teor de reforço ótimo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n. 2, p. 339-345, 2003.

ANJOS, M. A. S.; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Compósito à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte II: uso de resíduos cerâmicos na matriz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. United States of America, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. United States of America, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. United States of America, 2011.

BACHTIAR, D.; SAPUAN, S.M.; HAMDAN, M. M. The effect of alkaline treatment on tensile properties of sugar palm fiber reinforced epoxy composites. **Materials and Design**, [S.l.], v. 29, n. 7, p. 1285-1290, 2008.

BENINI, K. C. C. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS/fibras de casca de coco verde e bagaço de cana de açúcar**. 2011. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

BIANCHI, M. L. **Polpação de palha de milho utilizando-se diferentes processos organosolv**. 1995. 76f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2 ed. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. Revisão técnica Paulo Emílio Valadão de Miranda. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CANEVAROLO, S. V. Jr. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2004.

CARVALHO, M. M.; XAVIER, D. F. Controle de capim sapé, planta invasora de pastagens. **Embrapa**. Juiz de Fora, 2001.

CARVALHO, M. M., et. al. Correção da acidez do solo e controle do capim-sapé. **Revista Brasileira de Zootecnia**. Viçosa, v.29, n.1, p. 33-39, fev. 2000.

CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W. S. Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. **Polímeros**. São Carlos, v. 16, n. 1, p. 33-37, jan. 2006.

COSTA, A. P. O.; GERBASE, A. E.; PETZHOLD, C. L. Investigação da cinética de cura por calorimetria diferencial exploratória (DSC) de resinas epóxi preparadas a partir de óleos de soja epoxidado com diferentes anidridos e amins terciárias. **Polímeros**. São Carlos, v. 21, n. 2, p. 146-150, abr. 2011.

COSTA, M. L.; REZENDE, M. C.; PARDINI, L. C. Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi. **Polímeros**. São Carlos, v. 9, n.2, p. 37-44, abr. 1999.

DOAN, T. T. et al. Jute fiber / epoxy composites: Surface properties and interfacial adhesion. **Composites Part B: Engineering**. [S.l.]. 2012.

GONÇALVES, J. A. V. **Compósitos à base de resina epóxi reforçados com fibra de coco**. 2010. 51f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2010.

GUPTA P.K.; UNİYALA V.; NAITHANIB S. Polymorphic transformation of cellulose I to cellulose II by alkali pretreatment and urea as an additive. **Carbohydrate Polymers**. [S.l.], v. 94, n. 2, p. 843-849. 2013.

HILING, E. et al. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira – parte II – extrusão em dupla-roscas. **Ciência Florestal**. Santa Maria. v. 21, n. 2, p 335-347, 2011.

HO, M. et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fiber composites. **Composites Part B: Engineering**. [S.l.], v. 43, n. 8, p. 3549-3562, Dec. 2011.

IOZZI, M. A. et al. Estudos da influência de tratamentos químicos da fibra de sisal nas propriedades de compósitos com borracha nitrílica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Carlos, v. 20, n. 1, p. 25-32. 2010.

JAWAID, M. et al. Effect of jute fiber loading on tensile and dynamic mechanical properties of oil palm epoxy composites. **Composites Part B: Engineering**. [S.l.], v. 45, n. 1, p. 619-624, 2012.

KEULEN, C. et al. Monitoring the manufacturing, quality and structural health of resin transfer molded components. In: 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NDT IN AEROSPACE, 2010. **Anais...** Hamburg, Alemanha, 2010.

KOH, T. M.; FEIH, S.; MOURITZ, A. P. Experimental determination of the structural properties and strengthening mechanisms of z-pinned composite T-joints. **Composite Structures**. [S.l.], v. 93, n.9, p. 2222-2230, 2011.

LEVY, F. N.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. Sisal fiber and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, [S.l.], v.60, n.11, p.2037-2055, 2000.

MACHADO, M. S. et al. Efeito do tratamento alcalino sobre a superfície de fibras de sapé. In: 18° CBECiMat Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2010. **Anais...** Brasil, 2010.

MANO, Eloisa B.; MENDES, Luís C. **Introdução a polímeros**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher LTDA, 1999.

MANO, Eloisa B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Editora Edgar Blücher LTDA, 2003.

MARINELLI, A. L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Carlos, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MARTIN, A. R. et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave Sisalana*. **Polímeros**. São Carlos, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MARTINS, G. S. et al. Caracterização mecânica e térmica de compósitos poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal. **Polímeros**. São Carlos, v. 14, n. 5, p. 326-333, 2004.

MARTINS, R. R. et al. Estudo da viabilidade de utilização de fibras naturais curtas em matrizes de resina epóxi. **Matéria**. Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 605-610, 2008.

MILANESE, A. C. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de sisal e de vidro**. 2008. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

MILANESE, A. C. **Processamento e caracterização de compósito fibra de sisal/resina epóxi via RTM**. 2012. 123f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

MONTORO, S. R. **Influência dos parâmetros de processamento por RTM no volume de vazios em compósitos carbono/epóxi**. 2014. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

MOTA, R. C. S. **Análise de viabilidade técnica de utilização da fibra de bananeira com resina sintética em compósitos**. 2010, 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

OLIVEIRA, J. B. **Processamento do compósito de fibra de capim-sapê/epóxi e avaliação da resistência à flexão por “t” de student**. 2013. 58f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

OLIVEIRA, J. B.; MILANESE, A. C.; CIOFFI, M. O. H. Microscopia óptica da fibra de capim-sapê e do compósito de epóxi/sapê. In: JORNADA CIENTÍFICA DA PÓS-GRADUAÇÃO DA UNESP, 2014, Guaratinguetá/SP. **Anais...** Guaratinguetá, 2014.

PEREIRA, A. L. S. **Extração de nanocelulose de fibras vegetais**. 2010. 46f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

PIRES, E. N. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. 2009, 58f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PIRES, E. E. et al. Efeito do tratamento alcalino em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi. **Polímeros**. São Carlos, v. 22, n. 4, p. 339-344, 2012.

POLIPOX, 2012 - Indústria e Comércio Ltda. Disponível em: <<http://www.polipox.com.br/aero.htm>>. Acesso em: 02 set. 2012.

QIN, X. et al. Stability of inclusion complex formed by cellulose in NaOH/urea aqueous solution at low temperature. **Carbohydrate Polymers**. [S.l.], v. 92, n. 2, p. 1315-1320, 2013.

RAY, D., SARKAR, B. K., BOSE, N. R. Impact fatigue behaviour of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali treated jute fibers. **Composites Part A**, [S.l.], v. 33, n. 2, p. 233-241, 2002.

SALAZAR, R.F.S.; SILVA, G.L.P.; SILVA, M.L.C.P. Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de compósitos. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2005. p. 1-6. Disponível em: <<http://www.feq.unicamp.br/~cobeqic/top15.pdf>>. Acesso em: 16 de abril de 2013.

SILVA, L. J. et al. Hybrid polymeric composites reinforced with sisal fibers and silica microparticles. **Composites: Part B**. [S.l.], v. 43, n. 8, p. 3436-3444, 2012.

SHIH, Y. F. et al. Pant fibers and wasted fiber/epoxy green composites. **Composites: Part B**. [S.l.], v. 43, n. 7, p. 2817-2821, 2012.

SHIINO, M. Y. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos processados por RTM para aplicação aeroespacial**. 2011. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SPIEGEL, M. R.. **Estatística**. 3 ed. São Paulo: Makron Books, 1993. p. 643. (Coleção Schaum). Tradução e revisão técnica: Pedro Consentino.

TARGA, G. N. **Compósito reforçado por laminado de bambu com matriz de poliuretano e epóxi: desenvolvimento, produção e caracterização mecânica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

TITA, S. P. S.; PAIVA, J. M. S.; FROLLINI, E. Resistência ao impacto e outras propriedades de compósitos lignocelulósicos: matrizes termofixas fenólicas reforçadas com fibras de bagaço de cana de açúcar. **Polímeros**. São Carlos, v. 12, n. 4, p. 228-239 2002.

VALLS C.; CADENA E. M.; RONCERO M. B. Obtaining biobleached eucalyptus cellulose fibres by using various enzyme Combinations. **Carbohydrate Polymers**. [S.l.], v. 92, p. 276-282, 2013.

VENTURA, O. S. P. et al. Caracterização mecânica em flexão de compósitos de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais. 2006. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006.

APÊNDICE A – Análise estatística

Por meio da Análise de variância (ANOVA) e o método de Tukey foi realizada a comparação entre os materiais estudados com o propósito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração e à flexão.

Para análise das resistências à tração foram usados os dados apresentados na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Dados usados para comparação entre às resistências à tração dos materiais.

Amostras	Materiais			
	Tensão Máxima (MPa)			
	Resina epóxi	Compósito sem tratamento	Compósito epóxi/sapê NaOH 5%	Compósito epóxi/sapê NaOH 10%
1	48,68	24,38	40,68	28,28
2	44,93	43,23	42,20	42,68
3	36,23	23,74	43,62	40,19
4	35,72	27,80	41,43	36,76
5	36,78	32,41	49,74	40,86

Fonte: O autor.

Utilizando o *software* Excel, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela da análise de variância, além do “resumo” dos dados fornecidos para a análise. A Figura A.1 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração.

Figura A.1 – Dados gerados por “ANOVA: único fator” para ensaio de tração.

Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Linha 1	5	202,3442	40,46884	35,36226812		
Linha 2	5	151,5664	30,31328	64,01501238		
Linha 3	5	217,6631	43,53262	13,21083952		
Linha 4	5	188,7761	37,75522	32,68511775		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	479,2470651	3	159,7490217	4,398580885	0,019425748	2,461810755
Dentro dos grupos	581,0929511	16	36,31830944			
Total	1060,340016	19				

Fonte: O autor.

Como $F_{\text{crítico}}$ é menor que F se aceita a hipótese de que existe diferença significativa entre as resistências à tração dos materiais estudados.

Assim, utilizando o método de Tukey procura-se identificar quais os materiais que se diferem. É necessário calcular o valor de zeta, cuja calculo é representado na Equação (A.1).

$$Zeta = q \cdot \sqrt{\text{quadrado médio do erro}} \quad (\text{A.1})$$

O quadrado médio do erro se encontra na coluna MQ e linha “Dentro dos grupos” na da tabela ANOVA, ilustrada na Figura A.1, que nesse caso vale 36,31830944.

O “q” é encontrado utilizando a tabela *stutentized*, apresentado no Anexo A. Para essa análise, utilizando um nível de significância (alfa) de 10%, com 4 grupos estudados e 20 amostras, tem-se “q” valendo 3,736, e Zeta igual a 10,069.

Por fim, se compara o módulo da diferença entre as médias dadas na tabela “RESUMO” (Figura A.1), par à par. Quando o valor dessa diferença for maior que o valor de zeta, existe diferença significativa entre as resistências dos materiais, essa comparação é ilustrada na Figura A.2.

Figura A.2 – Resultado para comparação entre às resistências à tração dos materiais.

alfa = 10%			
q(5,20,10%)	3,736		
zeta	10,069		
Resina - Sem Trat.	10,1556	MAIOR	DIFERENTE
Resina - Comp. 5%	3,06378	menor	IGUAL
Resina - Comp. 10%	2,71362	menor	IGUAL
Sem Trat. - Comp. 5%	13,2193	MAIOR	DIFERENTE
Sem Trat. - Comp. 10%	-7,4419	menor	IGUAL
Comp. 5% - Comp. 10%	5,7774	menor	IGUAL

Fonte: O autor.

Portanto, houve diferença significativa apenas entre o compósito sem tratamento e a resina, e o compósito sem tratamento e o compósito epóxi/sapê NaOH 5%, sendo que nos dois casos, o compósito sem tratamento apresenta a menor resistência à tração.

Para a análise das resistências a flexão foi utilizada a mesma metodologia. Na Tabela A.2 são apresentados os dados utilizados na análise das resistências à flexão dos materiais e as Figuras A.3 e A.4 os resultados dessa comparação.

Tabela A.2 – Dados usados para comparação entre às resistências à flexão dos materiais.

Amostras	Materiais			
	Tensão Máxima (MPa)			
	Resina epóxi	Compósito sem tratamento	Compósito 5%	Compósito 10%
1	76,01	79,80	92,63	96,59
2	74,65	85,28	93,24	58,65
3	76,40	47,01	74,59	58,12
4	71,97	67,32	81,55	74,43
5	74,65	71,27	104,46	51,40

Fonte: O autor.

Figura A.3 – Dados gerados por “ANOVA: único fator” para ensaio de flexão.

Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Linha 1	5	373,68	74,736	3,01438		
Linha 2	5	350,68	70,136	216,69033		
Linha 3	5	450,47	90,094	143,09313		
Linha 4	5	329,19	65,838	388,26967		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1676,68834	3	558,8961133	2,976542619	0,06282896	2,461810755
Dentro dos grupos	3004,27004	16	187,7668775			
Total	4680,95838	19				

Fonte: O autor.

Figura A.4 – Resultado para comparação entre às resistências à flexão dos materiais.

alfa = 10%			
q(5,20,10%)	3,736		
zeta	22,89451024		
Resina - Sem Trat.	4,6	menor	IGUAL
Resina - Comp. 5%	15,358	menor	IGUAL
Resina - Comp. 10%	8,898	menor	IGUAL
Sem Trat. - Comp. 5%	19,958	menor	IGUAL
Sem Trat. - Comp. 10%	4,298	menor	IGUAL
Comp. 5% - Comp. 10%	24,256	MAIOR	DIFERENTE

Fonte: O autor.

Portanto, após análise estatística constatou-se que houve diferença significativa apenas entre o compósito epóxi/sapê NaOH 10% e o compósito epóxi/sapê NaOH 5%, sendo este mais resistente à flexão.

ANEXO A – Tabela Studentized

The Studentized range upper quantiles $q(k, df; 0.10)$

df	k->	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		0.929	13.437	16.358	18.488	20.150	21.504	22.642	23.621	24.477	25.237	25.918	26.536	27.100	27.618	28.097	28.542	28.958	29.347	29.713
2		4.129	5.733	6.772	7.538	8.139	8.633	9.049	9.409	9.725	10.006	10.259	10.488	10.698	10.891	11.070	11.237	11.392	11.538	11.676
3		3.328	4.467	5.199	5.738	6.162	6.511	6.806	7.062	7.287	7.487	7.667	7.831	7.982	8.120	8.248	8.368	8.479	8.584	8.683
4		3.015	3.976	4.506	5.035	5.388	5.679	5.926	6.139	6.327	6.494	6.645	6.783	6.909	7.025	7.132	7.233	7.326	7.414	7.497
5		2.850	3.717	4.264	4.664	4.979	5.238	5.458	5.648	5.816	5.965	6.100	6.223	6.336	6.439	6.536	6.626	6.710	6.788	6.863
6		2.748	3.558	4.065	4.435	4.726	4.966	5.168	5.344	5.499	5.637	5.762	5.875	5.979	6.075	6.164	6.247	6.325	6.398	6.466
7		2.679	3.451	3.931	4.280	4.555	4.780	4.971	5.137	5.283	5.413	5.530	5.637	5.735	5.826	5.910	5.988	6.061	6.130	6.195
8		2.630	3.374	3.834	4.169	4.431	4.646	4.829	4.987	5.126	5.250	5.362	5.464	5.558	5.644	5.724	5.799	5.869	5.935	5.997
9		2.592	3.316	3.761	4.084	4.337	4.545	4.721	4.873	5.007	5.126	5.234	5.333	5.423	5.506	5.583	5.655	5.722	5.786	5.845
10		2.563	3.270	3.704	4.018	4.264	4.465	4.636	4.783	4.913	5.029	5.134	5.229	5.316	5.397	5.472	5.542	5.607	5.668	5.726
11		2.540	3.234	3.658	3.965	4.205	4.401	4.567	4.711	4.838	4.951	5.053	5.145	5.231	5.309	5.382	5.450	5.514	5.573	5.630
12		2.521	3.204	3.621	3.921	4.156	4.349	4.511	4.652	4.776	4.886	4.986	5.076	5.160	5.236	5.308	5.374	5.436	5.495	5.550
13		2.504	3.179	3.589	3.885	4.116	4.304	4.464	4.602	4.724	4.832	4.930	5.019	5.100	5.175	5.245	5.310	5.371	5.429	5.483
14		2.491	3.158	3.563	3.854	4.081	4.267	4.424	4.560	4.679	4.786	4.882	4.969	5.050	5.124	5.192	5.256	5.316	5.372	5.426
15		2.479	3.140	3.540	3.828	4.052	4.235	4.390	4.524	4.641	4.746	4.841	4.927	5.006	5.079	5.146	5.209	5.268	5.324	5.376
16		2.469	3.124	3.520	3.804	4.026	4.207	4.360	4.492	4.608	4.712	4.805	4.890	4.968	5.040	5.106	5.169	5.227	5.282	5.333
17		2.460	3.110	3.503	3.784	4.003	4.182	4.334	4.464	4.579	4.681	4.774	4.857	4.934	5.005	5.071	5.133	5.190	5.244	5.295
18		2.452	3.098	3.487	3.766	3.984	4.161	4.310	4.440	4.553	4.654	4.746	4.829	4.905	4.975	5.040	5.101	5.158	5.211	5.262
19		2.445	3.087	3.474	3.751	3.966	4.142	4.290	4.418	4.530	4.630	4.721	4.803	4.878	4.948	5.012	5.072	5.129	5.182	5.232
20		2.439	3.077	3.462	3.736	3.950	4.124	4.271	4.398	4.510	4.609	4.699	4.780	4.855	4.923	4.987	5.047	5.103	5.155	5.205
21		2.433	3.069	3.451	3.724	3.936	4.109	4.255	4.380	4.491	4.590	4.678	4.759	4.833	4.901	4.965	5.024	5.079	5.131	5.180
22		2.428	3.061	3.441	3.712	3.923	4.095	4.239	4.364	4.474	4.572	4.660	4.740	4.814	4.882	4.944	5.003	5.058	5.109	5.158
23		2.424	3.054	3.432	3.701	3.911	4.082	4.226	4.350	4.459	4.556	4.644	4.723	4.796	4.863	4.926	4.984	5.038	5.089	5.138
24		2.420	3.047	3.423	3.692	3.900	4.070	4.213	4.336	4.445	4.541	4.628	4.707	4.780	4.847	4.909	4.966	5.020	5.071	5.119
25		2.416	3.041	3.416	3.683	3.890	4.059	4.201	4.324	4.432	4.528	4.614	4.693	4.765	4.831	4.893	4.950	5.004	5.055	5.102
26		2.412	3.036	3.409	3.675	3.881	4.049	4.191	4.313	4.420	4.515	4.601	4.680	4.751	4.817	4.878	4.936	4.989	5.039	5.086
27		2.409	3.030	3.402	3.667	3.873	4.040	4.181	4.302	4.409	4.504	4.590	4.667	4.739	4.804	4.865	4.922	4.975	5.025	5.072
28		2.406	3.026	3.396	3.660	3.865	4.032	4.172	4.293	4.399	4.493	4.579	4.656	4.727	4.792	4.853	4.909	4.962	5.012	5.058
29		2.403	3.021	3.391	3.654	3.858	4.024	4.163	4.284	4.389	4.484	4.568	4.645	4.716	4.781	4.841	4.897	4.950	4.999	5.046
30		2.400	3.017	3.386	3.648	3.851	4.016	4.155	4.275	4.381	4.474	4.559	4.635	4.706	4.770	4.830	4.886	4.939	4.988	5.034
31		2.398	3.013	3.381	3.642	3.845	4.009	4.148	4.268	4.372	4.466	4.550	4.626	4.696	4.760	4.820	4.876	4.928	4.977	5.023
32		2.396	3.010	3.376	3.637	3.839	4.003	4.141	4.260	4.365	4.458	4.541	4.617	4.687	4.751	4.811	4.866	4.918	4.967	5.013
33		2.393	3.006	3.372	3.632	3.833	3.997	4.135	4.253	4.357	4.450	4.533	4.609	4.679	4.743	4.802	4.857	4.909	4.957	5.003
34		2.391	3.003	3.368	3.627	3.828	3.991	4.129	4.247	4.351	4.443	4.526	4.602	4.671	4.734	4.794	4.849	4.900	4.949	4.994
35		2.389	3.000	3.364	3.623	3.823	3.986	4.123	4.241	4.344	4.436	4.519	4.594	4.663	4.727	4.786	4.841	4.892	4.940	4.986
36		2.388	2.998	3.361	3.619	3.819	3.981	4.117	4.235	4.338	4.430	4.512	4.588	4.656	4.720	4.778	4.833	4.884	4.932	4.978
37		2.386	2.995	3.357	3.615	3.814	3.976	4.112	4.230	4.332	4.424	4.506	4.581	4.650	4.713	4.771	4.826	4.877	4.925	4.970
38		2.384	2.992	3.354	3.611	3.810	3.972	4.107	4.224	4.327	4.418	4.500	4.575	4.643	4.706	4.765	4.819	4.870	4.918	4.963
39		2.383	2.990	3.351	3.608	3.806	3.967	4.103	4.220	4.322	4.413	4.495	4.569	4.637	4.700	4.758	4.812	4.863	4.911	4.956
40		2.381	2.988	3.348	3.605	3.802	3.963	4.099	4.215	4.317	4.408	4.490	4.564	4.632	4.694	4.752	4.806	4.857	4.904	4.949
48		2.372	2.973	3.330	3.583	3.778	3.937	4.070	4.185	4.285	4.375	4.455	4.528	4.595	4.656	4.713	4.766	4.816	4.863	4.907
60		2.363	2.959	3.312	3.562	3.755	3.911	4.042	4.155	4.254	4.342	4.421	4.493	4.558	4.619	4.675	4.727	4.775	4.821	4.864
80		2.353	2.945	3.294	3.541	3.731	3.885	4.014	4.125	4.223	4.309	4.387	4.457	4.521	4.581	4.636	4.687	4.735	4.780	4.822
120		2.344	2.930	3.276	3.520	3.707	3.859	3.986	4.096	4.191	4.276	4.353	4.422	4.485	4.543	4.597	4.647	4.694	4.738	4.779
240		2.335	2.916	3.258	3.499	3.684	3.834	3.959	4.066	4.160	4.244	4.319	4.386	4.448	4.505	4.558	4.607	4.653	4.696	4.737
Inf		2.326	2.902	3.240	3.478	3.661	3.808	3.931	4.037	4.129	4.211	4.285	4.351	4.412	4.468	4.519	4.568	4.612	4.654	4.694