

**unesp**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**JULIANA BOVI DE OLIVEIRA**

**PROCESSAMENTO DO COMPÓSITO DE FIBRA DE CAPIM-  
SAPÊ/EPÓXI E AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A FLEXÃO POR “t”  
DE STUDENT**

**Guaratinguetá**  
**2013**

**JULIANA BOVI DE OLIVEIRA**

**PROCESSAMENTO DO COMPÓSITO DE FIBRA DE CAPIM-SAPÊ/EPÓXI E AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A FLEXÃO POR “t”  
DE STUDENT**

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<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Andressa Cecília Milanese

Guaratinguetá  
2013

O48p	<p>Oliveira, Juliana Bovi de</p> <p>Processamento do compósito de fibra de capim-sapê / epóxi e avaliação da resistência à flexão “t” de Student / Juliana Bovi de Oliveira. – Guaratinguetá: [s.n], 2013</p> <p>58 f.: il.</p> <p>Bibliografia: f. 50-53</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.</p> <p>Orientadora: Profa. Dra. Andressa Cecília Milanese</p> <p>1. Resinas epoxi 2. Fibras I.Título.</p> <p>CDU 665.9</p>
------	--

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. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Profª. Drª. ANDRESSA CECÍLIA MILANESE  
Orientadora/UNESP-FEG



Msc. KELLY CRISTINA COELHO DE CARVALHO BENINI  
UNESP-FEG



Msc. MARCOS YUTAKA SHIINO  
UNESP-FEG

Dezembro de 2013

A minha formação não poderia ter sido concretizada sem a ajuda de meus amáveis e eternos pais Júlio e Sonia, que, no decorrer da minha vida, me proporcionaram carinho, amor, me incentivaram, me mostraram os conhecimentos da integridade, da perseverança e de procurar sempre em Deus à força maior para o meu desenvolvimento como ser humano. Por essa razão, gostaria de dedicar e reconhecer a vocês, minha imensa gratidão...

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a Deus por todas as oportunidades que eu tive e terei na vida, em quem sempre confio...

Aos meus queridos pais, Júlio César de Oliveira e Sonia Maria Bovi de Oliveira pelo apoio e incentivos incondicional;

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

As professoras e ao professor,

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

M<sup>a</sup> Odila Hilário Cioffi, pelos ensinamentos e apoio;

Herman Jacobus Cornelis Voorwald, pela colaboração;

Aos técnicos,

Manoel Francisco dos Santos Filho, Wilson Roberto Monteiro, pela ajuda e dedicação;

Ao grupo de pesquisa GFMA – Grupo de Fadiga e Materiais Aeronáuticos,

Sérgio Roberto Montoro, Marcos Yutaka Shiino, Midori Yoshikawa Pitanga, Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini, Thatiane Brocks, João Pedro Aquiles Carobolante pelo companheirismo, ajuda e apoio;

E aos meus amigos,

Lucas Assis de Moraes, Rúbia Eri Teruya, Mariana Gomes Moura Costa, Karina Ayumi Fucuhara, Sabrina dos Santos Aquino, Tatiana Ueda Pereira pelo apoio, ajuda, carinho e amizade.

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.

## RESUMO

Nos últimos anos um grande interesse mundial tem surgido pelo desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a utilização de produtos com menor impacto ambiental. A substituição de fibras sintéticas por fibras vegetais é uma possibilidade bastante importante pelo fato desta fibra ser de uma fonte renovável, biodegradável e de baixo custo e por provocar menor impacto ambiental. Este trabalho se propôs a desenvolver compósitos poliméricos de resina epóxi e a estudar o comportamento destes materiais. Tanto a resina epóxi utilizada como matriz na confecção dos compósitos de fibra de capim-sapê, quanto os três compósitos formados por: resina epóxi e fibras de capim-sapê longas e unidirecionais, 75% epóxi/25% fibra curta, em volume, e 80% epóxi/20% fibra curta, em volume, foram caracterizados por análise mecânica de flexão, sendo que os compósitos produzidos com fibras curtas foram também inspecionados por Microscopia Óptica e Inspeção Acústica (C-Scan). Para a análise da morfologia da fibra de capim-sapê e dos compósitos de capim-sapê/epóxi com composição, em volume, de 75% epóxi/25% fibra curta (folha picada e cortada) e de 80% epóxi/20% fibra curta foram obtidas imagens no microscópio óptico de toda a superfície da amostra e pode-se verificar a adesão da fibra ao polímero. Como resultados, as resistências mecânicas em flexão dos compósitos epóxi/fibras longas e unidirecionais, 75% epóxi/25% fibra curta e 80% epóxi/20% fibra curta foram de 70,36 MPa, 21,26 MPa e 25,07 MPa, respectivamente. Sendo que o compósito que apresentou melhores resultados foi o formado por fibras longas, já que o mesmo apresentou um valor de resistência em flexão mais elevado que os demais compósitos analisados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fibras naturais. Fibra de capim-sapê. Resina epóxi. Flexão.

OLIVEIRA, J. B. **Processing of sapegrass fiber/epoxy composite and evaluation the flexural strength by “t” Student.** 2013. 58f. Work Graduate (Degree in Materials Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

### **ABSTRACT**

In recent years a great worldwide interest has arisen for the development of new technologies that enable the use of products with less environmental impact. The replacement of synthetic fiber plants is a possibility very important because this fiber is renewable, biodegradable and few cost and cause less environmental impact. Given the above, this work proposes to develop polymeric composites of epoxy resin and study the behavior of these materials. Both, the epoxy resin used as matrix in the manufacture of sapegrass fiber composite, as tree composites formed by: epoxy/unidirectional sapegrass long fiber, 75% epoxy/25% short fiber, by volume, and 80% epoxy/20% short fiber, by volume, were characterized by bending, and the composites produced with short fibers random were inspected by Optical Microscopy and Acoustics Inspection (C-Scan). For the analysis of the sapegrass fiber morphology, composites 75% epoxy/25% short fiber (sheet chopped) and 80% epoxy/20% short fiber images were obtained by optical microscope and the adhesion between polymer/fiber was visualized. As results, the flexural strength of composites epoxy/unidirectional long fibers, 75% epoxy/25% short fiber and 80% epoxy/20% short fiber were 70.36 MPa, 21.26 MPa, 25.07 MPa, respectively. Being that composite showed that the best results was made up of long fibers, because it had a value of higher flexural strength than other composites analyzed.

**KEYWORDS:** Natural fibers. Sapegrass fiber. Epoxy resin. Bending.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capim-sapê: A) após colheita e B) fibra selecionada - parte interna do caule cortado com 27 cm de comprimento .....	22
Figura 2 - Limitador do molde em silicone. Graduação em centímetros .....	23
Figura 3 - A) Fibras de capim-sapê: corte transversal de duas fibras (indicados pela seta) e CFCDG 25%, em volume, e B) Cortes transversais: (1) CFCDG 20%, em volume, e (2) CFL unidirecionais. Graduação em centímetros.....	25
Figura 4 - Esquema de um corpo de prova utilizado para o ensaio de flexão estática por 3 pontos, sendo “L” a distância entre apoios, “b” a largura e “d” a espessura.....	27
Figura 5 - A) Corpos de prova para o ensaio de flexão: A) CFL unidirecional e B) Resina epóxi Graduação em centímetros .....	27
Figura 6 - Equipamento C-Scan .....	29
Figura 7 - Área de trabalho do <i>software</i> .....	29
Figura 8 – Compósitos analisados via C-Scan: A) CFCDG 20%, em volume, degaseificado; B) CFCDG 25%, em volume. Graduação em centímetros.....	30
Figura 9- Escala de cor utilizada nos mapas C-Scan.....	30
Figura 10 - A) CFL unidirecionais; B) CFC 50%, em massa; C) CFC 50%, em volume; D) CFC 30%, em volume e E) CFC 20% , em volume. Graduação em centímetros ...	33
Figura 11 - A) CFCDG 20%, em volume; B) CFCDG 25%, em volume. Graduação em centímetros .....	34
Figura 12 – Micrografias do caule das fibras de sapê: corte transversal. A) Aumento de 10x e B) Aumento de 20x .....	35
Figura 13 – Morfologia - forma e aparência da fibra. Na direção do comprimento tem-se a vista longitudinal e na direção transversal tem-se o corte transversal.....	36
Figura 14 - Micrografias dos compósitos de epóxi/capim-sapê: A) CFL unidirecional. Aumento de 6,5x; B) CFCDG 20%, em volume. Aumento de 6,5x e C) CFCDG 25%, em volume. Aumento de 6,5x .....	36
Figura 15 - Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento obtidas a partir de ensaios de flexão de todas as amostras de resina epóxi e do compósito de sapê/epóxi com fibra longa e unidirecional .....	38
Figura 16 - Ensaio de flexão em 3 pontos. A) Resina epóxi; B) CFL unidirecional. Graduação em centímetros.....	39

Figura 17 - Gráfico Força <i>versus</i> Deslocamento do ensaio de flexão do corpo de prova 5 de resina epóxi.....	40
Figura 18 - Gráfico Força <i>versus</i> Deslocamento do ensaio de flexão do corpo de prova 1 do compósito epóxi/sapê com fibras longas .....	41
Figura 19 - Ensaio de flexão em 3 pontos. A) CFCDG 25%, em volume; B) CFCDG 20%, em volume. Graduação em centímetros .....	43
Figura 20 - Gráfico (tensão <i>versus</i> deslocamento) do ensaio de flexão dos corpos de prova do compósito 75% epóxi/25% fibra curta de sapê, em volume.....	44
Figura 21 - Gráfico (tensão <i>versus</i> deslocamento) do ensaio de flexão dos corpos de prova do compósito 80% epóxi/20% fibra curta de sapê, em volume.....	44
Figura 22 - C-Scan do compósito 80% epóxi/20% fibra curta de capim-sapê, em volume, com o transdutor 5 MHz. A) <i>Gate</i> 1; B) <i>Gate</i> 2.....	47
Figura 23 - C-Scan do compósito 75% epóxi/25% fibra curta de capim-sapê, em volume, com o transdutor 5 MHz. A) <i>Gate</i> 1; B) <i>Gate</i> 2.....	47
Figura 24 – Fotografia do compósito epóxi/fibras longas e unidirecionais de capim-sapê onde se observa macroscopicamente o espaçamento entre as fibras.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudo comparativo do valor de resistência à flexão de quatro tipos de compósitos .....	19
Tabela 2 - Dados da resina epóxi composta pelo reagente RL3135-MV e endurecedor EL3135-M (resina de média viscosidade para laminação manual).....	23
Tabela 3 – Valores das dimensões dos corpos de prova do compósito epóxi/sapê com fibras longas unidirecionais, da resina epóxi e dos compósitos com fibras curtas.....	26
Tabela 4 - Teste de uma média com $\sigma$ desconhecido .....	31
Tabela 5 - Dados dos ensaios de flexão.....	37
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de flexão .....	42

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1	COMPÓSITOS .....	15
2.2	FIBRA DE CAPIM-SAPÊ .....	17
2.3	RESINA EPÓXI .....	17
2.4	COMPORTAMENTO MECÂNICO – FLEXÃO .....	18
2.5	INSPEÇÃO POR ULTRASSOM (C-SCAN) .....	20
2.6	MICROSCOPIA ÓPTICA .....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	22
3.1	AQUISIÇÃO DOS MATERIAIS .....	22
3.2	PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS .....	23
3.3	MICROSCOPIA ÓPTICA .....	25
3.4	ENSAIO MECÂNICO - FLEXÃO .....	26
<b>3.4.1</b>	<b>Cálculos - Flexão</b> .....	27
3.5	INSPEÇÃO ACÚSTICA POR ULTRASSOM .....	28
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA – COMPARAÇÕES ENTRE DUAS MÉDIAS .....	30
<b>3.6.1</b>	<b>Dados não emparelhados – Primeiro caso</b> .....	31
<b>3.6.2</b>	<b>Dados não emparelhados – Segundo caso</b> .....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	33
4.1	PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS .....	33
4.2	MICROSCOPIA ÓPTICA .....	34
4.3	ENSAIO MECÂNICO - FLEXÃO .....	37
<b>4.3.1</b>	<b>Resina epóxi e compósito de epóxi/sapê com fibras longas unidirecionais</b> .....	37
<b>4.3.2</b>	<b>Compósitos: 75% epóxi/25% fibra curta de capim-sapê e 80% epóxi/20% fibra curta de capim-sapê</b> .....	42
4.4	INSPEÇÃO ACÚSTICA POR ULTRASSOM (C-SCAN) .....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	49
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	50
	<b>APÊNDICE A – Análise estatística: Cálculos</b> .....	54
	<b>ANEXO A - Distribuição t de Student – valores de <math>tv</math>, <math>P</math>, em que <math>P = P (tv \geq tv, P)</math></b> .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, um grande interesse mundial tem surgido pelo desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a utilização de produtos com menor impacto ambiental. Neste contexto, os materiais plásticos sintéticos têm recebido especial atenção por originarem materiais não-biodegradáveis e pela dificuldade de reciclagem, o que acaba por gerar um grande acúmulo deste tipo de material em depósitos, lixões e na própria natureza (MARINELLI *et al.*, 2008).

A substituição de fibras sintéticas por fibras vegetais se torna viável pelo fato desta fibra ser de fonte renovável, podem ser facilmente modificadas por agentes químicos, são abundantes, biodegradáveis e de baixo custo e por provocar menor impacto ambiental (LOPES, 2011; MEDEIROS; MATTOSO; CARVALHO, 2002). Algumas fibras ocorrem espontaneamente na natureza e/ou são cultivadas como atividade agrícola. As fibras naturais, também denominadas fibras celulósicas, tem a celulose como principal componente químico, ou denominadas ainda por fibras lignocelulósicas, quando levamos em consideração que a maioria das fibras contém lignina, um polímero polifenólico natural (MARINELLI *et al.*, 2008).

As fibras vegetais possuem menor densidade e provocam menor desgaste nos equipamentos convencionais de processamentos de polímeros do que as fibras sintéticas (MATTOSO *et al.*, 1996). Além disso, as fibras vegetais apresentam baixa abrasividade e são promissoras devido ao desempenho mecânico na forma de compósito, semelhante ao que ocorre nas fibras sintéticas usuais.

Entretanto, as fibras naturais apresentam parâmetros a serem considerados, como por exemplo, a diminuição de sua resistência mecânica com o tempo, a elevada absorção de umidade, a baixa compatibilidade com a matriz polimérica, pois apresentam caráter hidrofóbico, enquanto que, a matriz polimérica possui caráter hidrofílico. Essa diferença de afinidade com água resulta em uma baixa aderência superficial, o que impede a transferência de tensões efetivas, que por sua vez reduz as propriedades mecânicas do compósito (SREEKUMAR *et al.*, 2009; MACHADO *et al.*, 2010).

Vários produtos que empregam fibras naturais vegetais estão sendo desenvolvidos, principalmente para peças de acabamento interno de veículos, em que outras propriedades mecânicas, térmicas e acústicas são relevantes. Existe, também, o desenvolvimento desses materiais para o uso na construção civil, como por exemplo, em substituição ou como reforço em placas de madeira ou em formulação com argamassa. O campo de emprego das fibras

naturais é bastante amplo, abrangendo aplicações clássicas na indústria têxtil, o uso como reforço em matrizes poliméricas termoplásticas e termorrígidas e, mais recentemente, na utilização como materiais absorventes de metais pesados no tratamento de resíduos industriais, entre outras aplicações (MARINELLI *et al*, 2008).

O processamento do compósito de fibras de capim-sapê/epóxi foi realizado em conjunto com dois alunos de graduação, integrantes do Grupo de Fadiga e Materiais Aeronáuticos (GFMA) da FEG/UNESP, João Pedro Aquiles Carabolante e Karina Ayumi Fucuhara, responsáveis pela caracterização térmica por TGA/DTG, DSC e DMA e pela caracterização mecânica por tração e fadiga do compósito.

Esse trabalho de graduação tem como objetivo processar compósitos de matriz polimérica (epóxi) reforçada com fibras naturais de capim-sapê por moldagem via compressão manual, estudar algumas das suas características físicas (microscopia óptica) e mecânicas (flexão), além de analisar qualitativamente o processo por meio da inspeção acústica por ultrassom (C-Scan).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPÓSITOS

O compósito consiste em um material formado a partir da mistura de dois ou mais constituintes imiscíveis que diferem entre si na forma, na composição química, e devem estar separados por uma interface distinta. Então, dessa forma, muitas cerâmicas e ligas metálicas, por serem constituídos de múltiplas fases formadas por fenômenos naturais, não se encaixam nessa definição (CALLISTER JR, 2002).

Os materiais que constituem os compósitos são divididos em duas fases: uma é denominada “matriz”, que é contínua e envolve assim os outros constituintes ou a outra fase proporcionando alguma ductilidade ao compósito, e a outra é chamada frequentemente de fase dispersa ou “reforço”, o qual é descontínuo e suporta os esforços aplicados ao compósito. Os materiais compósitos apresentam propriedades significativamente diferentes das propriedades dos seus constituintes, pois se deve levar em conta as propriedades individuais de cada constituinte, a quantidade relativa dos materiais presentes no compósito e a geometria da fase dispersa. A geometria da fase dispersa neste contexto engloba a forma das partículas e o seu tamanho, sua distribuição e sua orientação. Desta forma, os compósitos são projetados para apresentarem a combinação das melhores características de cada material constituinte (CALLISTER JR, 2002; MOTA, 2010; TARGA, 2011).

As indústrias aeroespacial, marítima e automotiva foram pioneiras na utilização de compósitos em aplicações estruturais, entretanto, esse tipo de material vem ganhando espaço em diversos outros ramos da economia, como os setores de transporte, químico e petroquímico, construção civil, eletroeletrônico, e também no lazer (MOTA, 2010; KEULEN, 2010).

A aplicabilidade de um compósito é determinada por um conjunto de características e propriedades do mesmo, como massa específica, resistência mecânica, elasticidade, resistência à corrosão, entre outros (MOTA, 2010; KEULEN, 2010, NETO, 2010). Tais propriedades estão diretamente relacionadas com a matriz, que é a resina, e ao reforço, que é a fibra, sendo que a boa impregnação destes criará uma interface na qual as propriedades de cada um praticamente desaparecem, dando lugar às propriedades que vão caracterizar o compósito (MOTA, 2010; MARQUES, 2010).

Nos materiais compósitos, a matriz é responsável, principalmente, pela transferência de carga para os reforços. Além disso, ela protege o reforço da abrasão, danos e meios de degradação (sejam eles de natureza física ou química) e dá a forma ao produto final, pois

envolve o reforço. Encontramos matrizes de natureza orgânica (polimérica), metálica e cerâmica. Destacam-se as poliméricas pela sua versatilidade de formulação e baixo custo de processamento, comparadas com outras matrizes (MOTA, 2010; JUVANDES, 2012).

Em relação à fusibilidade e à solubilidade das matrizes, podemos dividi-las em dois grupos: termoplásticas e termorrígidas. Sendo que, as primeiras são os polímeros lineares ou ramificados que possuem capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão. Quando é retirada desse processo, o polímero solidifica em um produto com forma definida. Novas aplicações de temperatura e pressão produzem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo. Essa alteração é uma transformação física reversível. São fusíveis, solúveis e recicláveis. Entretanto, as resinas termoplásticas possuem baixa resistência mecânica e baixo módulo de elasticidade, limitando sua aplicação estrutural (MOTA, 2010; KEULEN, 2010).

Já os polímeros termorrígidos, são rígidos e frágeis, sendo muito estáveis a variações de temperatura. Uma vez polimerizados, não mais se fundem, pois sofrem o processo de cura - transformação química irreversível deixando o material com uma estrutura tridimensional, reticulada, com ligações cruzadas. Após a cura, os termorrígidos são infusíveis, insolúveis e não-recicláveis (MOTA, 2010; TARGA, 2011).

A preferência por resinas termorrígidas no processo de infusão pode ser explicada por diversos parâmetros, tais como: são mais leves (possuem baixa massa específica) com relação às resinas termoplásticas, tem baixo custo e são resistentes à exposição ambiental. Além disso, geralmente apresentam melhor resistência à fluência e apresentam menores viscosidades em baixa temperatura do que os termoplásticos e permitem maiores temperaturas de trabalho. Em compósitos de alto desempenho as resinas mais utilizadas são as fenólicas, epóxi, bismaleimida e poliamida, pois possuem excelente resistência a solventes, assim como às altas temperaturas (CALLISTER JR, 2002; MOTA, 2010).

O uso de fibras vegetais na produção de compósitos tem-se destacado no que se refere a materiais alternativos aplicados para construção de pequenas estruturas. As vantagens nesta utilização não se limitam ao setor econômico, mas abrangem, também, outras vertentes importantes, como a aplicação de materiais ecologicamente seguros e que possam trazer benefícios sociais. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, o emprego de fibras de culturas como sisal, cana-de-açúcar, coco, juta e curauá na indústria pode levar a uma melhoria de vida das comunidades produtoras que, em sua maioria têm nessas culturas, uma forma de sobrevivência (LOPES, 2010).



## 2.2 FIBRA DE CAPIM-SAPÊ

Capim-sapê (ou sapê) é uma designação comum a uma espécie de gramínea, denominada *Imperata brasiliensis*, cujos caules são secos e utilizados para construir telhados de casas rústicas. As gramíneas são angiospermas, monocotiledôneas da classe liliopsida que pertencem a família *Poaceae* (FERREIRA, 1999).

O capim-sapê pode ser encontrado nas regiões Sul, Sudeste, Nordeste e em parte do Centro-Oeste. Segundo os pesquisadores Carvalho et al. (2000), o capim-sapê pode ser considerado uma planta invasora que ocorre em pastagens degradadas e em áreas cultivadas, e por isso essa planta pode ser indesejável nos campos.

Machado *et al.* (2010) caracterizou a fibra de sapê após tratamento alcalino com NaOH (15%) e concluiu que além de aumentar a cristalinidade das fibras de sapê, removeu os extrativos como ceras e graxas da fibra, e que sua remoção é de fundamental importância para o aumento das propriedades mecânicas dos compósitos. O tratamento alcalino é vantajoso com relação a outros tratamentos químicos por ser de baixo custo e de fácil realização.

## 2.3 RESINA EPÓXI

Entre as classes de termorrígidos mais utilizados industrialmente, as resinas epoxídicas são as que apresentam maiores vantagens para o desenvolvimento de projetos técnicos. Podemos destacar características tais como boa aderência e estabilidade dimensional, baixa contração durante a cura (tensões residuais), boa resistência mecânica, química e à corrosão, baixa viscosidade (processabilidade), cura a temperatura ambiente (processabilidade), alto módulo de elasticidade e compressão (desempenho) e baixo custo, sendo muito utilizada como adesivos, em laminados e revestimentos. No entanto, são materiais frágeis após a cura quando comparados aos termoplásticos semicristalinos, devido às tensões localizadas que geram microtrincas e podem causar fratura prematura em pequenas deformações (ASHRAFI *et al.*, 2011; CHEN, 2007; FONTOURA, 2009; MARTINEZ, 2011; ZACHARUK, 2011). Após a cura, os sistemas epóxi apresentam pequena contração, em média na ordem de 2%. Este comportamento indica que para formar o sistema curado é necessário um baixo grau de rearranjo molecular (PIRES *et al.*, 2005).

A alta adesão apresentada por estes polímeros é consequência da polaridade dos grupos éteres e hidroxilas alifáticas que, frequentemente, constituem a cadeia da resina inicial e a rede do sistema curado. A polaridade desses grupos serve para criar forças de interação entre a molécula epóxi e a superfície adjacente a ela, otimizando o seu uso como adesivo e

revestimento. Como matriz em compósitos, a existência desses grupos polares minimiza problemas relativos à interface resina/reforço (PIRES *et al*, 2005; MOOSBURGER-WILL; JAGER; WELLHAUSEN, 2012).

Entretanto, como todo material, apresentam desvantagens como alta aderência aos moldes e impossibilidade de reciclagem, sendo normalmente descartado após uso (MARTINEZ, 2011). Porém, após uso pode também ser reaproveitado ou reutilizado.

Atualmente, existe grande variedade de resinas epoxi disponíveis, apresentando diferentes propriedades em função dos tipos de epóxi, agentes de cura e procedimentos de cura resultando em diferentes formulações. Outra propriedade importante da resina epox é a viscosidade, que está relacionada com a massa molecular e sua distribuição, presença de solvente e pela maneira que ela foi constituída quimicamente (ZACHARUK, 2011).

De uma forma geral, este tipo de resina é fornecido na forma líquida, apresentam propriedades superiores às demais e são geralmente utilizadas em materiais de alto desempenho, dentro da classe dos plásticos reforçados. A resina epóxi é utilizada em vários setores na indústria, como eletroeletrônica, de embalagem, construção civil e transporte. As aplicações específicas incluem os adesivos, equipamentos para indústria química e compósitos estruturais (PIRES *et al*, 2005; YANG *et al*, 2012, SASAKI *et al*, 2013).

Segundo Gonçalves (2010), a propriedade de resistência à flexão da resina epóxi ARALDITE GY 279 e o endurecedor ARADUR 2963 (ambos industrializados), nas proporções de 3:1, respectivamente, sendo esses compostos misturados manualmente em um becker por 20 minutos, é de aproximadamente 27 MPa. Já de acordo com Pires (2009) a propriedade de resistência à flexão da resina epóxi TCR 550 e o agente de cura XR-435, nas proporções de 2:1, respectivamente, onde a resina foi colocada em um balão volumétrico, sob vácuo, com agitação constante de 30 rpm e aquecida a 50°C com auxílio de manta térmica e posteriormente, a resina foi resfriada para que o agente de cura pudesse ser adicionado e homogeneizado por cinco minutos, é de aproximadamente 165 MPa.

#### 2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO – FLEXÃO

Em aplicações industriais envolvendo materiais de alta resistência é muito importante conhecer o comportamento do material quando submetido aos esforços de flexão. A flexão é o esforço que se caracteriza por induzir numa peça tensões de compressão numa parte de uma seção transversal e tensões de tração na parte restante (VENTURA *et al*, 2006; CAVALLI *et al*, 2010).

O ensaio de flexão é realizado em materiais frágeis e/ou em materiais resistentes e tem como objetivo determinar a tensão de ruptura, além de permitir obter outras propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade à flexão. A sua grande vantagem é que permite utilizar corpos de prova de geometria simples. No entanto, para materiais muito frágeis, os resultados obtidos podem apresentar grande dispersão, de modo que nestes 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 mostra um estudo comparativo da propriedade de resistência à flexão de quatro compósitos poliméricos formados por: 1) epóxi/bambu, 2) epóxi/coco, 3) epóxi/juta e 4) epóxi/sisal.

Tabela 1 – Estudo comparativo do valor de resistência à flexão de quatro tipos de compósitos

<b>Composição dos Compósitos</b>	<b>Disposição das Fibras</b>	<b>Tipo de processamento</b>	<b>Resistência à Flexão (MPa)</b>
<b>1. Epóxi/bambu</b>	Unidirecionalmente	Via moldagem por compressão	192
<b>2. Epóxi/coco</b>	Em forma de manta	Via moldagem por compressão	37
<b>3. Epóxi/juta</b>	Na forma de tecido	Por laminação manual com auxílio de uma prensa hidráulica	164
<b>4. Epóxi/sisal</b>	Na forma de tecido	Via moldagem por transferência de resina (RTM)	75

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

## 2.5 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM (C-SCAN)

O ensaio por ultrassom caracteriza-se em um método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, cujos defeitos podem ser característicos do processo de fabricação da peça ou do componente. Assim como todo ensaio não destrutivo, o ensaio ultrassônico possui vantagens e limitações em relação a outros ensaios. O método ultrassônico possui alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas, ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, e não requer planos especiais de segurança ou qualquer acessório para sua aplicação (ANDREUCCI, 2003).

No caso da indústria existe o fator econômico. A inspeção por ultrassom evita que sejam usinadas peças defeituosas, sendo que a economia de usinagem representa um valor que não pode ser desprezado (ANDREUCCI, 2003).

Uma limitação em relação a outros ensaios é que o ultrassom tem dificuldade em examinar faixas de espessura muito finas (ANDREUCCI, 2003).

Durante a reação de polimerização da resina ocorre a liberação de voláteis que podem ficar aprisionados no material, resultando em vazios e/ou bolhas quando não se utiliza um sistema de vácuo adequado capaz de retirar estes subprodutos da reação. Esses vazios são considerados defeitos que atuam como concentradores de tensão, portanto, para a verificação e controle desse parâmetro, a técnica não destrutiva de inspeção acústica por ultrassom pode ser utilizada (MILANESE, 2008).

## 2.6 MICROSCOPIA ÓPTICA

A microscopia é uma técnica que utiliza o microscópio para observar detalhadamente objetos, células, entre outros, com dimensões não detectadas a olho nu. O microscópio visa ampliar a imagem do objeto, uma vez que é composto por dois tipos de lentes, a ocular e a objetiva, contendo a informação estrutural pretendida. Para a percepção adequada da estrutura de um objeto é importante que esta produza variações na cor da imagem ou na intensidade luminosa, as quais são as únicas características da luz a que a visão humana é sensível. Dessa forma, a resolução, a ampliação e o contraste são as principais variantes a se considerar quando se pretende observar a morfologia de um objeto utilizando um sistema de microscopia, sendo que a formação da imagem depende da forma como se dá a interação entre a luz e o objeto em questão. (OLIVEIRA, 2007).

A microscopia tem muita importância no estudo das células. Muitas características importantes de interesse nos sistemas biológicos como: estrutura e função das células são demasiado pequenas para serem vistas a olho nu, só podendo, portanto, ser observadas com o microscópio (JVASCONCELLOS, 2013).

### 3 METODOLOGIA

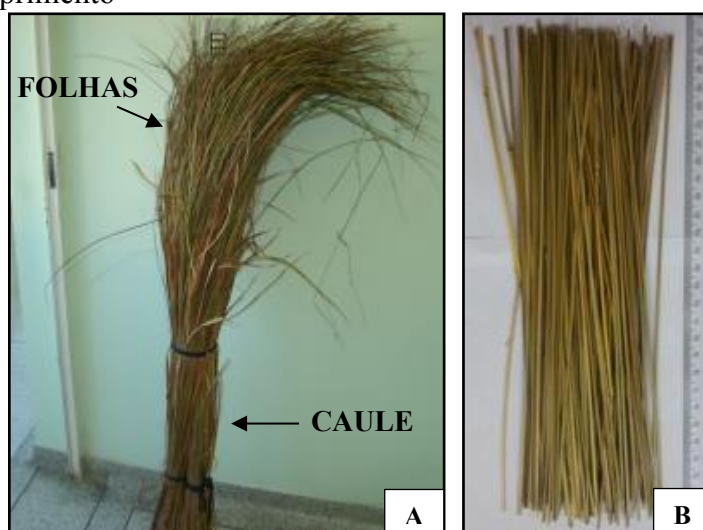
#### 3.1 AQUISIÇÃO DOS MATERIAIS

As matérias primas utilizadas na pesquisa foram: resina epóxi e a fibra natural de capim-sapê.

As fibras de capim-sapê foram obtidas na cidade de Guaratinguetá/SP, separando-se as folhas da parte do caule da fibra (Figura 1A). Foram utilizadas separadamente duas formas de fibras: as fibras longas (27 cm) que foram distribuídas unidirecionalmente e as fibras curtas que foram distribuídas aleatoriamente no compósito.

Primeiramente, o sapê 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 1 - Capim-sapê: A) após colheita e B) fibra selecionada - parte interna do caule cortado com 27 cm de comprimento



As sobras do caule juntamente com as folhas, depois de ficarem por no mínimo 3 (três) dias em estufa à 60°C foram cortadas e trituradas para serem utilizadas na forma de fibras curtas.

Todas as fibras foram utilizadas somente após lavagem em água destilada fervente (temperatura aproximada de 100°C) para retirada de gorduras e extrativos, e secagem em estufa.

Como matriz foi utilizada a resina epóxi bicomponente da marca Polipox, composta pelo reagente RL3135-MV, de média viscosidade, e endurecedor EL3135-M, de média

velocidade (Tabela 2). A proporção recomendada pelo fabricante é a de 1:0,35, em massa, de resina e endurecedor, respectivamente.

Tabela 2 - Dados da resina epóxi composta pelo reagente RL3135-MV e endurecedor EL3135-M (resina de média viscosidade para laminação manual)

	<b>Resina RL3135-MV</b>	<b>Endurecedor EL3135-M</b>
<b>Proporção (gramas e ml)</b>	100 (g ou ml)	35 g/ 40 ml
<b>Massa específica a 23°C (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,135	0,953
<b>Viscosidade a 23°C (cPs ou mPas)</b>	~1500 mPas	~65 mPas
<b>Tempo de gel do laminado a 23°C</b>	--	220 min
<b>Tempo de uso em 50 g a 23°C</b>	--	210 min

Fonte: (POLIPOX, 2012).

### 3.2 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS

Dentre os tipos de compósitos reforçados com fibras, podemos encontrar o uso de fibras curtas e os de fibras contínuas (longas). Ambas as fibras poderão ser dispostas em sentido unidirecional (alinhadas) ou dispersas (desalinhadas).

Neste estudo, foram processados compósitos com fibras longas unidirecionais onde após a colocação e fixação das fibras no molde, a mistura da resina foi despejada sobre as fibras (caso 1). E foram produzidos compósitos com fibras curtas, cujas fibras foram cortadas e picadas, sendo misturadas manualmente junto com a resina para posterior moldagem (casos 2 e 3). Para os casos 1, 2 e 3, expostos anteriormente, a espessura do compósito foi o equivalente ao molde (Figura 2) de silicone utilizado, que possui em torno de 4 mm.

Figura 2 - Limitador do molde em silicone. Graduação em centímetros



Caso 1: Compósito preparado por moldagem sob compressão. Os componentes da resina epóxi bicomponente (resina epóxi e endurecedor) foram misturados manualmente por cerca de 10 minutos. Na sequência, as fibras de sapê foram dispostas uma ao lado da outra, da forma mais homogênea possível, entre placas planas de vidro e dentro do molde de silicone, e

então a resina foi despejada lentamente sobre as fibras, de modo a evitar a formação de bolhas. Posteriormente as placas de vidro foram pressionadas por grampos metálicos após a distribuição da resina com espátula. A espessura do compósito formado por fibras longas unidirecionais (CFL – Compósito de fibra longa) foi o equivalente ao molde de silicone utilizado (Figura 10A).

Caso 2: Compósito moldado por compressão. Os componentes da resina epóxi foram misturados manualmente por volta de 10 minutos. Na sequência, o compósito foi processado pela mistura da resina juntamente com as fibras de capim-sapê curtas, primeiramente, na proporção de 50% epóxi/50% sapê (CFC 50% - Compósito de fibra curta com 50% de fibra) (Figura 10B), em massa, depois na proporção de 50% epóxi/50% sapê (CFC 50% - Compósito de fibra curta com 50% de fibra) (Figura 10C), em volume, depois na proporção de 70% epóxi/30% sapê (CFC 30% - Compósito de fibra curta com 30% de fibra) (Figura 10D), em volume, e por fim, na proporção de 80% epóxi/20% sapê (CFC 20% - Compósito de fibra curta com 20% de fibra) (Figura 10E), em volume, mexendo cada mistura por 15 minutos, no mínimo. Então, essas misturas foram colocadas entre placas planas de vidro, que posteriormente foram pressionadas por grampos metálicos após a distribuição da resina com o capim.

A densidade do capim-sapê foi determinada pesando-se uma pequena quantidade de capim-sapê seco, em seguida, essa quantidade de capim foi imersa em uma bureta com volume conhecido de álcool etílico, de maneira que todo o capim ficasse submerso. Conhecendo-se o volume deslocado, ou seja, o volume ocupado pela fibra, e a massa do capim, foi possível calcular a densidade relativa do capim-sapê, que é de 0,51 g/cm<sup>3</sup>.

Caso 3: Compósito moldado por compressão, utilizando vácuo. Os componentes da resina epóxi foram misturados manualmente por cerca de 10 minutos. Na sequência, como citado anteriormente, foi realizada a degaseificação da resina após mistura juntamente com a fibra curta, utilizando uma bomba de vácuo. Essa mistura permaneceu dentro de um recipiente de vidro vedado, sob efeito de vácuo, por aproximadamente 25 minutos. Seguindo esta metodologia, foram processados compósitos com fibra de capim-sapê e resina epóxi, primeiramente, na proporção de 80% epóxi/20% sapê (CFCDG 20% - Compósito de fibra curta degaseificado com 20% de fibra) (Figura 11A), em volume, e depois na proporção de 75% epóxi/25% sapê (CFCDG 25% - Compósito de fibra curta degaseificado com 25% de fibra) (Figura 11B), em volume. Após a degaseificação, as misturas foram distribuídas entre placas planas de vidro que posteriormente foram pressionadas por grampos metálicos. Os



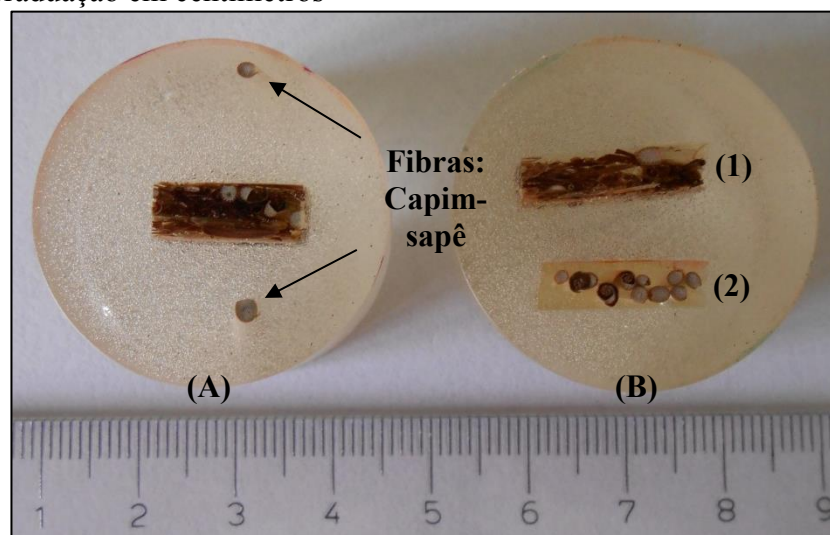
compósitos produzidos com fibras curtas foram confeccionados em diferentes proporções de resina e fibra, pois se buscou uma melhor proporção entre ambos.

Todo o processamento, tanto para o Caso 1, quanto para os Casos 2 e 3, foi realizado à temperatura ambiente e a desmoldagem realizada após sete dias. Para facilitar a retirada do compósito das placas de vidro foi utilizado o desmoldante 700 NC da marca Frekote.

### 3.3 MICROSCOPIA ÓPTICA

Para a realização da microscopia óptica, as amostras de fibra de capim-sapê e dos compósitos de epóxi/sapê (caso 3 - desgaseificados) nas composições de 75% resina/25% fibra (folha picada), em volume (Figura 3A), de 80% resina/20% fibra (folha picada), em volume (Figura 3B1), e com fibras longas unidirecionais (Figura 3B2), foram cortadas e embutidas na resina epóxi bicomponente da marca Polipox, composta pelo reagente RL3135-MV, de média viscosidade, e endurecedor EL3135-M. O lixamento foi realizado com lixas d'água nas granulometrias de 600, 1000, 1500 para a planificação e a etapa de polimento foi realizada pela politriz automática da marca STRUERS Labopol-5.

Figura 3 - A) Fibras de capim-sapê: corte transversal de duas fibras (indicados pela seta) e CFCDG 25%, em volume, e B) Cortes transversais: (1) CFCDG 20%, em volume, e (2) CFL unidirecionais. Graduação em centímetros



O polimento foi realizado com uma velocidade de rotação de 180 rpm, durante 20 minutos com pasta de diamante de 6  $\mu\text{m}$  e lubrificante da marca Polishing Lubricant, com manta própria para esta solução.

Para a análise da morfologia da fibra de capim-sapê e da superfície de contato entre fibra/matriz dos compósitos epóxi/sapê foram obtidas imagens no microscópio óptico de toda

a superfície da amostra. As imagens foram captadas com ampliações de 6,5x, 10x e 20x pela câmera AxioCam/Cc3 associada ao estéreo microscópio Zeiss Stemi 2000, disponível no Departamento de Engenharia de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP.

### 3.4 ENSAIO MECÂNICO - FLEXÃO

Para a caracterização mecânica foram realizados ensaios de flexão estática por 3 pontos, segundo a norma internacional ASTM D790, nos CFL unidirecionais, CFCDG 20% e CFCDG 25% , ambos em volume, e pertencentes ao Caso 3, e na resina epóxi (Figura 4).

Para a produção dos corpos de prova de resina epóxi procedeu-se da seguinte forma: misturou-se o reagente epóxi com o endurecedor, na proporção de 1:0,35, em massa, respectivamente. Posteriormente, essa mistura foi colocada entre placas planas de vidro que foram pressionadas por grampos metálicos após a distribuição da resina dentro do molde de silicone.

Todo o processamento foi realizado à temperatura ambiente e a desmoldagem realizada após sete dias. Para facilitar a retirada da placa de resina das placas de vidro foi utilizado o desmoldante 700 NC da marca Frekote. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram usinados nas dimensões recomendadas pela norma ASTM D790.

Os ensaios de flexão foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, utilizando o equipamento universal de ensaios da marca de ensaio da SHIMADZU.

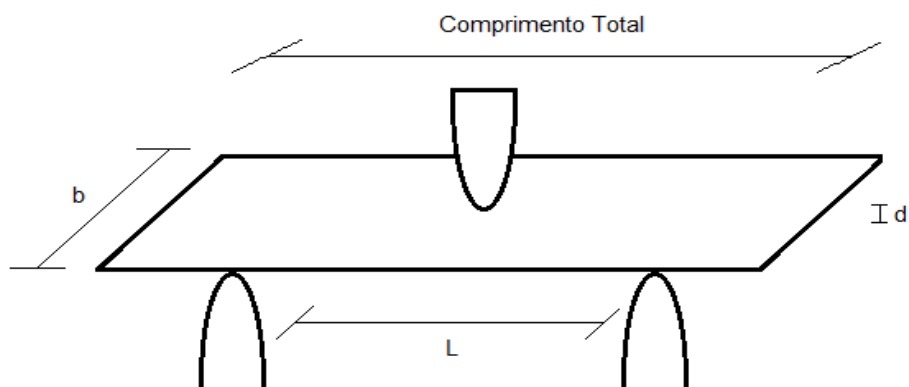
Os dados considerados para fins de cálculo do compósito epóxi/sapê com fibras longas unidirecionais, da resina epóxi pura e dos compósitos com fibras curtas, segundo dimensões esquematizadas na Figura 4, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores das dimensões dos corpos de prova do compósito epóxi/sapê com fibras longas unidirecionais, da resina epóxi e dos compósitos com fibras curtas

Especificações	Dimensões (mm)			
	Compósito fibras longas	Resina epóxi	Compósito 80% epóxi/20% sapê	Compósito 75% epóxi/25% sapê
<b>D</b>	3,94	3,42	4,13	4,63
<b>L = 16d</b>	63,04	54,72	66,08	74,08
<b>b &lt; L/4</b>	15,76	13,68	16,52	18,52
<b>Comprimento total = 1,2L</b>	75,65	65,66	79,30	88,90

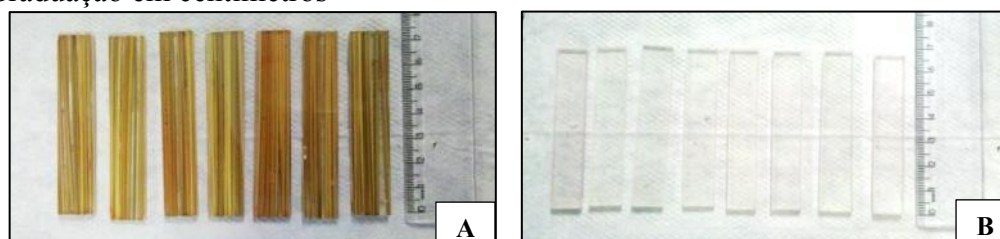
d – espessura do corpo de prova; L – distância entre apoios; b – largura do corpo de prova

Figura 4 - Esquema de um corpo de prova utilizado para o ensaio de flexão estática por 3 pontos, sendo “L” a distância entre apoios, “b” a largura e “d” a espessura



Para os ensaios de flexão foram confeccionados 7 (sete) corpos de prova ilustrados na Figura 5A e na Figura 5B.

Figura 5 - A) Corpos de prova para o ensaio de flexão: A) CFL unidirecional e B) Resina epóxi Graduação em centímetros



Para os ensaios de flexão foram confeccionados 11 (onze) corpos de prova, tanto do CFCDG 20%, em volume, quanto o CFCDG 25%, em volume.

### 3.4.1 Cálculos - Flexão

Os corpos de prova utilizados foram defletidos até que a sua ruptura acontecesse 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 (1):

$$D = \frac{r \cdot L^2}{6 \cdot d} \quad (1)$$

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 também foi calculada, segundo a norma ASTM D790, utilizando a equação (2):

$$V = \frac{Z \cdot L^2}{6 \cdot d} \quad (2)$$

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 de acordo com a norma ASTM D790, utilizando a equação (3):

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3)$$

Em que:

$\sigma_f$  = 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.

### 3.5 INSPEÇÃO ACÚSTICA POR ULTRASSOM

A inspeção acústica por ultrassom foi realizada com o equipamento C-Scan (Figura 6), após o processamento dos compósitos (Caso 3) de 80% epóxi/20% sapê (Figura 11A), em volume, e na proporção de 75% epóxi/25% sapê (Figura 11B), em volume. As imagens foram obtidas pelo programa MUIS32 da MATEC. Os dados foram coletados pelo transdutor de

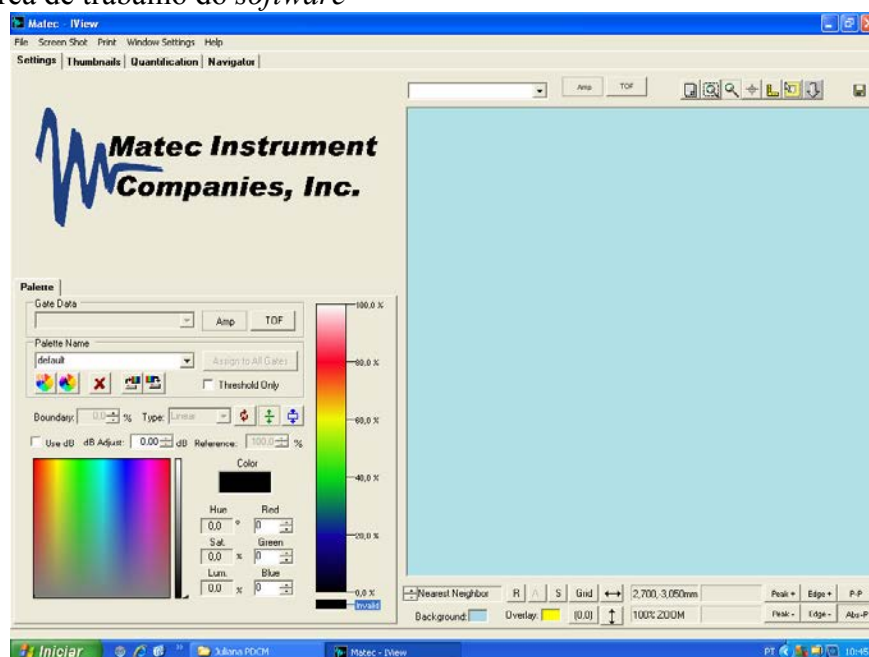
frequência 5MHz que funciona por pulso-eco e foram, posteriormente, analisados no software I-view (Figura 7), desenvolvido pela MATEC. Este software nos permite ter uma visão mais elaborada das atenuações encontradas no equipamento MI-SCAN através de escalas de cores. As imagens foram obtidas no Departamento de Materiais e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista - Campus de Guaratinguetá.

Figura 6 - Equipamento C-Scan



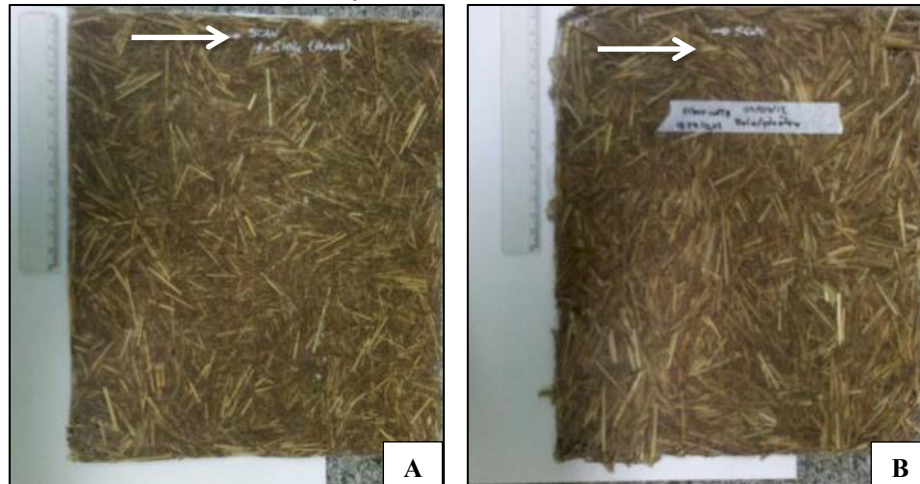
A Figura 7 mostra a área de trabalho do software.

Figura 7 - Área de trabalho do *software*



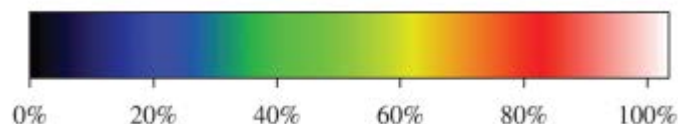
O sentido de varredura dos compósitos foi o da esquerda para a direita, como indicado na Figura 8.

Figura 8 – Compósitos analisados via C-Scan: A) CFCDG 20%, em volume, desgaseificado; B) CFCDG 25%, em volume. Graduação em centímetros



A Figura 9 representa a escala de cor do sinal de atenuação utilizada para analisar os mapas C-Scan, onde 0% representa alta atenuação ou região com baixa densidade, a qual é proporcional à impedância acústica. Em 100%, todo o sinal emitido (eco) é devolvido, significando que a região não possui vazios ou alta densidade.

Figura 9- Escala de cor utilizada nos mapas C-Scan.



### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA – COMPARAÇÕES ENTRE DUAS MÉDIAS

O estudo estatístico realizado com os valores das resistências mecânicas de flexão, entre a resina epóxi e o compósito epóxi/fibras sapê longas unidirecionais e entre os compósitos formados por 80% epóxi/20% sapê e 75% epóxi/25% sapê foi baseado na comparação de duas médias em termos de “t” de Student, utilizando a Tabela apresentada no Anexo A, pois os desvios-padrão das populações ( $\sigma$ ) consideradas (resina e dos compósitos citados anteriormente) são desconhecidos, apresentando  $n_1 + n_2 - 2$  graus de liberdade.

A hipótese a ser testada foi a bilateral, que considera uma hipótese nula ( $H_0$ ) e uma hipótese alternativa ( $H_1$ ), sendo apresentada na Tabela 4. A hipótese nula é prefixada e formulada sobre o parâmetro estudado, com o único propósito de ser rejeitada ou invalidada e

é representada por  $H_0$ . A hipótese alternativa difere da hipótese nula, sendo representada por  $H_1$  (ROKEMBACH, 2009).

Tabela 4 - Teste de uma média com  $\sigma$  desconhecido

Teste	Hipóteses		Rejeita-se $H_0$ se
<b>Bilateral</b>	$H_0$	1 2	$ t_{n_1+n_2-2}  > t_{n_1+n_2-2,\alpha/2}$
	$H_1$	1 2	
<b>Unilateral à direita</b>	$H_0$	1 2	$t_{n_1+n_2-2} > t_{n_1+n_2-2,\alpha/2}$
	$H_1$	1 2	
<b>Unilateral à esquerda</b>	$H_0$	1 2	$t_{n_1+n_2-2} < t_{n_1+n_2-2,\alpha/2}$
	$H_1$	1 2	

Fonte: Adaptado de (Costa Neto, 2002).

Como a análise está relacionada a dados não emparelhados, ou seja, a amostragem da resina epóxi não está correlacionada com a do compósito epóxi/fibras sapê longas unidirecionais e nem a amostragem dos compósitos formados por 80% epóxi/20% sapê e 75% epóxi/25% sapê estão correlacionados entre si, portanto dois casos podem ser considerados para o estudo. Temos para o primeiro caso que os desvios-padrão das populações são desconhecidos, mas podem ser supostos iguais e para o segundo, que desvios-padrão das populações são desconhecidos e não podem ser supostos iguais (COSTA NETO, 2002).

A análise estatística foi baseada em nível de significância de 1%, que corresponde à probabilidade máxima com a qual se sujeita a ocorrer o risco de erro, representado normalmente por  $\alpha$ , sendo inversamente proporcional ao nível de confiança (ROKEMBACH, 2009).

### 3.6.1 Dados não emparelhados – Primeiro caso

Supondo que não são conhecidos os desvios-padrão das populações consideradas resina epóxi ( $\sigma_1$ ) e compósito epóxi/sapê com fibras longas unidirecionais ( $\sigma_2$ ); e dos compósitos 80% epóxi/20% sapê ( $\sigma_3$ ) e 75% epóxi/25% sapê ( $\sigma_4$ ), mas admitindo que esses desvios-padrão são iguais, ou seja,  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$  e  $\sigma_3 = \sigma_4 = \sigma'$  (COSTA NETO, 2002), pode-se utilizar a equação (4) para testar a hipótese para uma dada estimativa ( $t_{n_1+n_2-2}$ ):

$$t_{n_1+n_2-2} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \Delta}{\sqrt{S_p^2(1/n_1 + 1/n_2)}} \quad (4)$$

Em que:

$x_1$  e  $x_2$  = médias das amostras 1 e 2 que serão testadas;

$\Delta$  = valor testado da média, em que  $x_1 - x_2 = \Delta$ .  $\Delta$  (delta) será considerado igual a zero, pois a hipótese a ser testada é da igualdade das médias ( $x_1 = x_2$ );

$S_p$  = estimativa da média populacional para uma proporção  $p$ ;

$n_1$  e  $n_2$  = tamanho das amostras 1 e 2.

Sendo  $S_p$ , calculada conforme a equação (5), em que  $s_1^2$  e  $s_2^2$  são as variâncias das duas amostras disponíveis.

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (5)$$

### 3.6.2 Dados não emparelhados – Segundo caso

Supondo agora que as duas populações tenham desvios-padrão diferentes e desconhecidos, deve-se recorrer a métodos aproximados (COSTA NETO, 2002).

Como a quantidade de amostras não é grande, a mesma estatística  $t$  de Student é utilizada, porém, a comparação de seu valor é realizada com um valor crítico convenientemente corrigido ( $v$ ), calculado segundo a equação (6):

$$v = \frac{(w_1 + w_2)^2}{w_1^2/(n_1 + 1) + w_2^2/(n_2 + 1)} - 2 \quad (6)$$

Sendo que  $w_1$  e  $w_2$  são calculados pela equação (7):

$$w_1 = \frac{s_1^2}{n_1} \quad \text{E} \quad w_2 = \frac{s_2^2}{n_2} \quad (7)$$

E,  $t_v$ , calculado segundo a seguinte equação (8):

$$t_v = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \Delta}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}} \quad (8)$$



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS

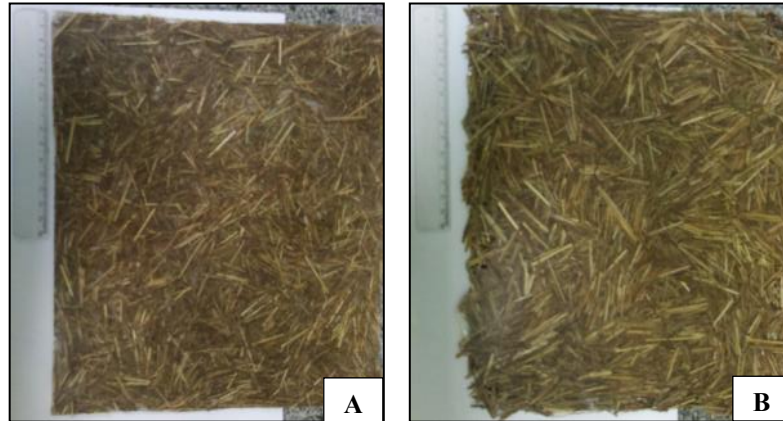
Os resultados dos processamentos dos compósitos mencionados nos casos 1, 2 e 3 estão expostos nas Figura 10 (caso 1 e 2) e Figura 11 (caso 3).

Figura 10 - A) CFL unidirecionais; B) CFC 50%, em massa; C) CFC 50%, em volume; D) CFC 30%, em volume e E) CFC 20% , em volume. Graduação em centímetros



Os compósitos processados de acordo com o caso 2 foram confeccionados em diferentes proporções de resina e fibra curta, pois se buscou uma melhor proporção entre os mesmos, visto que há muita absorção de resina por parte das fibras de sapê utilizadas. Observou-se visualmente que a melhor proporção foi a de 80% epóxi/20% sapê, em volume, porém o compósito formado apresentou bolhas, indicando a necessidade de desgaseificação da resina.

Figura 11 - A) CFCDG 20%, em volume; B) CFCDG 25%, em volume. Graduação em centímetros



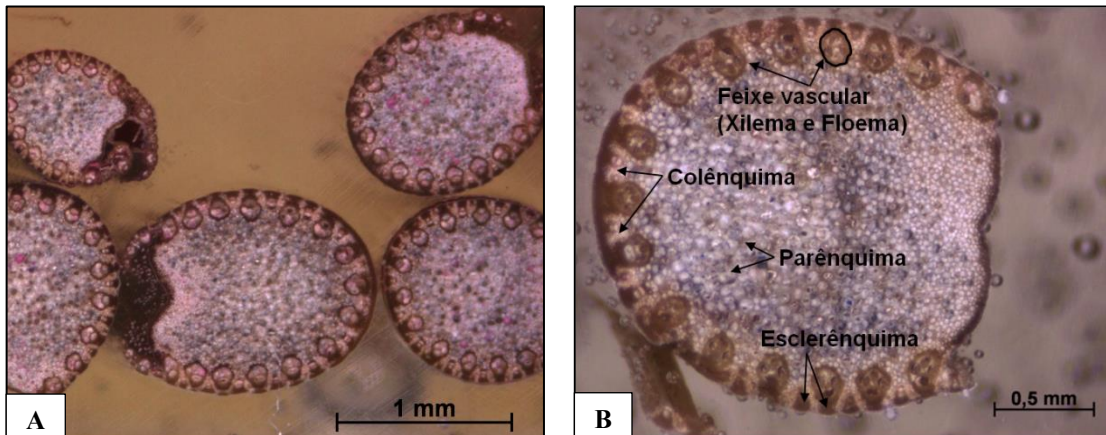
Observou-se visualmente que a melhor proporção foi a de 80% de resina/ 20% de fibra, em volume para os compósitos processados de acordo com o caso 3. Visto que, esse compósito apresentou maior homogeneidade devido a menor presença de vazios (poros).

Portanto comparando os casos 1, 2 e 3 verificou-se visualmente que o compósito formado com fibras curtas aleatórias na proporção de 80% epóxi/20% sapê (Figura 11A), em volume, utilizando o método de degaseificação, resultou na melhor distribuição fibra/resina, visto que as outras proporções do compósito com fibras curtas apresentaram falta de resina entre as fibras, ou seja, vazios na superfície do compósito, resultado da alta absorção de resina pelas fibras picadas de capim sapê, como verificado através da microscopia da fibra.

#### 4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

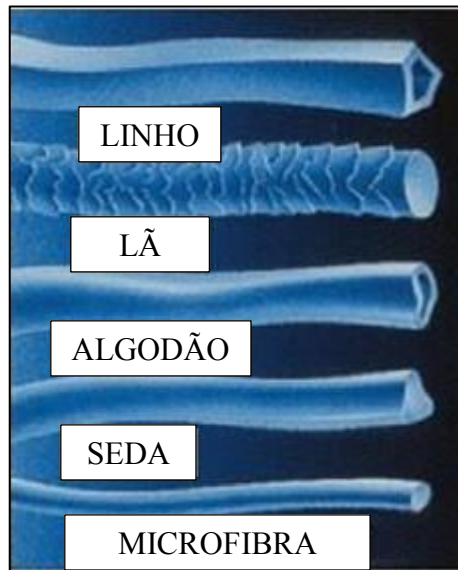
Com as imagens obtidas por microscopia óptica das fibras de sapê após separação manual e lavagem em água destilada fervente foi possível observar o formato da parede celular da mesma (Figura 12), verificando que esta possui um formato oval, se assemelhando a morfologia da fibra de lã (Figura 13) e também apresenta vazios internos, resultando da presença de vasos condutores (xilema e floema).

Figura 12 – Micrografias do caule das fibras de sapê: corte transversal. A) Aumento de 10x e B) Aumento de 20x



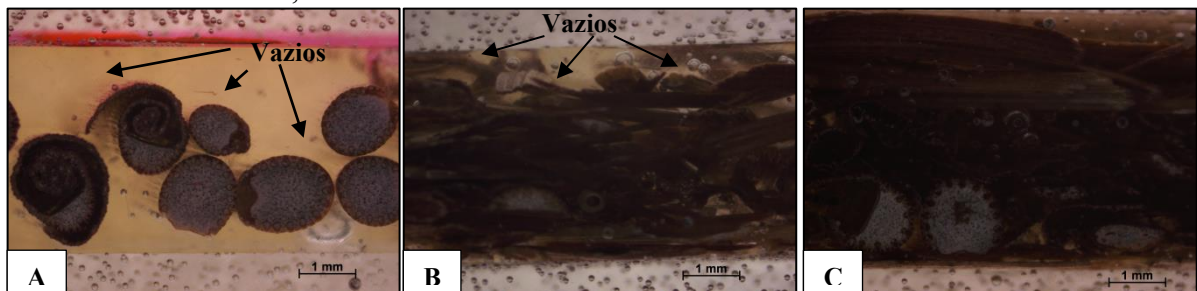
Pode-se observar na Figura 12B que na parte externa da fibra há a presença do xilema responsável pela seiva bruta da fibra - líquido que circula por toda a planta para alimentar as células, sendo formada nas raízes, por absorção da solução existente no solo, que é levada até aos órgãos verdes da planta (caule e folhas) - além da presença do floema responsável pela seiva elaborada da fibra - líquido que se move de modo contínuo por toda planta alimentando suas células, sendo dispersa por todos os tecidos da planta através dos vasos do floema, e seu componente principal é a glicose, um açúcar simples formado pela fotossíntese. Na Figura 12B há também a presença do parênquima - células vivas que estão presentes em vários órgãos das plantas promovendo sua cicatrização e regeneração, podendo também ter a função de fotossíntese, reservar ar e água na planta, além da existência dos tecidos de sustentação: o colênquima - tecido formado por um agrupamento compacto de células vivas com espessamentos de celulose na parede celular que é resistente e dotado de grande flexibilidade, permitindo o crescimento da planta, e o esclerênquima - tecido mais duro formado por células mortas constituído de celulose e de uma substância rígida e impermeável, chamada de lignina, a qual impede a troca de gases e a absorção de alimentos (KARP, 2008; ALBERTS, *et al*, 2010).

Figura 13 – Morfologia - forma e aparência da fibra. Na direção do comprimento tem-se a vista longitudinal e na direção transversal tem-se o corte transversal



Fonte: (AMODELISTA, 2013)

Figura 14 - Micrografias dos compósitos de epóxi/capim-sapê: A) CFL unidirecional. Aumento de 6,5x; B) CFCDG 20%, em volume. Aumento de 6,5x e C) CFCDG 25%, em volume. Aumento de 6,5x



Com as imagens obtidas por microscopia óptica dos compósitos de epóxi/capim-sapê foi possível verificar tanto a distribuição das fibras da matriz de acordo com a porcentagem de reforço adicionado à mistura, quanto à presença de falhas (poros/defeitos) nos compósitos processados (Figura 14). No CFL unidirecional (Figura 14A) observou-se baixa presença de capim com relação à quantidade de resina existente e apresentou baixo número de poros. No CFCDG 20%, em volume, (Figura 14B) verificou-se melhor distribuição dos espaços vazios na resina epóxi com relação à quantidade de fibra de capim-sapê e maior número de poros em relação ao compósito da Figura 14A. No CFCDG 25%, em volume, (Figura 14C), observou-se uma homogeneidade entre as quantidades de fibra de capim-sapê e resina epóxi utilizadas e grande presença de poros com relação ao compósito da Figura 14B.

### 4.3 ENSAIO MECÂNICO - FLEXÃO

#### 4.3.1 Resina epóxi e compósito de epóxi/sapê com fibras longas unidirecionais

O valor de deflexão máxima (D) calculado para os corpos de prova de resina epóxi foi de  $D = 7,30$  mm, enquanto que para o CFL foi de  $D = 8,41$  mm. Assim, conhecendo-se a deflexão com 5% de deformação, se o material não apresentar ruptura, interrompe-se o ensaio.

Os valores da velocidade de carregamento (V) utilizados para os corpos de prova de resina epóxi foi de  $V = 1,46$  mm/min, enquanto que para os corpos de prova do compósito sapê/epóxi com fibras longas foi de  $V = 1,68$  mm/min.

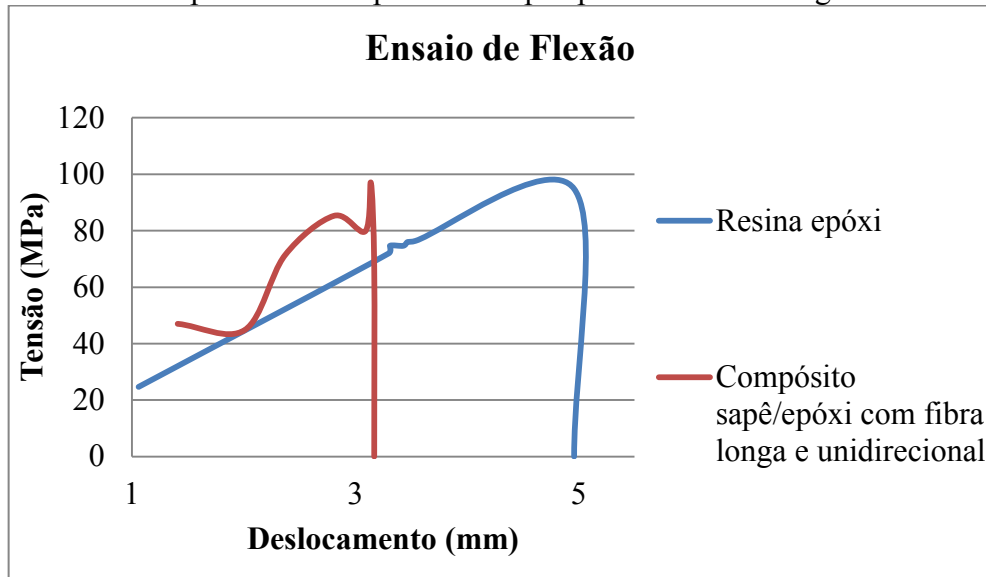
Foram ensaiados 7 (sete) corpos de prova tanto para a resina epóxi, quanto para o CFL, e os resultados são apresentados na

Tabela 5. Os comportamentos de todos os corpos de prova para a resina epóxi e para o compósito estão representados na Figura 15.

Tabela 5 - Dados dos ensaios de flexão

Número da amostra	Resina epóxi			Compósito sapê/epóxi (fibras longas unidirecionais)		
	Força máxima (N)	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)	Força máxima (N)	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)
1	134,70	3,47	76,01	172,36	3,09	79,80
2	131,67	3,31	74,65	206,05	2,81	85,28
3	181,49	4,96	94,83	142,13	1,41	47,01
4	43,10	1,06	24,67	131,20	3,17	67,32
5	126,01	3,54	76,40	200,84	2,37	71,27
6	129,08	3,30	71,97	117,71	2,01	44,81
7	127,62	3,43	74,65	254,92	3,14	96,98
<b>Média</b>	124,81	3,30	70,45	175,03	2,57	70,36
<b>Desvio-padrão</b>	40,95	1,15	21,58	48,83	0,67	19,27
<b>Coefficiente de variação (%)</b>	32,81	34,80	30,63	27,90	26,24	27,39

Figura 15 - Curvas tensão *versus* deslocamento obtidas a partir de ensaios de flexão de todas as amostras de resina epóxi e do compósito de sapê/epóxi com fibra longa e unidirecional



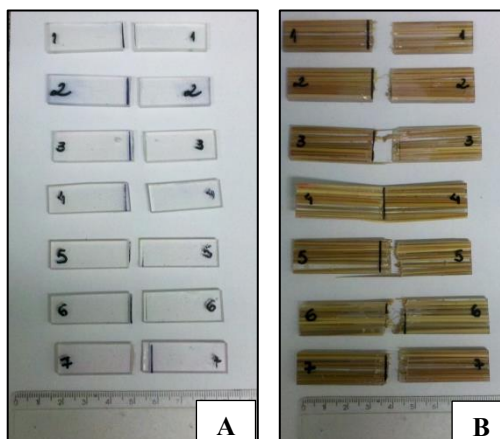
O valor médio da resistência à flexão da resina epóxi é de 70,45 MPa, enquanto que, o valor médio do deslocamento máximo foi de 3,30 mm.

Observou-se que os corpos de prova da resina epóxi apresentaram ruptura como observado na Figura 16A. Como os corpos de prova da resina epóxi apresentaram pequeno deslocamento antes de sofrer ruptura, a resina epóxi pode ser caracterizada como material frágil.

O valor médio da resistência à flexão do compósito sapê/epóxi com fibras longas unidirecionais é de 70,36 MPa, enquanto que, o valor médio do deslocamento foi de 2,57 mm.

Os corpos de prova do compósito sapê/epóxi também apresentaram ruptura como visualizado na Figura 16B.

Figura 16 - Ensaio de flexão em 3 pontos. A) Resina epóxi; B) CFL unidirecional. Graduação em centímetros



Para exemplificar o ensaio de flexão, a Figura 17 e a Figura 18 apresentam o gráfico “Força *versus* Deslocamento” de uma amostra para a resina epóxi e para o compósito sapê/epóxi, respectivamente. Observando os gráficos, e comparando os valores das resistências à flexão do corpo de prova de resina epóxi e do compósito sapê/epóxi apresentados na

Tabela 5, não se verificou uma diferença significativa entre os valores encontrados, que foram de aproximadamente 70,0 MPa, porém esses resultados são seguidos de altos valores de desvio-padrão ( $DP_{epóxi} = 21,58$  MPa;  $DP_{CFL} = 19,27$  MPa). Então, foi conveniente analisar os resultados apresentados de cada corpo de prova separadamente.

As densidades de defeitos (bolhas ou poros) nos corpos de prova de resina epóxi foram diferentes entre si, já que estas irregularidades são inerentes ao processamento e são difíceis de serem controladas. E isto fez com que o desvio-padrão de resistência à flexão fosse elevado no caso da resina epóxi.

Já nos corpos de prova de compósito, cada um deles possuía quantidades de fibras diferentes em sua composição. Isso ocorreu, pois cada fibra utilizada possuía certa curvatura, então foi difícil deixar a mesma proporção de fibra em todo o compósito processado. Dessa forma, cada corpo de prova do compósito apresentou uma resistência à flexão variada, o que também eleva o valor do desvio-padrão.

Em análise macroscópica do corpo de prova do compósito, verificou-se que aquele que continha uma maior quantidade de fibras no seu interior apresentou uma maior resistência à flexão. Porém, acrescentar fibras de capim-sapê à resina favorece também o aparecimento de defeitos (bolhas ou poros), principalmente no contato entre fibra e resina. Por isto, percebe-se que o valor médio de resistência à flexão é parecido para os dois casos estudados, já que no

caso do compósito há um fator positivo para a melhora da resistência (presença de fibras), mas também há um fator negativo (maior quantidade de defeitos).

Percebe-se também que o deslocamento até a ruptura apresentou valores de desvio-padrão elevados para ambos os casos, pelo mesmo motivo anterior: dificuldade de processar corpos de prova. Mas é possível notar que, geralmente, quando a tensão de ruptura é elevada, o deslocamento também é elevado, o que mostra certa coerência nos resultados.

Além disto, percebeu-se que os valores de deslocamento até a ruptura para os corpos de prova do compósito sapê/epóxi foram menores que os valores para a resina. Isso mostra que, com a inclusão das fibras na resina houve um aumento de rigidez do material processado.

E foi observado durante os ensaios que somente após o rompimento da resina é que as fibras começam a se romper, como mostra a Figura 18, onde a representação de cada “degrau” após o valor de força máxima demonstra o momento em que as fibras se romperam. Ainda pode ser observado que há falha de adesão, pois há queda de força similar ao observado na Figura 17.

Figura 17 - Gráfico Força *versus* Deslocamento do ensaio de flexão do corpo de prova 5 de resina epóxi

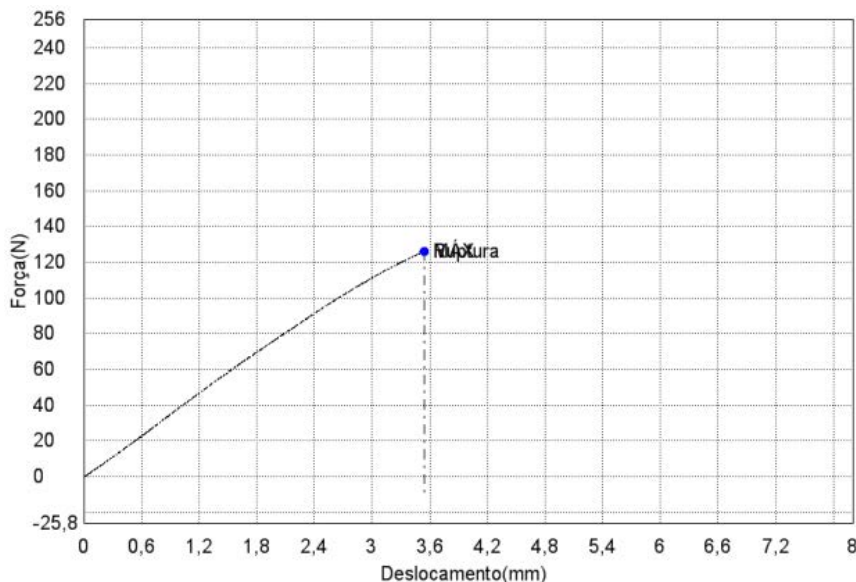
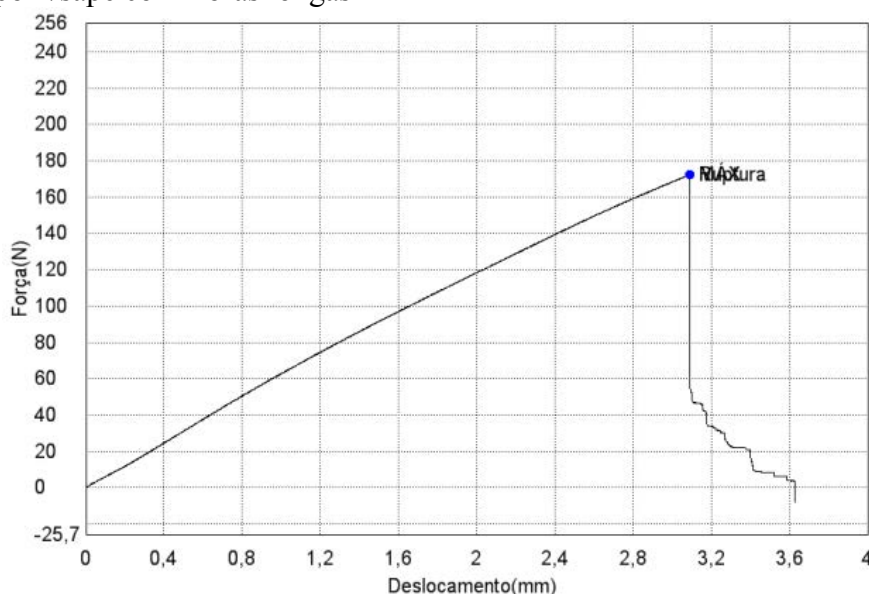




Figura 18 - Gráfico Força *versus* Deslocamento do ensaio de flexão do corpo de prova 1 do compósito epóxi/sapê com fibras longas



Para comparar se os valores de resistência à flexão encontrados para a resina epóxi ( $70,45 \pm 21,58$  MPa - Tabela 5) podem ser considerados o mesmo daquele obtido para o compósito sapê/epóxi com fibras longas unidirecionais ( $70,36 \pm 19,27$  MPa - Tabela 5) foi realizada a análise estatística, que se baseia na comparação das duas médias. Esta análise leva em consideração a variância (desvio-padrão ao quadrado), o valor médio e a quantidade de amostras analisadas para cada material.

Para testar se a hipótese  $H_0 (x_1 = x_2)$  é verdadeira, foram considerados dois casos (itens 3.6.1 e 3.6.2) para o cálculo de  $t$  de Student, a fim de compará-los com o valor tabelado (Anexo A), sendo todo o cálculo apresentado detalhadamente no APÊNDICE A.

1º caso: Segundo a equação (5), o valor calculado de  $S_p^2 = 418,515$  e, portanto, de acordo com a equação (4), o valor calculado de  $t_{n_1+n_2-2} = t_{12} = 0,004$  e o valor tabelado é  $t_{n_1+n_2-2, \alpha/2} = t_{12; 0,005} = 3,055$ , como o valor calculado de  $t$  não é maior que o valor tabelado, logo aceita-se  $H_0$  e admite-se, para 1% de significância, estatisticamente que as médias da resistência à flexão são iguais.

2º caso: De acordo com a equação (6), calculou-se o valor crítico ( $v = 13,800 \approx 14$ ) e segundo a equação (8), o valor calculado de  $t_v = 0,008$ . O valor tabelado é  $t_{14; 0,005} = 2,977$ , portanto, como o valor calculado de  $t$  não é maior que o valor tabelado, logo aceita-se  $H_0$  e admite-se, para 1% de significância, estatisticamente que as médias são iguais.

A partir da análise estatística foi possível verificar que, o compósito apresentou o mesmo valor de resistência à flexão que o da resina epóxi pura. Ou seja, não houve alteração

da resistência à flexão com a incorporação da fibra de capim-sapê, porém houve uma diminuição na quantidade de material sintético utilizado, contribuindo ambientalmente quando este material for descartado.

#### 4.3.2 Compósitos: 75% epóxi/25% fibra curta de capim-sapê e 80% epóxi/20% fibra curta de capim-sapê

O valor de deflexão (D) do CFCDG 25%, em volume, é de  $D = 9,88$  mm, enquanto que para o CFCDG 20%, em volume, é de  $D = 8,81$  mm. Assim, conhecendo-se sua deflexão com 5% de deformação, se o material não apresentar ruptura, interrompe-se o ensaio.

Os valores da velocidade de carregamento considerados para o CFCDG 25% e para o CFCDG 20% foram de  $V = 1,98$  mm/min e  $V = 1,76$  mm/min, respectivamente.

Foram ensaiados 11 (onze) corpos de prova para ambos os compósitos, sendo os resultados apresentados na Tabela 6. A Figura 20 e a Figura 21 ilustram o comportamento em flexão das amostras ensaiadas.

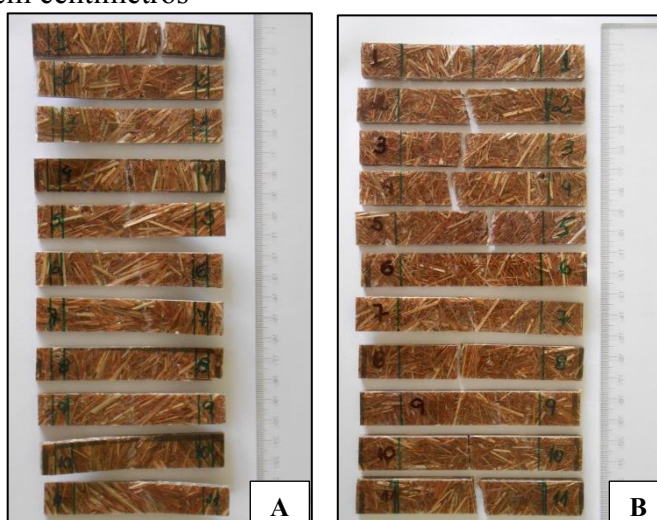
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de flexão

Número das amostras	Compósito 75% epóxi/25% fibra curta de sapê	Compósito 80% epóxi/20% fibra curta de sapê
	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
1	30,80	32,11
2	18,72	17,00
3	11,32	24,82
4	36,67	20,76
5	21,51	34,61
6	27,31	29,07
7	12,03	27,15
8	21,70	21,16
9	13,65	19,78
10	22,44	29,56
11	17,69	19,72
<b>Média</b>	21,26	25,07
<b>Desvio Padrão</b>	7,92	5,80
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>	37,27	23,16

O valor médio da resistência à flexão do CFCDG 25%, em volume, é de 21,26 MPa. Observou-se que os corpos de prova apresentaram ruptura (Figura 19A), mostrando pequeno deslocamento antes de sofrer ruptura (Figura 20).

O valor médio da resistência à flexão do CFCDG 20%, em volume, é de 25,07 MPa. Todas as amostras apresentaram ruptura (Figura 19B), além de pequeno deslocamento antes de sofrer ruptura (Figura 21).

Figura 19 - Ensaio de flexão em 3 pontos. A) CFCDG 25%, em volume; B) CFCDG 20%, em volume. Graduação em centímetros



Para exemplificar, a Figura 20 a Figura 21 apresentam o gráfico “Tensão *versus* Deslocamento” de todas as amostras para os CFCDG 25% e os CFCDG 20%, respectivamente. Observando os gráficos, e também comparando as resistências à flexão dos compósitos apresentados na Tabela 6, não se verificou uma diferença significativa entre os valores de Tensão em flexão encontrados para ambos os compósitos. Os resultados são seguidos de baixos valores de desvio-padrão ( $DP_{CFCDG\ 25\%} = 7,92\text{ MPa}$ ;  $DP_{CFCDG\ 20\%} = 5,80\text{ MPa}$ ) se comparado com os valores de desvio-padrão encontrados no ensaio de flexão da resina epóxi e do compósito de sapê/epóxi com fibras longas unidirecionais ( $DP_{epóxi} = 21,58\text{ MPa}$ ;  $DP_{CFL} = 19,27\text{ MPa}$ ).

Foi verificado durante os ensaios que somente após a falha da resina é que as fibras começaram a se romper, como mostram a Figura 20 e a Figura 21, em que a representação de cada “degrau” após a aplicação da força máxima demonstra o rompimento das fibras.

Figura 20 - Gráfico (tensão *versus* deslocamento) do ensaio de flexão dos corpos de prova do compósito 75% epóxi/25% fibra curta de sapê, em volume

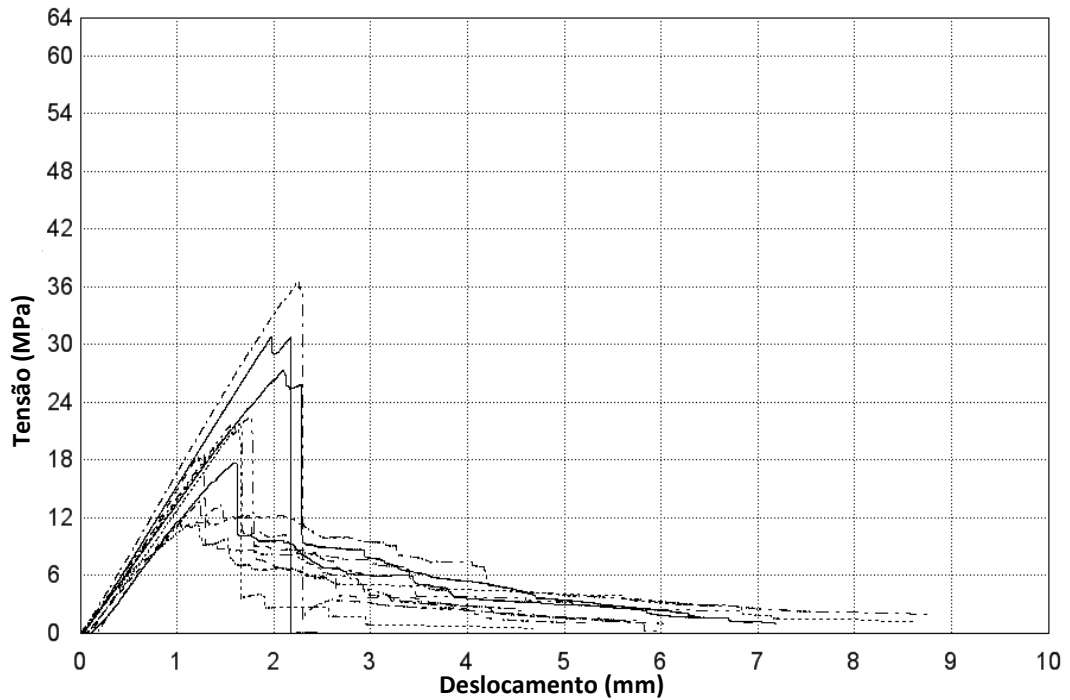
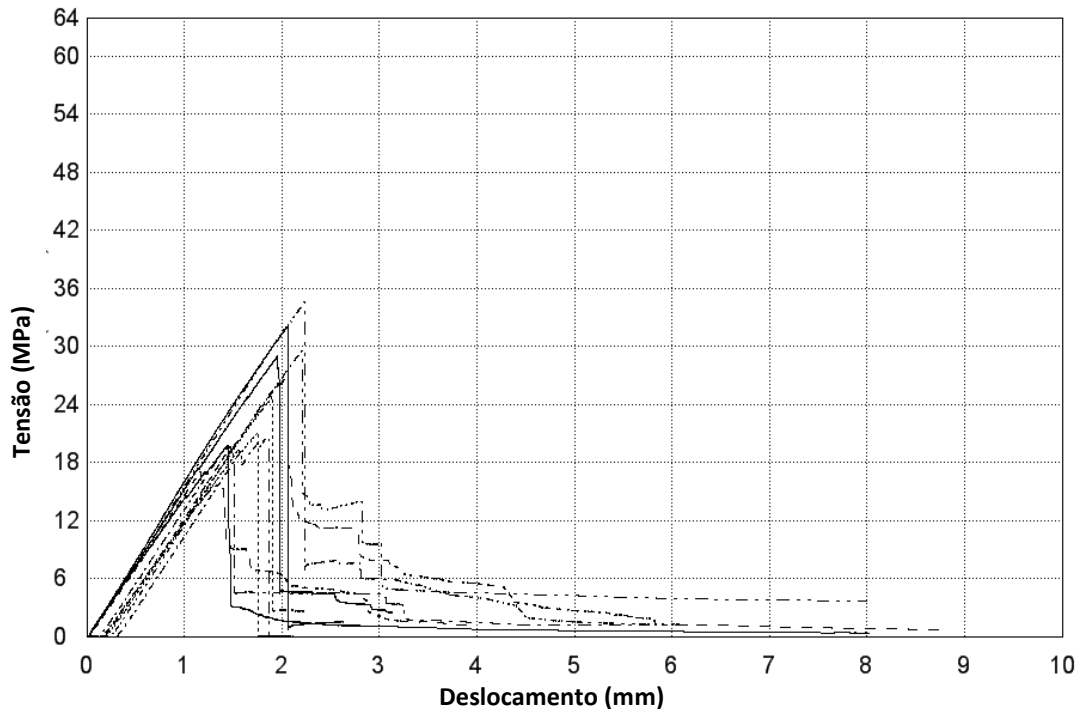


Figura 21 - Gráfico (tensão *versus* deslocamento) do ensaio de flexão dos corpos de prova do compósito 80% epóxi/20% fibra curta de sapê, em volume



Para comparar se os valores de resistência à flexão encontrados para o CFCDG 25% ( $21,26 \pm 7,92$  MPa - Tabela 6) podem ser considerados iguais aos daqueles obtidos para o

CFCDG 20% ( $25,07 \pm 5,80$  MPa - Tabela 6) foi realizada a análise estatística, que se baseia na comparação das duas médias.

Para testar se a hipótese  $H_0 (x_1 = x_2)$  é verdadeira, foram considerados dois casos (itens 3.6.1 e 3.6.2) para o cálculo de t de Student, a fim de compará-los com o valor tabelado (Anexo A), sendo todo o cálculo apresentado no APÊNDICE A.

1º caso: Segundo a equação (5), o valor calculado de  $S_p^2$  é 48,183 e, portanto, de acordo com a equação (4), o valor calculado de  $t_{n_1+n_2-2} = t_{20} = -0,548$  e o valor tabelado é  $t_{n_1+n_2-2, \alpha/2} = t_{20; 0,005} = 2,845$ , como o valor calculado de  $|t|$  não é maior que o valor tabelado, logo aceita-se  $H_0$  e admite-se, para 1% de significância, estatisticamente que as médias da resistência à flexão são iguais.

2º caso: De acordo com a equação (6), calculou-se o valor crítico ( $v = 19,996 \approx 20$ ) e segundo a equação (8), o valor calculado de  $t_v = -1,287$ . O valor tabelado é  $t_{20; 0,005} = 2,845$ , portanto, como o valor calculado de  $|t|$  não é maior que o valor tabelado, logo aceita-se  $H_0$  e admite-se, para 1% de significância, estatisticamente que as médias são iguais.

A partir da análise estatística foi possível admitir que, o c CFCDG 25%, em volume, apresentou o mesmo valor de resistência à flexão que o CFCDG 20%, em volume. Ou seja, não houve alteração da resistência à flexão com a incorporação de mais fibra de capim-sapê no compósito processado, porém houve uma diminuição na quantidade de material sintético utilizado, o que pode ser considerado também como uma boa contribuição ambiental.

Comparando as resistências à flexão dos compósitos formados por fibras curtas com o valor encontrado para resina epóxi foi possível verificar que houve queda de resistência de flexão nos compósitos, visto que o mesmo era formado por fibras dispostas aleatoriamente e em sua composição havia folhas e partes do caule picados.

#### 4.4 INSPEÇÃO ACÚSTICA POR ULTRASSOM (C-SCAN)

Apesar da resina epóxi ser transparente, facilitando a visualização macroscópica da superfície dos compósitos 80% epóxi/20% fibra curta sapê (Figura 11A), em volume, e 75% epóxi/25% fibra curta sapê (Figura 11B), em volume, foram realizadas análises por ultrassom dos dois compósitos formados com diferentes proporções de capim e resina para verificar a distribuição das fibras e possíveis defeitos causados pela impregnação da resina.

Para que a análise qualitativa dos compósitos citados anteriormente fosse realizada por meio do C-Scan foi estabelecido um padrão para a varredura do material.

A Figura 22 e a Figura 23 ilustram as análises C-Scan realizadas nos compósitos 80% epóxi/20% fibra curta sapê e /75% epóxi/25% sapê, respectivamente, divididas em dois *gates* (amplificadores de porta) para cada compósito. O *gate* 1 (Figura 22A e Figura 23A) representa a superfície do laminado e o *gate* 2 (Figura 22B e Figura 23B) representa a camada localizada entre o topo e a base da placa.

Como o *gate* 2 inclui a análise de toda a espessura do compósito, as discussões apresentadas são baseadas nas imagens geradas pelo *gate* 2. As análises dos mapas C-Scan foram baseadas na escala de cor do sinal de atenuação (Figura 9), a qual indica que o valor de 0% representa alta atenuação ou região com baixa densidade e o valor de 100%, todo o sinal emitido (eco) é devolvido, significando que a região não possui vazios ou possui alta densidade.

Pode-se observar uma pequena variação na impregnação da fibra pela matriz dos compósitos com 80% epóxi/20% sapê e 75% epóxi/25% sapê, pois houve, em ambos os compósitos variações nos valores apresentados de retorno de sinal. Nas Figuras 24B e 25B nota-se alta atenuação do sinal emitido, representados pela coloração em grande parte da placa da cor azul, mas em pequenas regiões houve uma menor atenuação de sinal, representados pela aparição da cor verde, sendo que nessas áreas (em verde) ocorreu maior concentração da fibra de capim-sapê, visto que os compósitos não são homogêneos, pois todo o processamento de ambos os compósitos foi feito manualmente.

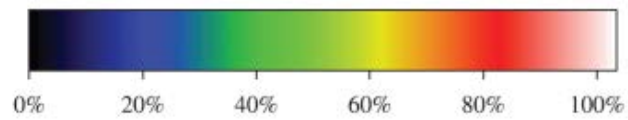


Figura 22 - C-Scan do compósito 80% epóxi/20% fibra curta de capim-sapê, em volume, com o transdutor 5 MHz. A) *Gate 1*; B) *Gate 2*

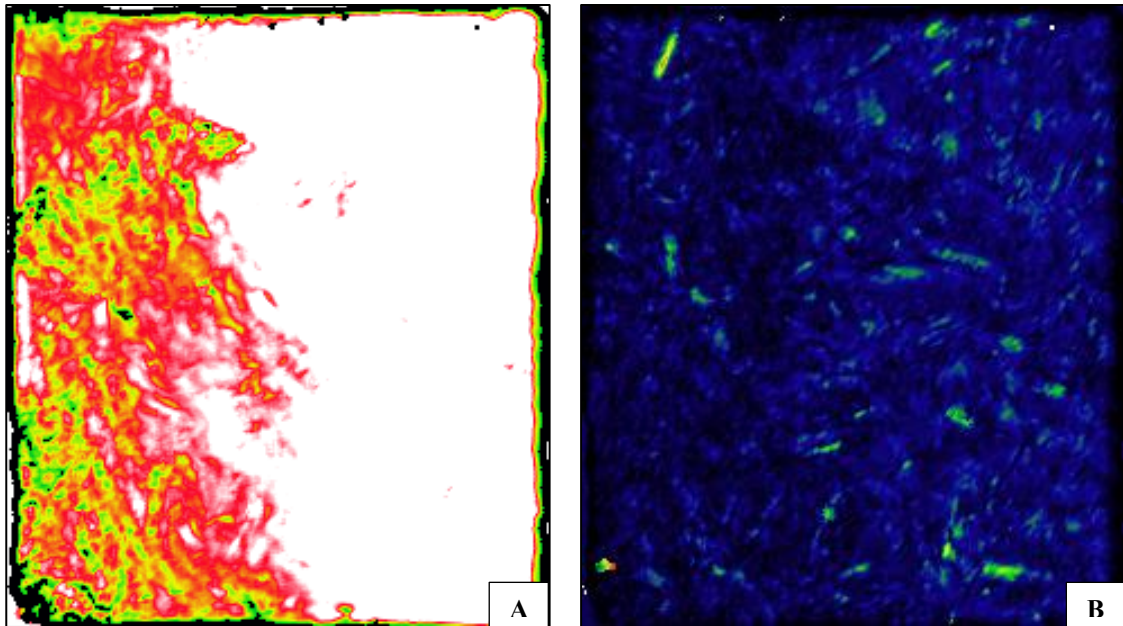
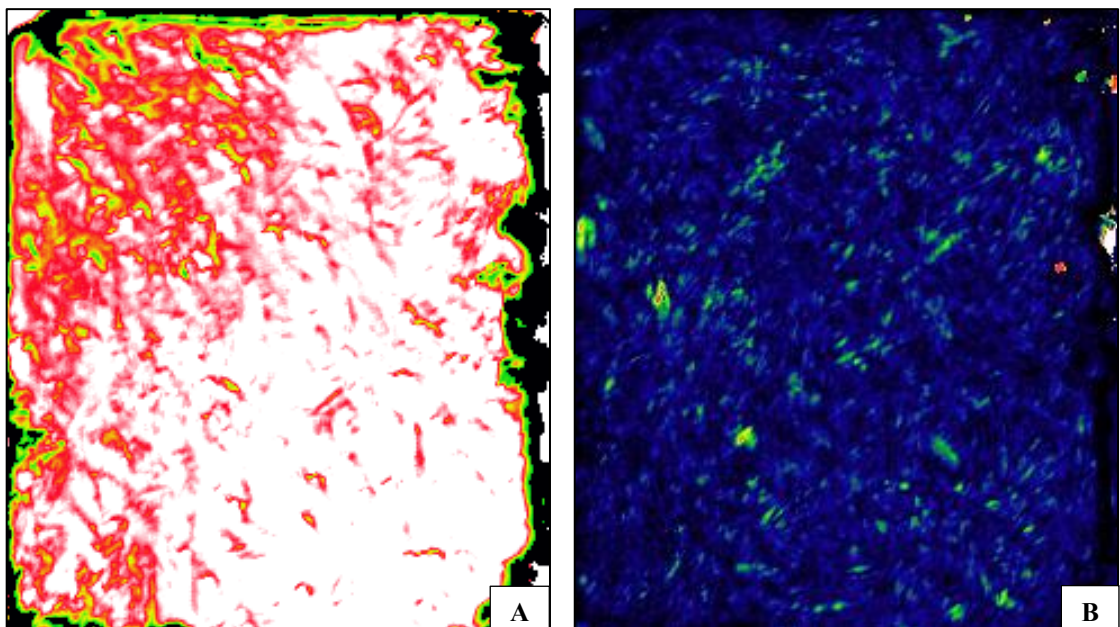


Figura 23 - C-Scan do compósito 75% epóxi/25% fibra curta de capim-sapê, em volume, com o transdutor 5 MHz. A) *Gate 1*; B) *Gate 2*



A inspeção acústica por ultrassom não foi realizada no compósito epóxi/fibra de capim-sapê longa e unidirecional, pois analisando visualmente a placa não foi necessária a análise. Visto que a resina por ser transparente permite uma análise macroscópica (Figura 24), na qual se visualiza os vazios presentes nesse compósito, não necessitando a utilização da análise por ultrassom.

Figura 24 – Fotografia do compósito epóxi/fibras longas e unidirecionais de capim-sapê onde se observa macroscopicamente o espaçamento entre as fibras





## 5 CONCLUSÕES

Levando em consideração o objetivo proposto, foi possível processar compósitos com fibras de capim-sapê e resina epóxi via compressão manual, tanto com fibras longas unidirecionais, quanto com fibras curtas aleatórias.

Em geral, as fibras vegetais possuem características morfológicas individuais, fazendo com que cada fibra natural, dependendo da origem de onde foram extraídas, apresente características e propriedades específicas.

Após a moldagem de diversas proporções entre fibra e matriz do compósito com fibras curtas, conseguiu-se uma melhor distribuição entre fibra/matriz com o compósito 80% epóxi/20% de fibra de capim-sapê curta, utilizando a desgaseificação da mistura (fibra e resina), visto que o mesmo apresentou o menor valor de desvio-padrão com relação aos outros compósitos analisados.

Por meio dos ensaios de flexão realizados, tanto na resina epóxi quanto no compósito epóxi/fibra de capim-sapê longa unidirecional, verificou-se que ambos os materiais apresentaram o mesmo valor de resistência à flexão de 70,0 MPa. O mesmo aconteceu para o CFCDG 25% e para o CFCDG 20%, ou seja, analisando estatisticamente, foi possível comprovar que ambos os materiais apresentaram o mesmo valor de resistência à flexão, por volta de 23,0 MPa, não havendo diferença entre as duas composições.

Assim, observou-se também que os corpos de prova de CFL que tinham maior quantidade de fibras no seu interior apresentaram uma resistência à flexão maior. E verificou-se que com a inclusão de fibras na resina houve um aumento da rigidez do compósito, então o CFL unidirecional é o compósito processado mais viável exposto nesse trabalho.

O ultrassom é uma análise não destrutiva do material e de fundamental importância na compreensão da origem de fraturas, nos fornecendo imagens com as quais é possível localizar, antecipadamente, a região na qual provavelmente o material irá apresentar menor resistência mecânica, ou seja, pode apresentar ruptura sob tensão. De modo geral, ambas as placas de compósitos analisadas via C-Scan, 75% epóxi/25% fibra sapê curta e 80% epóxi/20% fibra sapê curta, apresentaram boa distribuição entre resina e fibra.

O desenvolvimento desse trabalho proporcionou grande crescimento profissional, considerando o acompanhando de todo o processamento dos compósitos por compressão manual, além das caracterizações físicas e mecânicas por flexão das matérias-primas empregadas, bem como dos compósitos de epóxi/fibra de sapê envolvidos.

## REFERÊNCIAS

- ALBERTS, B.; JOHNSON, A.; LEWIS, J.; RAFF, M.; ROBERTS, K.; WALTER, P. **Biologia Molecular da Célula**. 5ª. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 840-841p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 790 - 10**: Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. United States of America, 2011.
- AMODELISTA, 2013. Disponível em: <<http://amodelista.wordpress.com>>. Acesso em 02 set. 2013.
- ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultrassom. Apoio (ABENDE)**. Ed. Julho de 2003. Pág 6.
- ASHRAFI, B., GUAN, J., MIRJALILI, V., ZHANG, Y., CHUN, L., HUBERT, P., SIMARD, B., KINGSTON, C.T., BOUME, O., JOHNSTON, A. **Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes**. Composites Science and Technology. 2011.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª. ed. São Paulo: LTC. 2002. p. 213-217; 273-274; 282-284.
- CANEVAROLO, SEBASTIÃO V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora Ltda. 2007. p. 147-148; 350-355.
- CARVALHO, M. M.; XAVIER, D. F.; FREITAS V. P.; VERNEQUE, R. S. **Correção da acidez do solo e controle do capim-sapé**. 2000.
- CAVALLI, D.A.L., QUEIROZ, F.F., BUGLIA, G., FERRAZ Jr, J.M.F. **Ensaio de flexão em materiais frágeis e resistentes, realizado em diversos materiais**. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Salto, 2010. Disponível em: <<http://189.57.119.178/~miranda/ensaios/flex.pdf>>.
- CHEN, H.; JACOBS, O.; WU, W.; RUDIGER, G. & SCHADEL, B. – **Polym. Test.**, **26**. 2007. p. 351.
- COSTA NETO, Pedro L. de O. **Estatística**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher. 2002, 266p.
- FERREIRA, A.B.H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.
- FONTOURA, C.M., **Desenvolvimento de hélice de material compósito polimérico utilizando a Moldagem por Transferência de Resina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2009.
- 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, Pró Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. 2010. São Cristóvão. 2010.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de "CFRP"**. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2012.

JVASCONCELLOS, 2013. Disponível em: <<http://www.jvasconcellos.com.br/fat/wp-content/uploads/2012/04/Roteiro-Pr%C3%A1ticas.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2013.

KARP, G. **Cell and Molecular Biology: Concepts and Experiments**. 5ª ed. New Jersey: John Wiley. 2008. 310p.

KEULEN, C., ROCHA, B., YLDIZ, M., SULEMAN, A. **Monitoring the Manufacturing, Quality and Structural Health of Resin Transfer Molded Components**. 2010. In: 2<sup>nd</sup> International Symposium on NDT in Aerospace. We.2. B.2. **Anais**. Hamburg, Alemanha.

LOPES, Fernanda F. M.; ARAÚJO, Gilmar T.; NASCIMENTO, José W. B.; GADELHA, Tatiana; SILVA, Valneide R. **Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal**. Revista brasileira de engenharia agrícola ambiental. vol.14, nº 7, Campina Grande, Julho de 2010.

LOPES Fernanda F. M.; ARAÚJO, Gilmar T.; NASCIMENTO, José W. B.; VASCONCELOS Robelsa F. & DANTAS, Júlio M. E. **Avaliação dos efeitos da acetilação nas propriedades das fibras de caroá**. Revista brasileira de engenharia agrícola ambiental. vol.15, nº 1. Campina Grande. 2011. p. 84-89.

MACHADO, Miguel da S.; MULINARI, Daniela R.; CIOFFI, Maria Odila H.; VOORWALD Herman J. C. **Efeito do Tratamento Alcalino sobre a Superfície de Fibras de Sapé**. 2010.

MARINELLI, Alessandra L.; MONTEIRO, Marcos R.; AMBRÓSIO José D.; BRANCIFORTI, Márcia C. ; KOBAYASHI , Márcio; NOBRE, Antonio Donato. **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica**. 2008.

MARQUES, L. S., NARITA, N. E., COSTA, G. G., REZENDE, M. C. Avaliação dos Comportamentos Mecânico e Térmico de Laminados de PPS/Fibra de Carbono Processados em Autoclave sob Diferentes Ciclos de Consolidação. **Polímeros**, vol. 20, nº 4. 2010. p. 309-314.

MARTINEZ, C.B. **Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina**. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

MATTOSO, Luiz H. C.; PEREIRA, Nilson; SOUZA, Miguel L. de; AGNELLI, José A. M. **Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos**. 1996.

MEDEIROS, Eliton Soto; MATTOSO, Luiz H. C.; CARVALHO, Laura Hecker. **Uso de Tecidos de Fibras Vegetais para Melhoria das Propriedades de Materiais Plásticos**. São Carlos, 2002.

MILANESE, Andressa C. **Compósito de Fibra de Sisal/Matriz Polimérica Processado Via RTM**. Guaratinguetá, 2008. Projeto de Pesquisa (Doutorado). –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.

MOOSBURGER-WILL, J.; JAGER, J.; Horn, S.; WELLHAUSEN, C. **Investigation of phase morphology of polyetherimide-toughened epoxy resin by scanning probe microscopy**. 2012.

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

NETO, S. V., **Estudo de junções aeronáuticas híbridas (metal-compósito) unidas mecanicamente**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

PIRES, E. N. **Efeito do Tratamento de Superfície em Fibras de Juta no Comportamento Mecânico de Compósitos de Matriz Epóxi**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2009.

PIRES, G; PEREIRA, D. S.; DIAS FILHO, N. L.; VECCHIA, G. D. **Caracterização Físico-Química e Mecânica do Sistema Éster de Silsexquioxano/ Resina Epóxi Dgeba/ Dietilenotriamina**. Ilha Solteira, 2005. Departamento de física e química, UNESP, Ilha Solteira-SP.

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

ROCKEMBACH, Cecília Queiroz. **Apostila de aula: Testes de Hipóteses**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Matemática. Disponível em: <[http://www.pucrs.br/famat/cecilia/Testes\\_de\\_Hipotese\\_2.pdf](http://www.pucrs.br/famat/cecilia/Testes_de_Hipotese_2.pdf)>. Acesso em: 20 agosto 2013. 2009, 4p.

SASAKI, C.; WANAKA, M.; TAKAGI, H.; TAMURA, S.; ASADA, C.; NAKAMURA, Y. **Evaluation of epoxy resins synthesized from steam-exploded bamboo lignin**. 2013.

SREEKUMAR, P. A.; SAIHAH, R.; SAITER, J. M.; LEBLANC, N.; JOSEPH, K.; UNNIKRIISHNAN, G.; THOMAS, S. **Dynamic Mechanical Properties of Sisal Fiber Reinforced Polyester Composites Fabricated by Resin Transfer Molding**. 2009.

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, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2011.

VENTURA, O.S.P., PASSOS, O.S., LOBO, J.B.A., FUJIYAMA, R.T. **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.

YANG, H.; WANG, X.; YU, B.; SONG, L.; HU, Y.; YUEN, R. K. K. **Effect of borates on thermal degradation and flame retardancy of epoxy resins using polyhedral oligomeric silsesquioxane as a curing agent**. 2012.

ZACHARUK, Mario; BECKER, Daniela; COELHO, Luiz A. F.; PEZZIN, Sergio H. **Estudo da Reação entre Polietileno Glicol e Resina Epoxídica na Presença de N,N-dimetilbenzilamina**. 2011.

## APÊNDICE A – Análise estatística: Cálculos

O estudo estatístico fez a comparação de duas médias em termos de “t” de Student (Tabela ANEXO A) para determinar se as resistências à flexão entre a resina e o compósito podem ser consideradas iguais.

### 1 RESISTÊNCIA À FLEXÃO (resina epóxi e CFL unidirecional)

Considerando:

resistência média amostral da resina epóxi -  $x_1 = 70,45$  MPa;

Resistência média amostral do compósito sapê/epóxi com fibras longas unidirecionais -  $x_2 = 70,36$  MPa;

Variância da média amostral da resina (desvio-padrão ao quadrado) -  $s_1^2 = 465,6964$ ;

Variância da média amostral do compósito -  $s_2^2 = 371,3329$ ;

Tamanho da amostra de resina -  $n_1 = 7$ ;

Tamanho da amostra do compósito -  $n_2 = 7$ ;

Valor testado da média -  $\Delta = 0$ , pois testando a hipótese  $H_0 \quad x_1 = x_2$ , temos que

$\Delta = x_1 - x_2 \therefore \Delta = x_1 - x_2 \rightarrow \Delta = 0$ ;

E, testando para ambos os casos as hipóteses:

$$H_0 \quad x_1 = x_2$$

$$H_1 \quad x_1 \neq x_2$$

Sendo  $H_0$  rejeitado se

$$|t_{n_1+n_2-2}| > t_{n_1+n_2-2, \alpha/2}$$

#### 1.1 PRIMEIRO CASO: DESVIOS-PADRÃO DAS POPULAÇÕES SÃO DESCONHECIDOS, MAS PODEM SER SUPOSTOS IGUAIS

Calculando

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = \frac{(7 - 1)465,6964 + (7 - 1)371,3329}{7 + 7 - 2} = 418,515$$

Mediante

$$t_{n_1+n_2-2} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \Delta}{\sqrt{S_p^2(1/n_1 + 1/n_2)}} = \frac{(70,45 - 70,36) - 0}{\sqrt{418,515(1/7 + 1/7)}} = 0,004$$

O valor crítico é

$$t_{n_1+n_2-2, \alpha/2} = t_{12; 1\%} = t_{12; 0,005} = 3,055$$

Logo, como  $|t_{10}|$  calculado não é maior que  $t_{10; 0,005}$ , aceita-se  $H_0$  afirmando estatisticamente, com 1% de significância, que as médias podem ser consideradas iguais.

## 1.2 SEGUNDO CASO: DESVIOS-PADRÃO DAS POPULAÇÕES SÃO DESCONHECIDOS E NÃO PODEM SER SUPOSTOS IGUAIS

O valor a ser testado é

$$t_v = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \Delta}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}} = \frac{(70,45 - 70,36) - 0}{\sqrt{465,6964/7 + 371,3329/7}} = 0,008$$

Calculando  $w_1$  e  $w_2$

$$w_1 = \frac{s_1^2}{n_1} = \frac{465,6964}{7} = 66,528 \text{ e } w_2 = \frac{s_2^2}{n_2} = \frac{371,3329}{7} = 53,048$$

Temos o valor crítico corrigido

$$v = \frac{(w_1 + w_2)^2}{w_1^2/(n_1 + 1) + w_2^2/(n_2 + 1)} - 2 = \frac{(66,528 + 53,048)^2}{66,528^2/(7 + 1) + 53,048^2/(7 + 1)} - 2 = 13,800 \therefore v \approx 14$$

Adotando  $v = 5$ , o valor crítico tabelado será  $t_{14; 0,005} = 2,977$ . Como  $|t_v|$  não é maior que  $t_{14; 0,005}$ , logo, aceita-se  $H_0$  afirmando, com 1% de significância, que estatisticamente as médias podem ser consideradas iguais.

## 2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO (CFCDG 25%, em volume, e CFCDG 20%, em volume)

Considerando:

Resistência média amostral do compósito 75% epóxi/ 25% fibra curta -  $x_1 = 21,26$  MPa;

Resistência média amostral do compósito 20% epóxi/ 20% fibra curta -  $x_2 = 25,07$  MPa;

Variância da média amostral do compósito 75% epóxi/25% fibra curta - (desvio-padrão ao quadrado) -  $s_1^2 = 62,7264$ ;

Variância da média amostral do compósito 80% epóxi/20% fibra curta -  $s_2^2 = 33,6400$ ;

Tamanho da amostra do compósito 75% epóxi/25% fibra curta -  $n_1 = 11$ ;

Tamanho da amostra do compósito 80% epóxi/20% fibra curta -  $n_2 = 11$ ;

Valor testado da média -  $\Delta = 0$ , pois testando a hipótese  $H_0: x_1 = x_2$ , temos que  $\Delta = x_1 - x_2 \therefore \Delta = x_1 - x_2 \rightarrow \Delta = 0$ ;

E, testando para ambos os casos as hipóteses:

$$H_0: x_1 = x_2$$

$$H_1: x_1 \neq x_2$$

Sendo  $H_0$  rejeitado se

$$|t_{n_1+n_2-2}| > t_{n_1+n_2-2, \alpha/2}$$

## 2.1 PRIMEIRO CASO: DESVIOS-PADRÃO DAS POPULAÇÕES SÃO DESCONHECIDOS, MAS PODEM SER SUPOSTOS IGUAIS

Calculando

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = \frac{(11 - 1)62,7264 + (11 - 1)33,6400}{11 + 11 - 2} = 48,183$$

Mediante

$$t_{n_1+n_2-2} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \Delta}{\sqrt{S_p^2(1/n_1 + 1/n_2)}} = \frac{(21,26 - 25,07) - 0}{\sqrt{48,183(1/11 + 1/11)}} = -0,548$$

O valor crítico é

$$t_{n_1+n_2-2, \alpha/2} = t_{20, 1\%} = t_{20, 0,005} = 2,845$$

Então, como  $|t_{20}|$  calculado não é maior que  $t_{20, 0,005}$ , aceita-se  $H_0$  afirmando estatisticamente, com 1% de significância, que as médias podem ser consideradas iguais.



## 2.2 SEGUNDO CASO: DESVIOS-PADRÃO DAS POPULAÇÕES SÃO DESCONHECIDOS E NÃO PODEM SER SUPOSTOS IGUAIS

O valor a ser testado é

$$t_v = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \Delta}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}} = \frac{(21,26 - 25,07) - 0}{\sqrt{62,7264/11 + 33,6400/11}} = -1,287$$

Calculando  $w_1$  e  $w_2$

$$w_1 = \frac{s_1^2}{n_1} = \frac{62,7264}{11} = 5,702 \text{ e } w_2 = \frac{s_2^2}{n_2} = \frac{33,6400}{11} = 3,058$$

Temos o valor crítico corrigido

$$v = \frac{(w_1 + w_2)^2}{w_1^2/(n_1 + 1) + w_2^2/(n_2 + 1)} - 2 = \frac{(5,702 + 3,058)^2}{5,702^2/(11 + 1) + 3,058^2/(11 + 1)} - 2 = 19,996 \therefore v \approx 20$$

Adotando  $v = 20$ , o valor crítico tabelado será  $t_{20;0,005} = 2,845$ . Como  $|t_v|$  não é maior que  $t_{14;0,005}$ , então, aceita-se  $H_0$  afirmando, com 1% de significância, que estatisticamente as médias podem ser consideradas iguais.

**ANEXO A - Distribuição t de Student – valores de  $t_{v,P}$ , em que  $P = P(t_v \geq t_{v,P})$**

**(COSTA NETO, 2002)**

$v$	$P$				
	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
50	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678
80	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639
120	1,289	1,657	1,980	2,351	2,618
$\infty$	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576