

**RECICLAGEM DE POLIESTIRENO EXPANDIDO:
COMPÓSITO COM FIBRAS DE SISAL PARA CONFECÇÃO
DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Kamila Maria de Souza Silva

Guaratinguetá
2013

KAMILA MARIA DE SOUZA SILVA

RECICLAGEM DE POLIESTIRENO EXPANDIDO: COMPÓSITO COM FIBRAS
DE SISAL PARA CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

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: Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini

Co-Orientadora: Prof. Maria Odila Hilário Cioffi

Guaratinguetá

2013

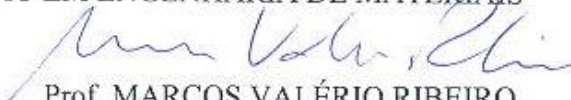
S586r	<p>Silva, Kamila Maria de Souza Reciclagem de poliestireno expandido: compósito com fibras de sisal para confecção de placas de circuito impresso / Kamila Maria de Souza Silva – Guaratinguetá : [s.n], 2013. 47 f. : il. Bibliografia: f. 43-47</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientadora: Ma. Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini Coorientadora: Profª Drª Maria Odila Hilário Cioffi</p> <p>1. Materiais compostos 2. Sisal 3. Poliestireno I. Título</p> <p>CDU 620.1</p>
-------	---

RECICLAGEM DE POLIESTIRENO EXPANDIDO: COMPÓSITO COM FIBRAS DE
SISAL PARA CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Kamila Maria de Souza Silva

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. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


KELLY CRISTINA COELHO DE CARVALHO BENINI
Orientador/UNESP-FEG


ANDRESSA CECÍLIA MILANESE
UNESP-FEG


THATIANE BROCKS
UNESP-FEG

Novembro 2013

Kamila Maria de Souza Silva

NASCIMENTO	10.02.1990 – Ribeirão Preto / SP
FILIAÇÃO	Jeronymo Bento da Silva Junior Elaine Aparecida de Souza Silva
2008/2013	Curso de Graduação Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida, minha família e pelas experiências e aprendizados que tive até hoje;

Aos meus pais e meu irmão pelo amor incondicional e constante dedicação em todos os momentos em que precisei;

À minha bisavó Cândida Lovo, por todo o carinho e dedicação e por ter me ensinado a nunca desistir;

Ao meu namorado, pelo incentivo e motivação diários, que sempre me fizeram seguir em frente;

À minha professora Maria Odila Hilario Cioffi que demonstrou empenho e dedicação em me auxiliar no desenvolvimento e conclusão deste trabalho;

À minha orientadora Kelly Benini por todo suporte e paciência, contribuindo com construtivas e fundamentais orientações;

A todas as moradoras da República Só Fadinhas por me proporcionarem grandes momentos de alegria e aprendizagem ao longo dos cinco anos em que lá morei;

À minha amiga Paula Schmidt pelo incentivo e auxílio ao longo de todo o trabalho.

Às minhas amigas Tamires, Mabile, Suelen, Liane e Taciana, que se tornaram minhas irmãs, com as quais dividi momentos de alegria e tristezas e que estiveram ao meu lado durante toda minha trajetória acadêmica.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram com o presente trabalho e possuem uma parcela de importância em minha vida.

“Uma grande vitória só é possível se precedida de pequenas vitórias sobre nós
mesmos”

Leonid Leonov

SILVA, K. M. S. **Reciclagem de poliestireno expandido: compósito com fibras de sisal para confecção de placas de circuito impresso** 2013. 47f. Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

No presente trabalho foram processados compósitos de poliestireno expandido reciclado reforçados com fibras de sisal, com a finalidade de aplicação na confecção de placas de circuito impresso. Foi utilizada matriz termoplástica de poliestireno reciclado via fusão proveniente de resíduos de poliestireno expandido (EPS) obtidos do descarte de embalagens de eletrodomésticos. Para a obtenção dos compósitos com 15% e 25% de reforço foram escolhidos resíduos de EPS e fibras naturais de sisal, como incentivo à reciclagem e reutilização de refugos domésticos e à utilização de recursos renováveis. Os compósitos obtidos via mistura em misturador termocinético e moldagem por injeção foram analisados por meio de ensaios normalizados de tração e flexão, a fim de verificar as propriedades mecânicas do material. A caracterização do compósito também foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Termogravimetria (TGA/DTG), Calorimetria exploratória diferencial (DSC) e Análise dielétrica. As análises de resultados mostraram que a porcentagem de fibras no compósito influenciou diretamente as propriedades térmicas e mecânicas do mesmo. As placas com menor porcentagem de fibras mostraram propriedades superiores às de maior porcentagem. O material compósito obtido é de fácil processabilidade e sua utilização é viável para a confecção de placas de circuito impresso, considerando suas propriedades mecânicas, térmicas e isolantes.

PALAVRAS-CHAVE: Fibras de sisal, poliestireno expandido (EPS), compósito, placas de circuito impresso.

SILVA, K. M. S. **Expanded polystyrene recycled: sisal fiber composite for manufacture of printed circuit boards**. In 2013. 47 f. Work Undergraduate Materials Engineering-Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

In this work polystyrene composites reinforced with recycled sisal fibers were processed, in order to apply in the manufacture of printed circuit boards. A thermoplastic matrix of recycled polystyrene was used, this material came from waste expanded polystyrene (EPS) used in appliance's packages. Composites were prepared with 15% and 25% of sisal fibers. To obtain the composites, wasted EPS and natural sisal fibers were chosen, to encourage recycling and reuse of household waste and also the use of renewable resources. The composites were analyzed by standard tensile and flexural test, in order to verify the mechanical properties of the material. The characterization of the composite was done by scanning electron microscopy (SEM) , thermogravimetry (TGA / DTG) , differential scanning calorimetry (DSC) and dielectric analysis . The analysis of the results showed that the percentage of fibers in the composite influences directly the thermal and mechanical properties. Plates with a lower percentage of fibers showed superior properties at a higher percentage. The composite material obtained is easy to process and it's use is feasible for the confection of printed circuit boards, considering it's mechanical, thermal and insulative properties.

KEYWORDS: Sisal fibers, expanded polystyrene (EPS), composite, printed circuit boards.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipos de fibras e orientação nos materiais compósitos (LEÃO, 2012)	16
Figura 2- Sisal e suas fibras (ATEFFA, 2010).	17
Figura 3- Ciclo de vida do EPS considerando sua reciclagem (SILVEIRA E GROTE, 2001).....	22
Figura 4-Ciclo de reciclagem do EPS (GROTE,2001).....	22
Figura 5- Placa de circuito impresso (ECONOMY GROUP, 2013).....	24
Figura 6-Fluxograma das principais etapas do processamento.	25
Figura 7- Fibras de Sisal: (a) em formato de corda e (b) após o corte.	26
Figura 8-Isopor (a) na forma de embalagens e (b) após a trituração.	26
Figura 9-Dimensões em mm do corpo de prova tipo I para ensaio de tração em plásticos (MILANESE, 2008).	28
Figura 10-EPS (a) antes do aquecimento em estufa e (b) aglutinado.....	30
Figura 11-Compósito de poliestireno expandido reciclado/ 25% sisal.	30
Figura 12- Corpos de prova do compósito com 15% de sisal: (a) flexão (b) tração.	31
Figura 13-Fractografia dos corpos de prova de flexão do compósito 15% de sisal nas seguintes ampliações: (a) 50x (b) 100x e (c) 500x e do compósito 25 % sisal nas seguintes ampliações: (d) 50x, (e) 100x e (f) 500x.	34
Figura 14- Fractografia dos corpos de prova de tração do compósito 15% de sisal nas seguintes ampliações: (a) 50x (b) 100x e (c) 500x e do compósito 25 % sisal nas seguintes ampliações: (d) 50x, (e) 100x e (f) 500x.	35
Figura 15-Gráfico de TGA do Isopor Reciclado Puro, do Compósito com 25% Sisal, do Compósito com 15% Sisal e fibra de sisal.	36
Figura 16-Gráfico de DTG do Isopor Reciclado Puro, do Compósito com 25% Sisal e do Compósito com 15% Sisal.....	37
Figura 17- Gráficos de DSC, curvas do 1º aquecimento do Isopor reciclado puro, do compósito 15% sisal e do compósito 25% sisal.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais (NETO, PARDINE, 2006)	18
Tabela 2-Propriedades em flexão dos compósitos com 15% e 25% de Sisal.....	32
Tabela 3-Valores de resistência à tração dos compósitos com 15% e 25% de Sisal.....	32
Tabela 4- Perda de massa e temperaturas de degradação para as amostras estudadas.	38
Tabela 5-Valores de temperaturas dos gráficos de DSC.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMR - Divisão de materiais.

ASTM - American Society for Testing and Materials.

C15S - Compósito de poliestireno expandido reciclado com 15 % de fibras de sisal.

C25S - Compósito de poliestireno expandido reciclado com 25 % de fibras de sisal.

CIP - Concreto impregnado com polímero.

CDP - Corpos de prova.

DCTA - Departamento de ciência e tecnologia Aeroespacial.

DMT - Departamento de Materiais e Tecnologia.

DTG - Derivada da termogravimetria.

EPS - Poliestireno Expandido.

MEV - Microscopia eletrônica de varredura.

PCI - Placas de circuito impresso.

PS - Poliestireno.

PSp - Poliestireno reciclado puro.

TGA - Análise termogravimétrica.

DSC - Calorimetria diferencial exploratória.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVO.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Compósitos Naturais.....	16
3.2 Poliestireno Expandido (EPS).....	20
3.2.1 Reciclagem do EPS.....	21
3.3 Circuito Impresso.....	23
4 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	25
4.1 Materiais.....	25
4.2 Métodos.....	26
4.2.1 Obtenção da fibra de sisal.....	26
4.2.2 Reciclagem do EPS.....	26
4.3 Caracterização.....	27
4.3.1 Ensaios de tração e flexão.....	27
4.3.2 Termogravimetria (TGA/DTG).....	28
4.3.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	28
4.3.4 Análise dielétrica.....	28
4.3.5 Análise microscópica.....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1 Reciclagem do EPS.....	30
5.2 Ensaios de tração e flexão.....	31
5.3 Análise microscópica fractográfica.....	33
5.4 Termogravimetria (TGA/DTG).....	35
5.5 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	38
5.6 Análise dielétrica.....	40
6 CONCLUSÕES.....	41
7 TRABALHOS FUTUROS.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, é crescente a preocupação com o meio ambiente e a utilização sustentável de recursos naturais, assim como, a reciclagem e reutilização de produtos e subprodutos que derivam desses recursos (RODRIGUES et al., 2013). A reciclagem reintroduz no sistema produtivo parte da matéria e da energia que seria descartada, diminuindo o volume de lixo despejado no meio ambiente, preservando-o de forma a diminuir o comprometimento dos recursos naturais, além disso, faz com que as empresas reduzam seus custos, economizando energia e aumentando sua produtividade (OLIVEIRA, 2012).

O poliestireno expandido (EPS) é encontrado nas embalagens de eletrodomésticos, enchimento de móveis, na construção civil e uma série de outros produtos. Esse material quando descartado gera um enorme prejuízo ao meio ambiente, devido ao seu volume que ocupa grande área dos lixões e aterros sanitários, diminuindo a vida útil desses lugares. Por isso muitas empresas acabam queimando esse material, o que agrava ainda mais a situação, pois quando é queimado o EPS gera uma grande quantidade de poluidores do ar (GOMES, 2011, SARKIS, 2009).

Com a reciclagem do EPS, muitas etapas iniciais da fabricação da matéria-prima virgem podem ser eliminadas resultando em uma diminuição dos gastos com energia e, conseqüentemente, a emissão de poluentes associada ao processo de obtenção do poliestireno expandido, pois permite a redução da demanda de insumos (combustível, eletricidade, etc.) (GROTE; SILVEIRA, 2001).

Além da reciclagem, outro foco de interesse das indústrias é a utilização de matérias-primas provenientes de recursos naturais, pois podem substituir algumas fibras originadas de derivados petroquímicos na produção de compósitos, visto que estes materiais derivam de recursos renováveis e biodegradáveis (MARINHO, 2013).

Uma das diversas opções é a utilização da fibra de sisal, uma fibra vegetal retirada das folhas da planta *Agave sisalana perrine* que, no Brasil, é encontrada nas regiões semiáridas do nordeste e apresenta muitas vantagens em relação às fibras sintéticas. São fibras que se renovam rapidamente, possuem baixo custo, baixa densidade, são menos abrasivas aos equipamentos de produção, não são tóxicas e são biodegradáveis (MOTHÉ; ARAUJO, 2004 e MALKAPURAM; KUMAR; NEGI, 2009).

Do sisal utilizam-se principalmente as fibras das folhas, classificadas no grupo de fibras chamadas estruturais, cuja função é a de dar sustentação e rigidez à planta, que depois de

beneficiadas se destinam à indústria de cordoaria e à indústria automobilística (JOSEPH et al., 2002).

A partir do EPS reciclado e das fibras naturais é possível processar um material compósito baseado nas três dimensões dos atuais princípios de sustentabilidade: social, ambiental e econômica. De acordo com esses princípios, no aspecto social, deve-se haver preocupação com os impactos sociais gerados com a ação tomada. Essa preocupação deve ser considerada dentro e fora de uma organização. No aspecto ambiental deve-se haver preocupação com os impactos ambientais pelo uso de recursos naturais e emissões de poluentes. No aspecto econômico a preocupação existente é com a eficiência econômica, ou seja, geração de lucro e vantagens competitivas no mercado (BARBIERI et al., 2010).

Uma possível utilização deste tipo de compósito é a substituição de materiais utilizados como substrato para placas de circuito impresso.

As placas de circuitos impressos utilizadas na indústria de eletro-eletrônicos são compostas por uma base isolante, na qual são fixados os componentes através de solda, substituindo a fiação, e a circulação da corrente elétrica ocorre por uma fina camada de um condutor estampada na placa. A utilização dessas placas diminui o tamanho e melhora a estética dos equipamentos eletrônicos (MEHL, 2013).

Atualmente, na indústria, os materiais mais utilizados na confecção da base isoladora são: fenolite, papel epóxi, compósito com fibra de vidro e de poliéster, porém ainda existem placas de filmes de poliéster, filmes específicos à base de diversos polímeros ou compostos desse material (MEHL, 2013; LUCCA, 2013; RADISPIEL FILHO, 2013)

No presente projeto serão desenvolvidos materiais compósitos de poliestireno expandido reciclado reforçados com fibras de sisal para a produção de substratos para placas de circuito impresso. Os materiais obtidos serão comparados com aqueles tradicionalmente usados de forma que as propriedades mecânicas, elétricas e físico-químicas sejam adequadas para o uso industrial.

2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de compósitos a partir da reciclagem de EPS por fusão, reforçados com fibras curtas de sisal, com a finalidade de produzir o substrato para a confecção de placas de circuito impresso.

O objetivo específico é comparar os materiais obtidos com aqueles tradicionalmente usados de forma que propriedades mecânicas, elétricas e térmicas sejam adequadas para o uso industrial. Para isso, o compósito foi caracterizado mecanicamente em tração e flexão, e termicamente através de análises de termogravimetria (TGA/DTG), calorimetria exploratória diferencial (DSC), além das análise dielétrica e análise microscópica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Compósitos Naturais

Compósitos são materiais multifásicos obtidos de uma combinação artificial de diferentes materiais com o objetivo de adquirir propriedades desejadas onde um componente por si só não consegue atingir. Esse tipo de material pode ser projetado de forma a possuir as propriedades desejadas de acordo com a escolha dos materiais constituintes, suas proporções, distribuições, morfologia, textura, e ainda a estrutura e composição da interface entre os componentes. Por causa dessas características, os materiais compósitos são utilizados para satisfazer as necessidades das indústrias, como por exemplo, aeroespacial, automotiva, eletrônica entre outras. Com isso, eles constituem a maior parte dos materiais de engenharia comercial (CHUNG, 2010).

Geralmente as propriedades que se deseja atingir são: menor densidade, maior resistência mecânica, maior rigidez, resistência à fadiga, tolerância a danos, resistência química, estabilidade dimensional, baixa resistividade elétrica, alta condutividade térmica, entre muitas outras, de acordo com a aplicação (WALLENBERGER; WESTON, 2010).

As fibras têm como principal função melhorar as propriedades mecânicas do material compósito, e podem se apresentar de diversas formas, sendo fibras curtas ou longas, alinhadas ou não, ou partículas (CALLISTER, 2001).

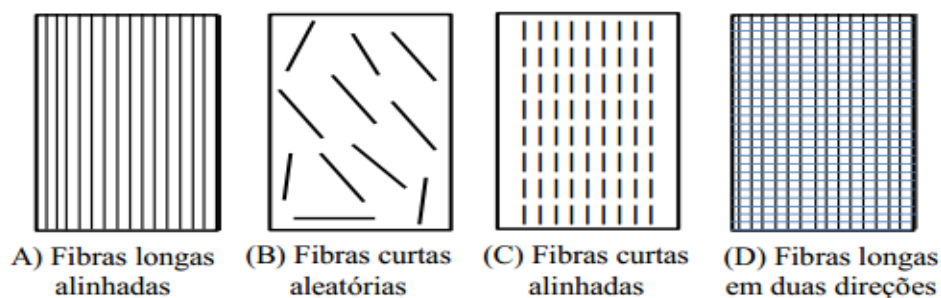


Figura 1- Tipos de fibras e orientação nos materiais compósitos (LEÃO, 2012)

Atualmente existem vários tipos no mercado, como por exemplo, fibras de vidro, carbono, aramida, entre outras. Porém elas são derivadas de recursos sintéticos e não renováveis, o que se torna uma preocupação quanto ao esgotamento desses recursos (FURLAN et al, 2012, PIRES, 2009).

A utilização de materiais compostos por fibras naturais e plásticos reciclados pós-consumo é uma boa alternativa à escassez e alto custo dos materiais sintéticos derivados do petróleo.

O uso de fibras naturais para produtos comerciais é desejável do ponto de vista ambiental, no entanto, elas só serão comercialmente viáveis, se apresentarem características tão boas quanto o material que elas substituem, ou ao menos, suficiente para a aplicação desejada. Elas devem apresentar boa funcionalidade e baixo custo (WALLENBERGER; WESTON, 2010).

A substituição de fibras sintéticas pelas fibras naturais traz vantagens ecológicas, sociais e econômicas, ou seja, são renováveis e biodegradáveis, geram empregos na zona rural, apresentam boa resistência mecânica e baixo custo (LEVY; PARDINI, 2006).

Além disso, as fibras naturais, de fonte lignocelulósica, possuem outras características que tornam a sua utilização mais vantajosa como: baixa densidade e abrasividade, portanto não desgastam os equipamentos de processo, não são tóxicas, podem ser modificadas por agentes químicos e são abundantes no meio ambiente (LOPES, 2011). Por terem um custo menos elevado, as fibras naturais podem substituir outras fibras em aplicações onde o custo é mais importante do que a resistência. Geralmente fibras vegetais como coco, juta, sisal e abacaxi são utilizadas como reforço em matrizes poliméricas (MCLAUGHLIN, 1980; PRASAD; PAVITHRAN e ROHATGI, 1983).

O sisal, por exemplo, tem importância muito forte em geração de empregos na zona rural de países tropicais (SOUZA, 2010). O Brasil é o maior produtor e exportador de fibras e manufaturados de sisal, representando 58% da produção e 70% da exportação (BRAZILIANFIBERS, 2013). Além disso, o sisal é a principal fonte de extração de fibras duras vegetais do mundo (SILVA, 2008). A Figura 1 mostra a planta do sisal e suas fibras durante a secagem.



Figura 2- Sisal e suas fibras (ATEFFA, 2010).

A partir da folha de sisal, pode-se extrair de 700 a 1400 fibras, as quais variam de 0,5 a 1 metro de comprimento (OKSMAN et al, 2000).

Algumas propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais utilizadas como reforço de compósitos poliméricos podem ser observadas na Tabela 1.

A matriz, em um material compósito, é a parte que confere estrutura ao material e envolve a fase dispersa do compósito, de forma a preencher os vazios entre os reforços e mantê-los na posição relativa. Além disso, são as matrizes que têm como função transferir as solicitações mecânicas às fibras e as protegerem do ambiente externo (SOUZA, 2012).

Tabela 1- Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais (NETO, PARDINE, 2006)

Tipo de fibra	σ_T (MPa)	E (GPa)	ε_T (%)	ρ (g/cm ³)
Sisal	126 – 800	3,8 – 62,0	2,8 – 10	1,27 – 1,50
Coco	95 – 149	2,8 – 13,7	3,3 – 5,1	1,18 – 1,45
Juta	320 – 500	12,0 – 100	1,3 – 2,8	1,50
Malva	160	17,4	5,2	1,41
Rami	393 – 900	7,3 – 25,0	1,8 – 5,3	1,51
Piaçava	143	5,6	5,9	1,05

σ_T - Resistência à tração, E- Módulo de elasticidade, ε_T - deformação na tração, ρ - densidade.

A principal vantagem dos termoplásticos em relação aos termorrígidos é o fato de não se enrijecerem permanentemente, podendo assim ser reaquecidos e conformados diversas vezes. Além disso, podem apresentar outras vantagens como: maior resistência ao impacto, maior temperatura de trabalho, menor custo de processamento, maior facilidade na execução de reparos e maiores possibilidade de reciclagem de rejeitos (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

Devido à possibilidade de uma produção mais rápida em relação aos termorrígidos, a taxa de crescimento da utilização de termoplásticos tem aumentado consideravelmente (BUNSELL; RENARD; 2005).

Os termoplásticos apresentam alta massa molecular, cadeias na maioria das vezes lineares, podendo apresentar alguma ramificação. Por esse fator, o material apresenta integridade física, mas quando submetido a tensões, são passíveis de deformação plástica (LEVY NETO E PARDINI, 2006).

O emprego deste tipo de material em compósitos varia de acordo com a escolha da fibra e do processo a ser utilizado. Normalmente os termoplásticos são usados com fibras curtas e em moldagem por injeção. Neste caso o termoplástico é colocado em contato com a fibra e fundido, podendo apresentar certa dificuldade no processamento, devido à alta densidade dos polímeros. As propriedades do polímero são designadas pelo grau de cristalinidade, pela morfologia e orientação das redes poliméricas, as quais são relacionadas com as condições de processamento (LEVY NETO E PARDINI, 2006).

As propriedades dos compósitos naturais são influenciadas tanto pela fibra quanto pela matriz. Como as propriedades das fibras vegetais são influenciadas pela colheita, clima, solo entre outros fatores, as propriedades também variam de acordo com a fibra escolhida. Além disso, o processamento das fibras, sua incorporação ao compósito, com relação ao manuseio, impregnação e consolidação podem afetar o resultado final do compósito (MARCONCINI, et al, 2007).

MARINELLI (2008) estudou o desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade, a fim de despertar o interesse da comunidade científica no desenvolvimento de tecnologias para recuperação de áreas degradadas da Amazônia.

Existem vários pesquisadores que estudam o comportamento de compósitos com fibras naturais. Por exemplo, MONTEIRO (2006), estudou a tenacidade ao entalhe de compósitos de poliéster com fibras de piaçava. Foram utilizados corpos de prova com 40% de fibras contínuas de piaçava. Os resultados mostraram tenacidade superior quando comparados com outros compósitos naturais.

MILANESE (2008) desenvolveu e caracterizou compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais de sisal e vidro para materiais de reforço em estruturas de madeira. Foi feita a caracterização por meio da análise térmica, calorimetria exploratória diferencial, difração de raios-x, ensaios de tração e flexão e análise fractográfica. Foram confeccionados compósitos com matrizes de poliuretana à base de óleo de mamona e fenólica, reforçadas com tecidos de fibras de vidro e tecido de sisal. O ensaio de tração mostrou valores de resistência baixos para as resinas de poliuretana e fenólica, 2,5 MPa e 4,9 MPa, respectivamente. Porém quando reforçados com as fibras pode ser observado aumento nas resistências à tração. Os resultados dos compósitos que utilizaram fibras de sisal foram 17 MPa, para o laminado de poliuretana/sisal e 25 MPa, para fenólica/sisal. Com relação à resistência à flexão, os valores encontrados foram 3,7 MPa e 11 MPa para os laminados poliuretana/sisal e fenólica/sisal, respectivamente.

Segundo PIGATTO (2009) a área de termoplásticos reforçados com fibras naturais tem ganhado grande atenção devido à reciclabilidade dos materiais. Seu trabalho teve por

objetivo a confecção de termoplásticos elastômeros de blendas de polipropileno e etileno-propileno-dieno reforçados com fibras de sisal, com ou sem tratamento com NaOH e avaliação de suas características. Foi verificada diminuição do índice de fluidez em maiores teores de fibras e ainda, aumento da absorção de água. Por meio da morfologia, puderam ser observados vazios relacionados com o arrancamento das fibras no ensaio de impacto, principalmente nas fibras não tratadas.

Spinacé et. al. (2011) estudou a utilização de fibras curtas de sisal e curauá em compósitos com matriz de poliolefinas. Foram comparadas as propriedades de compósitos de polietileno de alta densidade ou polipropileno com 20% em massa de fibras curtas de sisal ou de curauá com ou sem agentes de acoplagem. Os compósitos foram processados por extrusão e moldados por injeção. Em relação à resistência à tração e flexão, os compósitos com fibras de Curauá mostraram resultados ligeiramente superiores, enquanto no ensaio de impacto a situação foi invertida.

Guimarães Junior (2013) caracterizou físico-quimicamente fibra e polpas de bambu, difundindo suas propriedades e maximizando sua utilização em aplicações poliméricas. As amostras foram analisadas e caracterizadas. Os resultados mostraram que a polpa refinada apresentou-se mais adequada para ser utilizada como agente de reforço em compósitos poliméricos em detrimento da polpa sem refino e fibra natural.

Gutiérrez (2012) desenvolveu biocompósitos baseados em acetato de celulose e fibras curtas de Curauá tratadas com dióxido de carbono supercrítico. O tratamento das fibras mostrou extração parcial de lignina, sendo este um método interessante pois não resulta em rejeitos químicos. Foram preparadas duas séries de biocompósitos por extrusão, sendo uma delas plastificada com ftalato de dioctila e outra com citrato de trietila. Nos dois casos ocorreu a fibrilação e distribuição uniforme das fibrilas. Os resultados observados foram maior capacidade calorífica, menor condutividade térmica e maior coeficiente de expansão térmica em comparação ao acetato de celulose plastificado. A variação destas propriedades foram intensificadas pelo tratamento das fibras com CO₂ supercrítico.

3.2 Poliestireno Expandido (EPS)

O poliestireno expandido é um material resultante da polimerização do estireno (um derivado do petróleo) em água, onde na fase de polimerização adiciona-se um elemento expansivo. A sigla internacional deste material é EPS (Expanded Polystyrene) e é usualmente conhecido no Brasil como Isopor® marca registrada da empresa Knauf Ltda (antiga BASF Isopor) (TESSARI, 2006).

O EPS é constituído por 98% de ar e apenas 2% de matéria sólida na forma de poliestireno. É composto por milhões de micro células fechadas e cheias de ar, que lhe garantem a extrema leveza e excelente isolamento termo-acústico (CHAGAS et al, 2011). De acordo com a ABRAPEX (2000) os produtos finais de EPS são inodoros, fisicamente estáveis, são reaproveitáveis, recicláveis e podem voltar à condição de matéria-prima.

Na construção civil, o poliestireno expandido (EPS), vem ganhando espaço devido às suas propriedades de baixa densidade e capacidade de isolamento termo-acústico. A sua utilização em edificações permite reduzir a potência necessária para funcionamento eficiente dos condicionadores de ar, trazendo maior conforto aliado à economia de gastos com energia elétrica (TESSARI, 2006). Além disso, esse material é largamente utilizado na indústria de embalagens, como proteção de eletrodomésticos e eletroeletrônicos (CHAGAS et al, 2011).

Atualmente, um dos grandes problemas enfrentados pela população é a destinação final dos resíduos. A reciclagem de resíduos que resultem em produtos com um bom desempenho técnico e que sejam economicamente competitivos é um dos maiores desafios enfrentados por profissionais de diversas áreas (RODRIGUES et al., 2013).

Além disso, a reciclagem tem como objetivo reutilizar um material como matéria-prima e conservar a energia utilizada no processo, fazendo com que os custos direto de processo e a quantidade de poluição gerada sejam reduzidos (CHAGAS et al, 2011).

O volume de EPS descartado constitui uma grande preocupação para a sociedade, por isso existe a necessidade da busca de novas formas de minimizar os problemas causados pela destinação inadequada desses resíduos. O EPS, quando descartado de forma displicente nos lixões, preocupa por causa da queima indevida e sem controle. Ou ainda, quando depositado em aterros sanitários prejudicam a compactação do lixo e a decomposição de materiais biodegradáveis por meio da criação de camadas impermeáveis que impedem a troca de líquidos e gases gerados na biodegradação de matérias orgânicas (PINTO, 1995).

Esses problemas são causados pelas características do EPS, ou seja, por ser um material quimicamente inerte, por não se decompor, desintegrar ou desaparecer no meio ambiente, sendo considerado um material eterno (POLIMEX, 1997).

3.2.1 Reciclagem do EPS

O EPS ao ser reciclado volta a ser poliestireno (PS) e pode ser utilizado como matéria prima. Além disso, a reciclagem do EPS gera uma redução indireta dos impactos ambientais causados pelo ciclo primário de produção deste material, em termos de emissões de CO₂ e redução dos insumos energéticos como petróleo, combustível e eletricidade (SILVEIRA E

GROTE, 2001). A Figura 2 ilustra os processos de reciclagem de resíduos de EPS e sua utilização final.

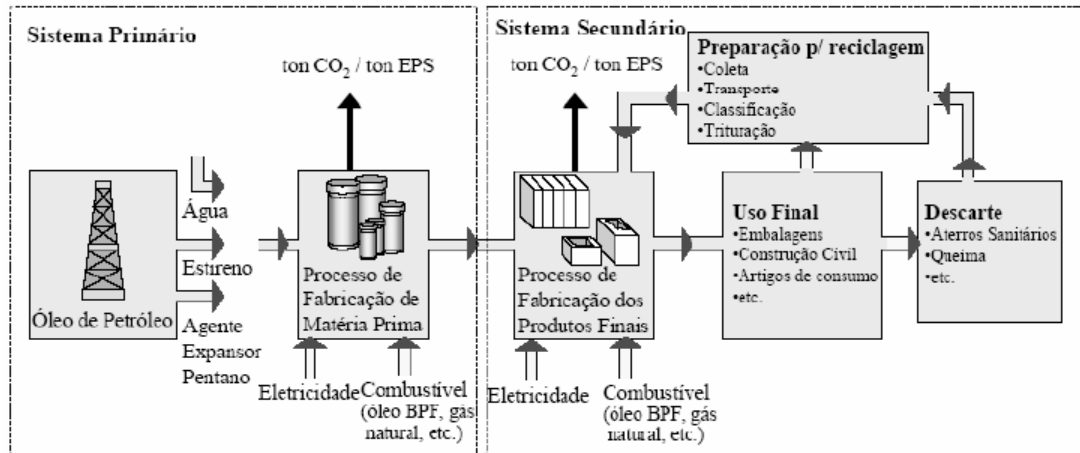


Figura 3- Ciclo de vida do EPS considerando sua reciclagem (SILVEIRA E GROTE, 2001).

Os rejeitos de EPS podem ser processados novamente e moldados em forma de blocos, injetados para produção de embalagens; ser usados como substratos para melhoramento de solo, para drenagens e jardineiras, na aeração de substâncias para melhoria da decomposição; podem ser reutilizados na construção civil; e ainda, podem ser aplicados como complemento em moldes de peças injetadas ou fundição no ramo industrial (GROTE, 1999). A Figura 3 ilustra alguns destinos que podem ser dados ao poliestireno reciclado.

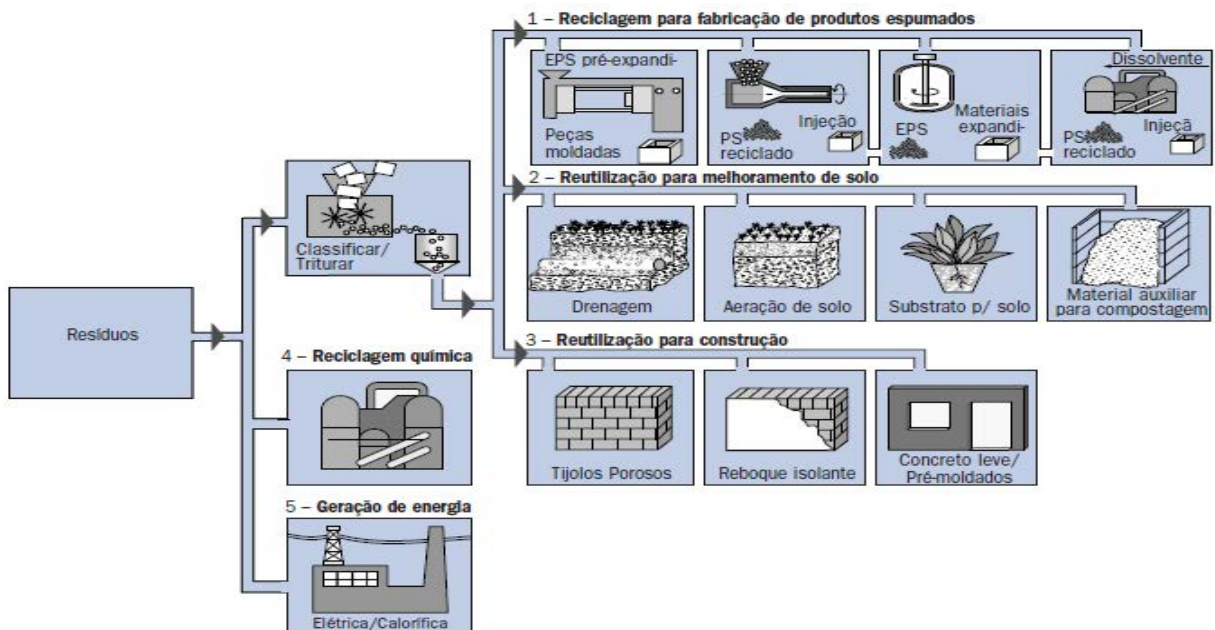


Figura 4-Ciclo de reciclagem do EPS (GROTE,2001).

Amianti e Botaro (2008) estudaram o concreto impregnado com polímero (CIP), utilizando nesse caso o EPS reciclado para redução da permeabilidade de superfícies de concreto. O poliestireno foi reciclado a partir do EPS e foi escolhido por suas propriedades como baixa absorção de água, resistência ao envelhecimento e não constituir substrato para a proliferação de microrganismos. Foram realizados ensaios de absorção de água, verificação de profundidade de tratamento pela análise de ultravioleta e microscopia eletrônica de varredura. O concreto impregnado com EPS reciclado apresentou uma redução significativa da permeabilidade à água, redução da porosidade e pode acarretar uma diminuição da proliferação de fungos na superfície do concreto tratado.

Schmidt (2012) realizou reciclagem de EPS por dissolução, moldagem por compressão e injeção para a produção de placas de circuito impresso. O material obtido foi caracterizado quanto à resistência a flexão, por termogravimetria (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), microscopia eletrônica de varredura (MEV), medida de condutividade elétrica em 4 pontos, inspeção acústica e análise da textura. A partir dos resultados pode-se verificar que os materiais obtidos por homogeneizador termocinético e injeção apresentaram propriedades mais adequadas à aplicação.

3.3 Circuito Impresso

As placas de circuito impresso (PCI) são utilizadas em inúmeras áreas da indústria eletroeletrônica, principalmente nas áreas de processamentos de dados e entretenimento, onde os equipamentos podem conter até 30% em peso de PCI (BERNARDES et al; 1997). São elementos fundamentais em qualquer bem eletrônico, seja de telecomunicação, informática, automatização ou consumo (DORO, 2004).

A PCI consiste de uma placa fina, onde são impressos ou depositados filetes (trilhas) de cobre sobre um ou ambos os lados. Assim, a placa se comporta como um isolante e os filetes conectam eletricamente os diversos componentes, de forma que executem suas funções no circuito (DORO, 2004).

Os componentes são soldados em ilhas, as quais também são conhecidas como *pads*. São partes das trilhas com espaço para uma junta de solda entre o terminal do componente e a placa. Elas podem possuir furos para facilitar a montagem dos componentes (*through-hole technology*) ou os componentes podem ser inseridos diretamente sobre a superfície das ilhas (*surface mount technology*) (DORO, 2004). A Figura 4 mostra uma placa de circuito impresso.

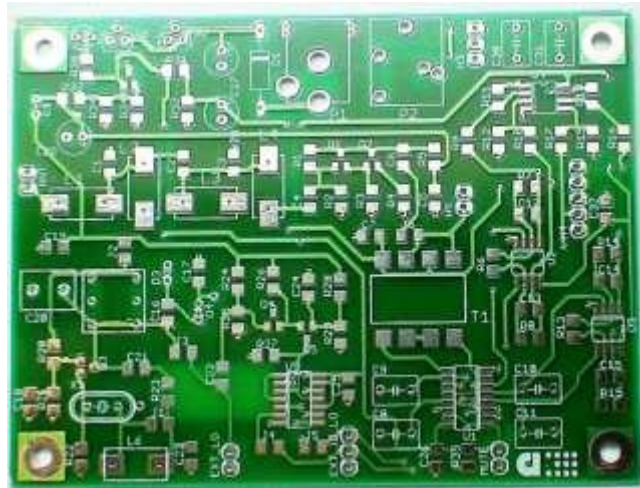


Figura 5- Placa de circuito impresso (ECONOMY GROUP, 2013)

Segundo WILSON (2012), o material empregado como base para a placa deve apresentar algumas características físicas e mecânicas determinadas pelos esforços que irão sofrer em serviço. Alguns exemplos destas propriedades são: flexibilidade, constante dielétrica, resistência à elevação de temperatura, dissipação de calor, resistividade da superfície, umidade, entre outras.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

A metodologia que será utilizada neste trabalho consiste no desenvolvimento de compósitos a base de poliestireno expandido reciclado via fusão, reforçados com fibras curtas de sisal, para a produção de placas de circuito impresso. A Figura 5 representa as principais etapas do processamento.

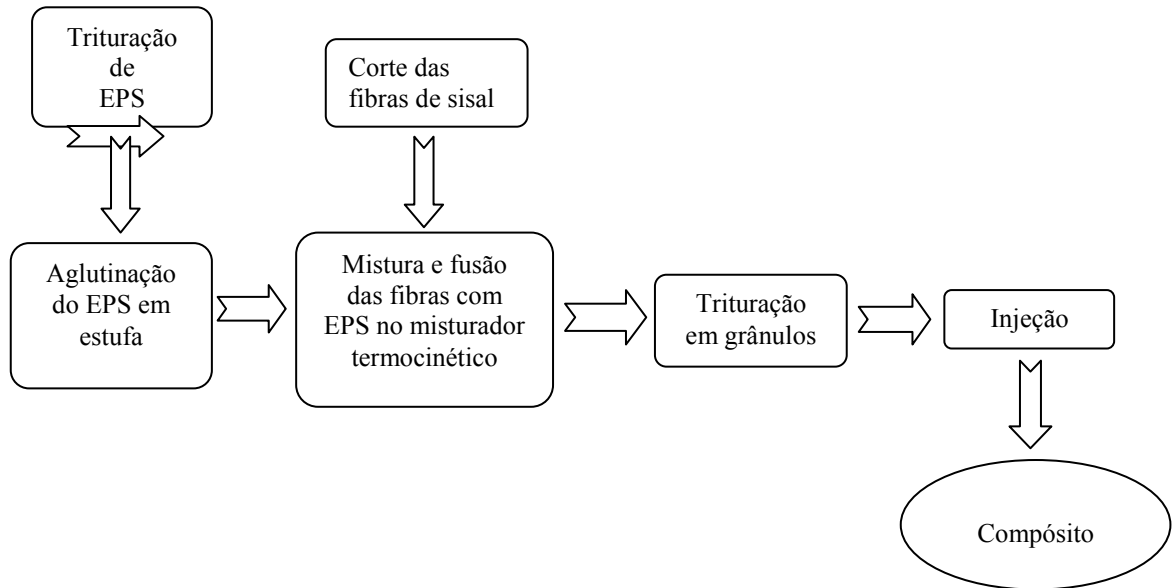


Figura 6-Fluxograma das principais etapas do processamento.

4.1 Materiais

Os materiais que foram utilizados na realização deste trabalho são:

- Poliestireno Expandido (EPS) obtido a partir de embalagens de eletrodomésticos descartadas.
- Fibras de sisal em cordas adquiridas no comércio da cidade de Guaratinguetá/SP.

4.2 Métodos

4.2.1 Obtenção da fibra de sisal

Inicialmente as fibras foram cortadas manualmente de 4 a 7 mm (Figura 6), em seguida peneiradas para que as fibras maiores não fossem utilizadas. As fibras não passaram por nenhum tipo de tratamento químico.



Figura 7- Fibras de Sisal: (a) em formato de corda e (b) após o corte.

4.2.2 Reciclagem do EPS

4.2.2.1 Trituração

O EPS obtido a partir de embalagens de eletrodomésticos descartadas foi quebrado manualmente em partes menores e depois colocado em um equipamento de trituração agrícola, atingindo o formato final de pérolas (Figura 7).

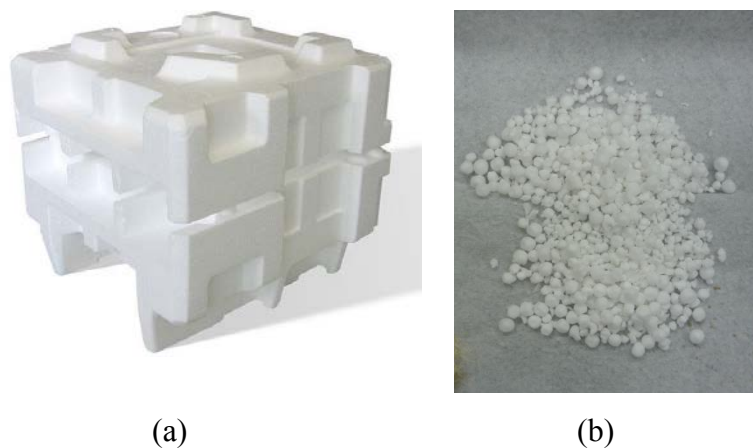


Figura 8-Isopor (a) na forma de embalagens e (b) após a trituração.

4.2.2.2 Aglutinação

A aglutinação do EPS foi realizada através de aquecimento com a finalidade de reduzir o volume e, assim, possibilitar a fusão do mesmo. Esta etapa foi realizada em estufa ORION 515, disponível no DMT da FEG/UNESP, onde o EPS foi exposto a uma temperatura de 100°C por 5 horas.

4.2.2.3 Fusão

O poliestireno (PS), obtido após a aglutinação, foi fundido em um homogeneizador de plásticos de laboratório da MH Equipamentos (modelo MH-50H), disponível na Divisão de Materiais (AMR) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA). O PS e as fibras de sisal foram misturados em duas proporções diferentes, 25% e 15% de sisal em massa. A fusão do isopor ocorreu dentro da cápsula bi-partida, com arrefecimento à água, juntamente com o sisal cortado. As palhetas de homogeneização giram com aproximadamente 2600 rpm na primeira velocidade e 5250 rpm na segunda, tornando o processo de homogeneização extremamente rápido. A primeira velocidade serve para tirar o motor e o eixo do ponto de inércia e a segunda para misturar os materiais. O misturador é mantido ligado até a fusão do material e desligado para que não ocorresse a degradação térmica do mesmo.

4.2.2.4 Injeção

O material obtido na fusão foi submetido à injeção para obtenção do material compósito na forma de corpos-de-prova de tração e flexão. Foi utilizada uma injetora Jasot 300/130 disponível na Divisão de Materiais (AMR) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) em São José dos Campos - SP.

4.3 Caracterização

4.3.1 Ensaio de tração e flexão

Os ensaios de tração e flexão foram realizados em uma máquina universal de ensaios Shimadzu, de acordo com as normas ASTM D 638 e D 790, respectivamente. Foram ensaiados 5 corpos de prova de cada compósito.

Para o ensaio de flexão em três pontos, os corpos de prova foram processados com 48mm de comprimento, com a razão de 16:1 entre comprimento e espessura da amostra, determinada pela norma. Foi utilizada uma velocidade de 1,4mm/min e célula de carga de 5kN.

No ensaio de tração, a taxa de velocidade utilizada foi de 5mm/min e os corpos de prova utilizados foram do tipo I (Figura 8).

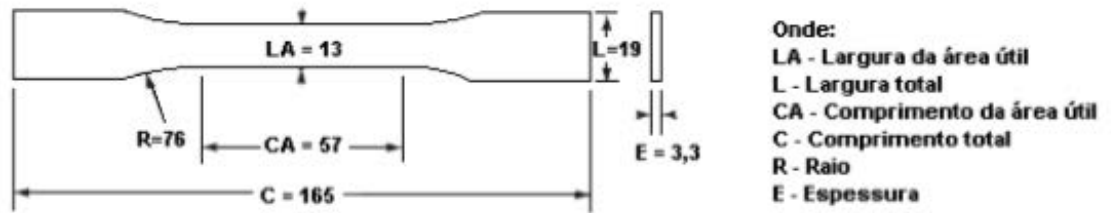


Figura 9-Dimensões em mm do corpo de prova tipo I para ensaio de tração em plásticos (MILANESE, 2008).

4.3.2 Termogravimetria (TGA/DTG)

As amostras do poliestireno após a reciclagem, dos compósitos e da fibra de sisal foram analisadas em uma termobalança Seiko (modelo TGA-50), disponível no DMT/FEG/UNESP com uma razão de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, em fluxo de nitrogênio (100ml/min) no intervalo de temperatura de 30 a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando aproximadamente 10 mg de cada amostra.

A temperatura inicial de degradação para todas as amostras foi considerada com base na norma ASTM E2550 que descreve, entre outros, os métodos de determinação das temperaturas nas quais a decomposição dos materiais se inicia, utilizando a análise termogravimétrica. Sendo assim, a temperatura *onset* (T_{onset}) foi determinada a partir da curva de DTG, sendo considerada como a temperatura da primeira inflexão da linha base.

4.3.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As análises por calorimetria exploratória diferencial (DSC) do EPS e do compósito obtido foram realizadas em um calorímetro TA Instruments modelo DSC Seiko, disponível no DMT/FEG/UNESP, sob atmosfera de nitrogênio a uma razão de aquecimento $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, aquecendo-se cerca de 5 mg de cada amostra. Com rampa dinâmica de aquecimento de 30 a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3.4 Análise dielétrica

O equipamento de análise dielétrica utilizado foi o Analisador de Impedância Solartron SI1260 acoplado à Interface Eletroquímica SI1250. Os ensaios foram feitos variando a frequência na faixa de 0,1 Hz a 1 MHz e aplicando-se um sinal de tensão senoidal de 1 V de

amplitude. As análises foram realizadas no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) em São José dos Campos- SP.

4.3.5 Análise microscópica

Algumas amostras dos corpos de prova de tração e flexão foram analisadas na superfície onde houve a fratura. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), Zeiss EVO LS-15 com sistema EDS/EBDS Oxford INCA Energy 250 disponível no LAIMat - Laboratório de Análise de Imagens de Materiais da FEG/UNESP, operando de 15 a 20 kW e utilizando detector de elétrons secundários. As amostras foram fixadas em um suporte, com auxílio de uma fita de carbono autocolante dupla face, e as superfícies analisadas foram submetidas ao recobrimento metálico com ouro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Reciclagem do EPS

O poliestireno expandido, obtido do descarte de embalagens de eletrodomésticos, foi colocado na estufa, onde ocorreu diminuição de volume das pérolas de EPS. Na Figura 9 pode ser observado o material antes e depois da aglutinação.



(a)



(b)

Figura 10-EPS (a) antes do aquecimento em estufa e (b) aglutinado.

O EPS já aglutinado foi misturado com as fibras curtas de sisal nas duas diferentes proporções em massa (15% e 25%) e foi colocado no misturador termocinético para que ocorresse a fusão do material polimérico e consequente homogeneização com as fibras.

Vale ressaltar que com o aumento no teor de fibras houve também um aumento na dificuldade do processo de mistura fibra/matriz uma vez que as fibras dificultavam a fusão do material dentro da cápsula do misturador.

O material obtido após a fusão e granulação pode ser visualizada na Figura 10.



Figura 11-Compósito de poliestireno expandido reciclado/ 25% sisal.

O compósito foi colocado na injetora e foram obtidos corpos de prova de tração e flexão, conforme mostrado na Figura 11.

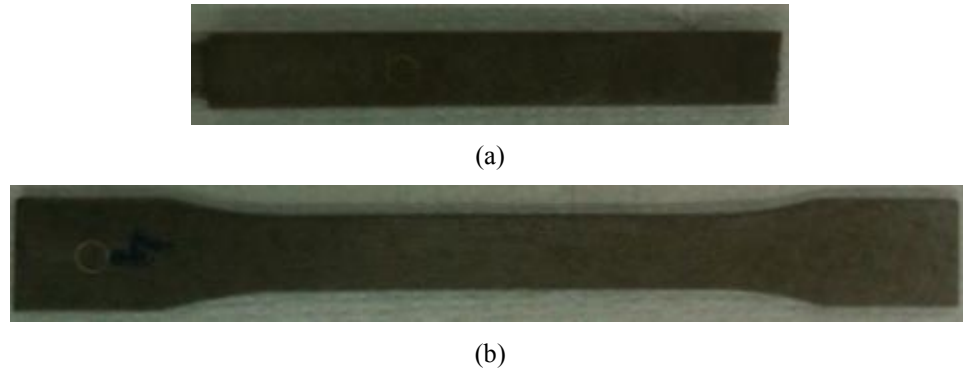


Figura 12- Corpos de prova do compósito com 15% de sisal: (a) flexão (b) tração.

5.2 Ensaio de tração e flexão

Os resultados obtidos a partir do ensaio de flexão em três pontos estão apresentados na Tabela 2, assim como os valores de resistência à flexão da fenolite e do poliestireno puro reciclado obtidos por Schmidt (2012).

Analisando os dados da Tabela 2, pode-se observar que o compósito com 15% de sisal apresentou valor de resistência à flexão médio 5,94% superior ao do compósito confeccionado com 25% de fibras. Em relação aos resultados encontrados por Schmidt (2012) para o poliestireno puro reciclado via fusão em misturador termocinético (PSp), os dois compósitos confeccionados apresentaram resistência média inferior.

Por outro lado, se considerarmos os valores de desvio padrão, que foram elevados principalmente para o PSp e para o compósito C25S, não houve diferença significativa entre os valores. O C15S apresentou menor desvio em relação aos outros dois materiais, ou seja, houve menor dispersão dos resultados. Essa menor dispersão, é um indicativo da maior confiabilidade dos resultados e melhor reprodutibilidade para o C15S.

Analisando os valores de módulo elástico, o C15S apresentou valor 1,94% maior do que o C25S, porém como observados para os valores de resistência à flexão média, os valores de desvio padrão dos módulos são elevados e por isso é possível concluir que não houve diferenças significativas entre os valores para os compósitos com 15 e 25% de fibras.

Comparando os resultados de resistência à flexão dos compósitos obtidos neste trabalho com a fenolite, que é um dos materiais mais comumente utilizados para as placas de circuito impresso atualmente, é possível observar que mesmo utilizando um reforço no poliestireno puro reciclado a fenolite apresenta valor consideravelmente superior. Contudo considerando todo o aspecto ambiental do material proposto neste trabalho e visto que para a aplicação

proposta não são aplicados grandes esforços mecânicos, os resultados obtidos para os compósitos com fibras de sisal podem ser considerados satisfatórios.

Tabela 2-Propriedades em flexão dos compósitos com 15% e 25% de Sisal.

CDP	Resistência à flexão MPa	Deformação %	Módulo Elástico MPa
C15S	47,9 ± 2,0	1,7 ± 0,1	2227,3 ± 127,3
C25S	45,1 ± 6,5	1,9 ± 0,4	2190,0 ± 530,3
Fenolite	443,4 ± 9,4*	-	
PSp	55,6 ± 9,2*	-	

* Segundo publicação de Schmidt (2012).

Analisando os resultados obtidos no ensaio de tração, apresentados na Tabela 3, pode-se verificar que o C15S apresentou resistência à flexão média 9,49% superior ao C25S, porém, assim como nos valores de resistência à flexão, considerando os desvios padrão obtidos, pode-se dizer que não houve diferença significativa entre os valores de resistência à tração média dos compósitos. O desvio padrão dos valores de resistência à tração do C15S foi menor, o que indica maior confiabilidade dos resultados.

Com o aumento da adição de fibras na matriz polimérica é esperado que a deformação do material diminua uma vez que as fibras tornam o material mais rígido, como foi observado nos compósitos com fibras de bagaço de cana e de coco verde no trabalho de Benini (2010). Porém no caso dos compósitos com 25% de sisal é possível observar que o aumento no teor de fibras proporcionou aumento no valor na deformação total do material. Esta disparidade dos resultados pode ser atribuída a problemas durante o processamento visto que com o aumento de fibras o processo de mistura e injeção foi dificultado, o que pode ter causado falta de homogeneidade das fibras dispersas na matriz.

Tabela 3-Valores de resistência à tração dos compósitos com 15% e 25% de Sisal.

CDP	Resistência à tração MPa	Deformação %
C15S	31,6 ± 2,3	2,9 ± 0,19
C25S	28,6 ± 4,9	3,4 ± 0,28

Desta forma, pode-se dizer que o fato da adição das fibras não alterar a resistência dos compósitos, significa que as fibras não agiram como reforço como era esperado. Isto pode ser atribuído a diversos fatores como à falta de adesão fibra/matriz devido ao fato das fibras não terem sido previamente tratadas para remoção de impurezas; falta de secagem das fibras antes

dos processos de mistura e injeção, para remoção da umidade e tamanho crítico das fibras que pode ter sido menor que o necessário para elas atuarem como reforço e proporcionarem uma boa ancoragem mecânica nos compósitos.

Apesar das fibras terem sido cortadas entre 4 e 7 mm durante os processos de mistura fibra/matriz no misturador termocinético as fibras podem ser quebradas devido à alta rotação das palhetas, não sendo possível controlar as dimensões das mesmas durante a fabricação do compósito.

A partir dos resultados obtidos, fica claro que o C15S apresenta melhor reprodutibilidade, devido aos menores valores de desvio padrão apresentados. Esse fato pode ser atribuído ao melhor processamento, já que com menor quantidade de fibras, as dificuldades encontradas durante o processo de mistura foram menores.

Em relação à utilização do C15S ao invés do PSp, já que os resultados não apresentaram diferenças significativas nos valores de resistência média, deve-se considerar o fator ambiental. Com a utilização do material compósito com fibras naturais, seria reduzida 15% da utilização de material sintético (EPS), ocasionando assim, menor quantidade de poliestireno descartado pós-consumo, visto que as placas de circuito impresso não possuem vida útil longa, devido ao crescente avanço tecnológico. Sendo assim, o uso do C15S seria favorável quanto aos aspectos ambientais e ecológicos.

5.3 Análise microscópica fractográfica

A análise fractográfica teve por objetivo a avaliação da interação fibra/matriz, que vem corroborar com os resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

Na Figura 12 podem ser observadas as imagens obtidas por meio das superfícies de fratura dos corpos de prova de flexão dos compósitos com 15%, Figuras 12(a), (b) e (c) e 25% de reforço, Figuras 12(d), (e) e (f).

Nas imagens da Figura 12 (a), (b) e (d), são mostrados vazios originados durante o processamento do material. Na Figura 12 (b), (c), (d) e (e) é possível observar algumas fibras de sisal, onde se visualiza boa adesão entre fibra e matriz, como indicado nas imagens. Porém, é possível observar também algumas marcas de arrancamento de fibras (*pull out*) e a falta de adesão fibra/matriz.

Na imagem da Figura 12 (c) é possível observar também o espaçamento ocorrido entre a fibra e a matriz devido à falta de adesão.

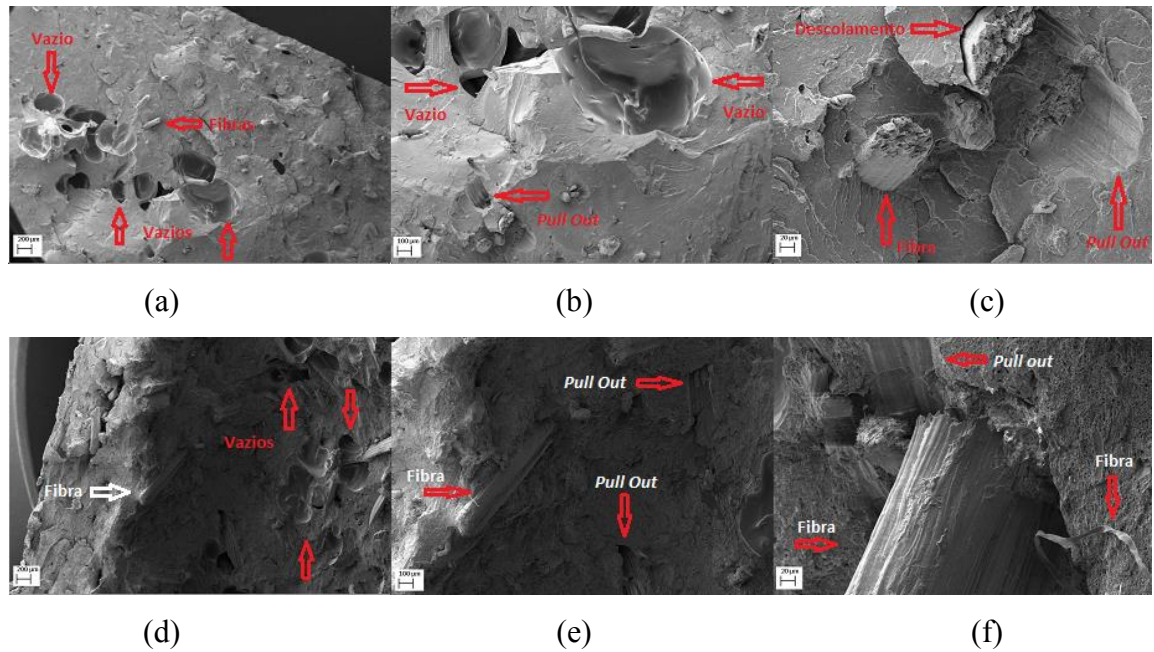


Figura 13-Fractografia dos corpos de prova de flexão do compósito 15% de sisal nas seguintes ampliações: (a) 50x (b) 100x e (c) 500x e do compósito 25 % sisal nas seguintes ampliações: (d) 50x, (e) 100x e (f) 500x.

Observando a Figura 13, correspondente à microscopia dos corpos de prova de tração do C15S e C25S, podem ser vistas, várias fibras bem aderidas à matriz. Nas imagens da Figura 13 (a), (b) e (c) observa-se a matriz impregnada nas fibras e fibras bem aderidas à matriz. Mostrando assim que os corpos de tração do C15S apesar das fibras não terem sido tratadas quimicamente, apresentaram uma interface fibra/matriz melhor que a dos compósitos com 25% de fibras, o que justifica a menor dispersão dos resultados das propriedades mecânicas.

As imagens contidas na Figura 13 (d), (e) e (f) são referentes à microscopia do corpo de prova de tração do compósito 25% sisal, onde é mostrada a superfície de fratura com alguns vazios causados durante o processamento e vazios causados devido ao *pull out*. Analisando os resultados das propriedades mecânicas juntamente com as imagens do C25S, pode-se se dizer que os vazios de processamento e a falta de adesão podem ter colaborado para a diminuição da resistência do material.

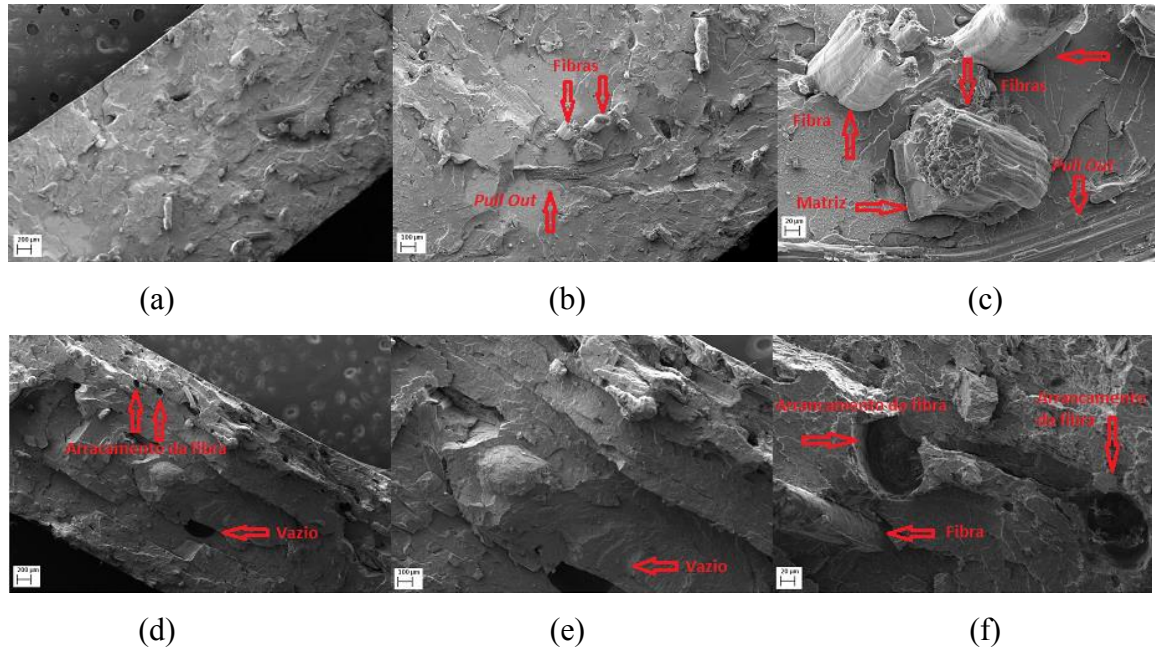


Figura 14- Fractografia dos corpos de prova de tração do compósito 15% de sisal nas seguintes ampliações: (a) 50x (b) 100x e (c) 500x e do compósito 25 % sisal nas seguintes ampliações: (d) 50x, (e) 100x e (f) 500x.

5.4 Termogravimetria (TGA/DTG)

Por meio da análise termogravimétrica foram obtidos os gráficos de TGA e DTG onde foi possível observar as propriedades térmicas dos materiais. Analisando o gráfico da Figura 14, podem ser visualizadas quatro curvas, correspondentes à fibra de sisal, ao Isopor reciclado puro (PSP), e aos compósitos C25S e C15S.

Analisando as curvas de TGA e DTG da fibra de sisal (Figuras 14 e 15), pode ser observado cinco estágios de perda de massa. O primeiro deles é referente a perda de água presente na fibra, e ocorre entre 40 e 130 °C. O segundo e terceiro estágios de perda de massa, melhor observados no gráfico da DTG da Figura 15, entre 132 e 300°C aproximadamente são referentes à degradação da hemicelulose e lignina. O quarto estágio, o pico mais acentuado na curva de DTG, que aparece no intervalo entre 320 e 390 °C, pode ser atribuído à degradação da celulose, principal constituinte da fibra.

A última perda de massa, entre 390 e 450°C está relacionada aos processos de decomposição que envolvem reações simultâneas como quebra das ligações C-C da lignina, liberação de água, CO e CO₂ (Castro, 2010).

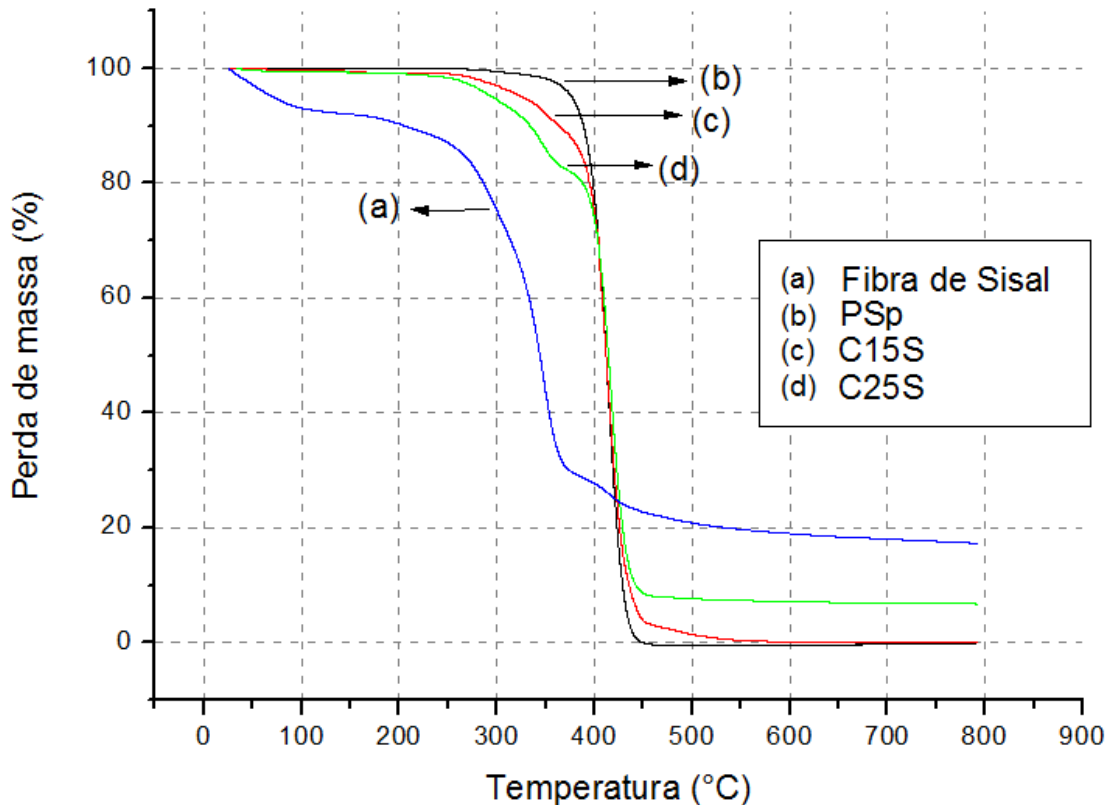


Figura 15-Gráfico de TGA do Isopor Reciclado Puro, do Compósito com 25% Sisal, do Compósito com 15% Sisal e fibra de sisal.

Com a análise da curva de PSp é possível observar que o material é termicamente estável até a temperatura de 270°C, e a partir daí ocorre perda de massa referente à degradação do poliestireno. A perda de massa ocorre em uma única etapa, demonstrando que o PSp é uma material homogêneo e teve sua perda de massa máxima em 420°C.

As curvas relativas aos compósitos apresentaram três estágios de degradação. Os materiais apresentaram uma perda de massa referente à degradação das fibras em dois estágios. Para o C25S no intervalo de 231,7 °C a 371,6 °C, sendo que o primeiro pico indica a degradação da hemicelulose e lignina, e o segundo a degradação da celulose. Para o C15S esses estágios ocorrem entre 265,1 °C e 394,7 °C. O terceiro estágio de perda de massa iniciou-se em 371,6°C para o C25S, e próximo a 394,7°C para o C15S, e refere-se à degradação do poliestireno, onde são observados os picos mais acentuados.

O compósito C15S apresentou perda de massa menor até 370 °C, como pode ser observado nos dados da Tabela 4, quando comparada ao C25S, devido à menor quantidade de fibras no compósito.

As temperaturas de início de degradação foram consideradas de acordo com a norma de termogravimetria ASTM E2550, na qual são descritos métodos de determinação de temperaturas em que os materiais começam a se degradar.

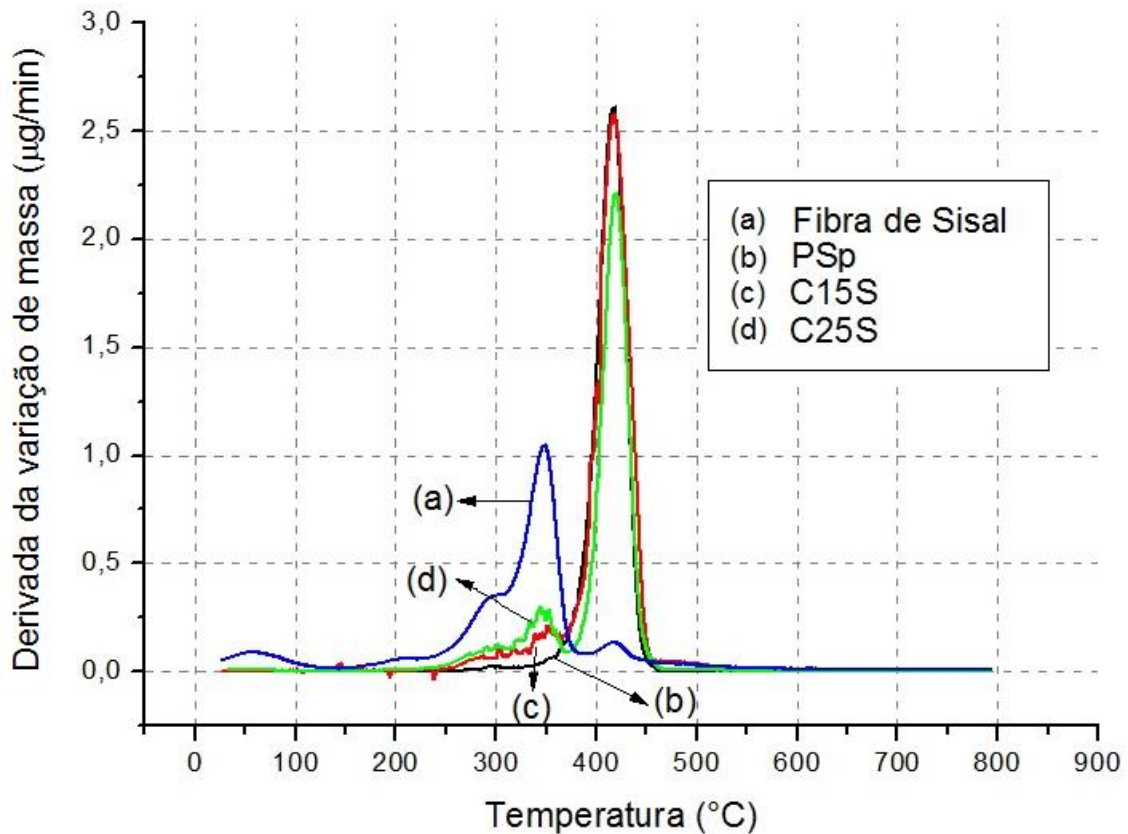


Figura 16-Gráfico de DTG do Isopor Reciclado Puro, do Compósito com 25% Sisal e do Compósito com 15% Sisal.

Joseph (2003) analisou o comportamento térmico e a cristalização de compósito de polipropileno reforçado com fibras de sisal e obteve melhora na estabilidade térmica do compósito em relação aos resultados da resina e fibras separados devido à boa interação entre a fibra e a matriz.

Conforme observado nos resultados deste trabalho, foi possível perceber que a adição das fibras ao polímero reduziu a estabilidade térmica do material, possivelmente pela falta de interação entre a matriz e o reforço, ou ainda pelas fibras não terem passado por nenhum processo de secagem para a redução de umidade presente nas mesmas. Porém foi maior do que a da fibra pura, corroborando com os dados de Joseph (2003).

Manikandan Nair (2001) realizou análise térmica e dinâmica de compósitos de poliestireno reforçados com fibras curtas de sisal. Na curva de TGA do sisal foram observados 3 estágios de decomposição, sendo o primeiro deles na faixa de 60-100 °C, referente à perda de água, o segundo deles a 325 °C referente à degradação de hemicelulose e o último estágio a temperatura de 450 °C, correspondente a maior degradação da fibra, levando a formação de alcatrão. Já para o Poliestireno puro foi encontrada a temperatura de degradação em 288°C, indicando maior estabilidade térmica em relação às fibras.

Tabela 4- Perda de massa e temperaturas de degradação para as amostras estudadas.

Amostra	ΔT (°C)	Tpico (°C)	Tonset (°C)	Perda de Massa (%)	Resíduo a 780°C (%)
Fibra de sisal	40-130	360	130	7,5	17,2
	132- 300				
	310-390				
	390-450				
PSp	267-553	420	280	100	0
C15S	265-394	420	240	9,0	0
	394-480			91	
C25S	231-371	425	230	17,6	6,8
	371-470			75,6	

Os resíduos encontrados ao final do ensaio (780 °C) são mostrados na Tabela 4. A fibra de sisal apresentou a maior porcentagem de resíduos, enquanto que o PSp não apresentou resíduo algum nesta temperatura.

Desta forma era esperado que o C15S apresentasse determinada quantidade de resíduos a 780°C referente aos resíduos da fibra adicionada, porém isso não ocorreu provavelmente devido à forma de retirada de amostra para a realização da análise, que foi manual e pode ter sido retirada de uma região do corpo de prova com maior proporção de matriz polimérica.

5.5 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A caracterização térmica por DSC foi realizada nas amostras de poliestireno reciclado puro e nas amostras dos dois compósitos com as diferentes porcentagens de fibras. A partir deste ensaio, foi possível obter as curvas do segundo aquecimento dispostas na Figura 16.

Por meio do gráfico da curva de DSC da amostra de PSp pode-se observar mudança na linha base, à temperatura de 101,9°C. Esse evento pode ser atribuído às reações de transição vítrea (T_g) do poliestireno e são identificados na curva (a) da Figura 16. As reações de fusão podem ser evidenciadas pelo pico endotérmico que ocorreu a temperatura 132 °C.

A curva referente ao compósito com 15% de sisal indica que a transição vítrea do material ocorreu à temperatura de 101,0°C, próxima à do PSp, e evidenciada pela mudança da linha base, a qual foi destacada pelo círculo azul sobre a curva. Ainda é possível observar as reações de fusão que ocorrem em 162,8°C, onde é observado um pico endotérmico, indicado pela seta na Figura 16.

Na curva obtida para o compósito C25S é possível observar três eventos. O primeiro deles que ocorreu a 98 °C, que pode ser atribuído à transição vítrea do material. A 158 °C podem ser visualizados dois eventos endotérmicos seguidos, referente às reações de fusão do compósito. Os dois picos podem ser explicados pelo polímero possuir diferentes massas

molares, pois foram utilizados polímeros de diferentes fontes, já que foram originários do descarte de embalagens.

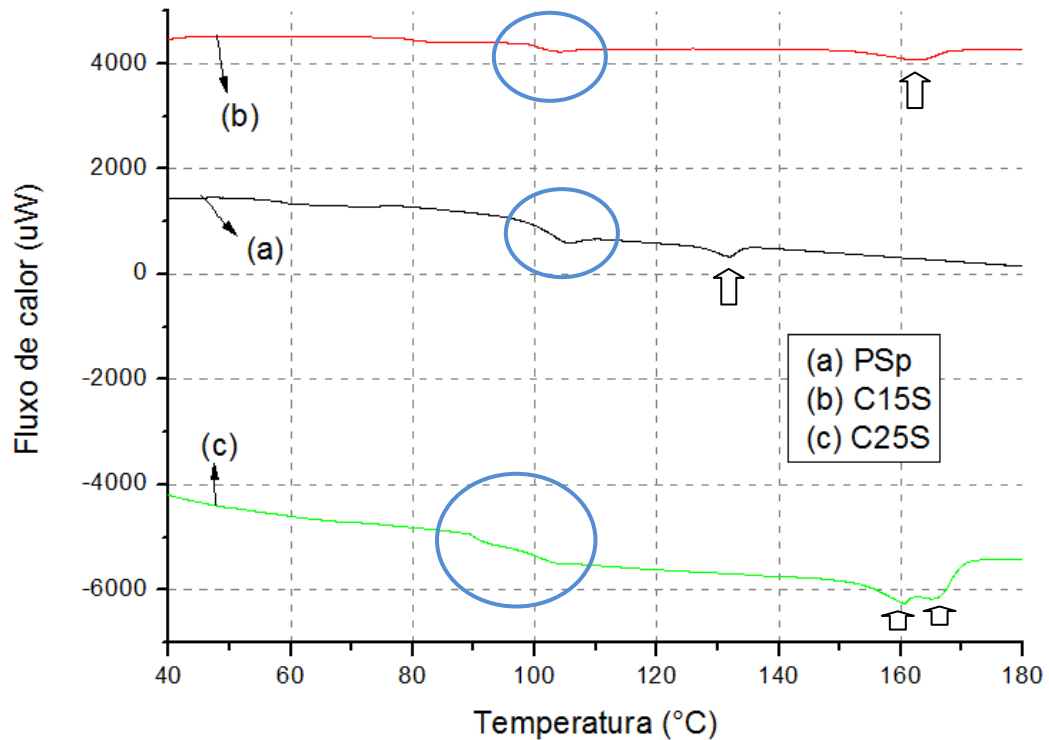


Figura 17- Gráficos de DSC, curvas do 1º aquecimento do Isopor reciclado puro, do compósito 15% sisal e do compósito 25% sisal.

Os valores das temperaturas de transição vítrea e fusão do polímero e dos compósitos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5-Valores de temperaturas dos gráficos de DSC.

Material	Tg (°C)	Tf (°C)
PSp	101,9	132,0
C15S	101,0	162,8
C25S	98,0	158,0

Tg-transição vítrea, Tf-temperatura de fusão.

Comparando os valores encontrados para o polímero e seus compósitos, observa-se que a adição de fibras não alterou significativamente as temperaturas de transição vítrea dos compósitos quando comparado ao PSp.

Por outro lado aumentou a temperatura de fusão foi maior para os compósitos do que para o Psp puro.

5.6 Análise dielétrica

A interação de um determinado material com o campo elétrico pode ser determinada por meio da constante dielétrica, a qual é definida como o quociente entre permissividade elétrica de um meio e a permissividade do vácuo (TOSANO et al., 2008).

Os resultados da análise dielétrica dos compósitos 15% e 25% mostraram que os materiais são isolantes, pois eles não interagem com um campo elétrico, sendo assim eles não apresentam características de um material condutor.

6 CONCLUSÕES

Por meio da avaliação dos resultados obtidos neste trabalho foi possível concluir que:

- O processo de obtenção do compósito foi viável, de forma que foi possível a confecção de um material compósito, apesar das dificuldades no processamento, a partir do poliestireno expandido reciclado reforçado com fibras de sisal para ser utilizado como placa de circuito impresso;
- A adição de fibras de sisal à matriz polimérica reduziu a estabilidade térmica ao mesmo tempo em que aumentou a temperatura de fusão dos compósitos;
- As propriedades mecânicas de tração e flexão dos compósitos foram próximas às encontradas no poliestireno puro. Isso mostrou que as fibras não agiram como reforço para a matriz polimérica, porém diminuíram a quantidade de material sintético utilizada.
- O compósito obtido não apresentou propriedades condutoras, o que significou que seu uso para confecção de placas de circuito impresso é adequado;
- A comparação entre os compósitos apresentados neste trabalho e os utilizados atualmente pela indústria para a confecção de placas de circuito impresso mostrou ser possível a utilização de compósito com fibras naturais para esta aplicação desde que o mesmo seja melhor avaliado quanto ao custo e as outras propriedades específicas desta aplicação.
- O compósito com 15% de fibras apresentou maior reprodutibilidade, de acordo com os desvios padrão encontrados, sendo assim, melhor a sua utilização em relação ao compósito com 25% de fibras. Em relação ao polímero puro, além da maior confiabilidade dos resultados, apresenta a vantagem ambiental, já que utiliza menor quantidade de polímero.

7 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, puderam ser observadas novas oportunidades de pesquisa nesta área.

Uma importante sugestão é inserir uma etapa de tratamento químico das fibras de sisal, com o intuito de melhorar a ancoragem entre fibra e matriz, e conseqüentemente melhorar as propriedades mecânicas do material.

Outra etapa que pode ser estudada é o processamento do compósito, assim como o tamanho da fibra e o volume de fibras adicionadas à matriz.

REFERÊNCIAS

- ABRAPEX. Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. **O EPS na Construção Civil: Características do poliestireno expandido para utilização em edificações**. São Paulo, set. 2000.
- AMIANTI, M.; BOTARO V.R.; **Concreto impregnado com polímero (CIP): uso e aplicação do EPS reciclado para redução da permeabilidade de superfícies de concreto**, Matéria (Rio J.) vol.13 n° 4, Rio de Janeiro, 2008
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Referentes aos materiais compostos de poliestireno expandido e seus ensaios. Local: ABNT, São Paulo.
- ASTM D638. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**.
- ASTM D790 - 03. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**.
- ATEFFA. **Associação dos técnicos de fiscalização federal agropecuária do estado da Bahia**. Disponível em <<http://www.ateffaba.org.br/?p=1213>>. Acessado em 19 de Nov. de 2013.
- BARBIERI, J. C.; VASCONCELOS, I. F. G.; ANDREASSI, T.; VASCONCELOS, F. C.; **Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições**. Revista de Administração de Empresas. Fundação Getúlio Vargas. V.50, n.2, p. 146-154. Jun. 2010.
- BENINI, K. C. C. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS/Fibra da casca do coco verde e bagaço de cana de açúcar**; Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011;
- BERNARDES, A.; WUTH, W. et al, **Recycling of printed circuit boards by melting with oxidising/reducing top blowing process**. In: TMS Annual Meeting, Orlando, EUA, p.363-375, 1997.
- BRAZILIANFIBERS. Disponível em <<http://www.brazilianfibres.com/portal/index.php/pt/produtos/sisal>> Acessado em 20 de Nov. de 2013.
- BUNSELL, A. R.; RENARD, J.; **Fundamentals of fibre reinforced composites materials**. IOP Publishing Ltda, London, 2005.
- CALLISTER, W. D, **Fundamentals of Materials Science and Engineering**, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2001, 1619p.

- CASTRO, D. O. **Biocompósitos a partir de Biopolietileno de alta densidade reforçados por fibras de curauá**. Dissertação (Mestrado em Físico Química) - Instituto de Química de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- CHAGAS, F. H. C.; Berretta-Hurtado, A. L.; Gouvêa, C. A. K.; **Logística Reversa: Destinação dos Resíduos de Poliestireno Expandido (Isopor®) Pós-Consumo de uma Indústria Catarinense**. In: 3rd International Workshop | Advances in Cleaner Production. São Paulo. 18-20 de Maio de 2011.
- CHUNG, D.D.L.; **Composite Materials** Second Edition, Ed. Springer. 2010.
- DORO, M. M.; **Sistemática para implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso**. (Dissertação: mestrado em Metrologia). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.
- GUIMARÃES JUNIOR, M. et al.; **Caracterização físico-química de fibra e polpas de *Bambusa vulgaris Schrad* para utilização em compósitos poliméricos**. Rev. LatinAm. Metal. Mat., 33 (1): 33-4, 2013.
- GOMES, Y. **Vida sustentável – reciclagem do isopor- poliestireno expandido**. Disponível em : <<http://vidasustentavel.perus.com/reciclagem/247>> acessado em : 14 Mar. 2011.
- GROTE, Z. C. V. **Estudo do uso do EPS na construção civil: uma opção para a conservação de energia**. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica). Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 1999.
- GROTE, Z.V.; SILVEIRA, J.L. **Análise Energética e Exergética de um Processo de Reciclagem de Poliestireno Expandido (ISOPOR)**. Estudo de caso. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, n. 3, p. 9-27, 2001.
- GRUPO POLIMEX. **Reciclabilidade y Ecologia**, 1997. Disponível em: <<http://www.polimex.com.mx/new/ecolog.htm>>. Acessado em: 22 de maio de 2013;
- GUTIÉRREZ, M. C. et al., **Biocompósitos de acetato de celulose e fibras curtas de Curauá tratadas com CO2 supercrítico**. Polímeros, vol. 22, n. 3, p. 295-302, 2012.
- ECONOMY GROUP, 2013. Disponível em: < <http://economygroup.wordpress.com/historia/>>. Acessado em: 22 de Nov. de 2013;
- FURLAN, L. G.; DUARTE, U. L.; MAULER, R. S.; **Avaliação das propriedades de compósitos de polipropileno reforçados com casca de aveia**. Quim. Nova, Vol. 35, No. 8, S1, 2012

- IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. 2011. **Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica**. 15p. Disponível em: <<http://www.abratec.com.br>>. Acesso em: 15 abr. 2011.
- JOSEPH, P. V. et al.; **Enviromental effects on the degradation behavior of sisal fibre reinforced polypropylene composites**. Composites science and technology, v 62, p1357-1372, 2002.
- JOSEPH, P. V. et al; **The thermal and crystallisation studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites**. Composites: Part A 34, p. 253–266, 2003.
- KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. United States of America: CRC Press, 1997. 329p.
- LEÃO, R. M. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno**. Dissertação de mestrado em Ciências mecânicas, publicação ENM. Departamento de engenharia mecânica.Universidade de Brasília. Brasília, 2012.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais**. Editora Edgard Blüncher. São Paulo, 2006.
- LOPES, F. M. et al. **Avaliação dos efeitos da acetilação nas propriedades das fibras de caroá**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.1, p.84–89, 2011.
- LUCCA, J. **Plotter de baixo custo para prototipação de placas de circuito impresso**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia elétrica). Universidade tecnológica federal do paraná. Curitiba, 2013.
- MALKAPURAM, R.; KUMAR, V.; NEGI, Y. S.; **Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 28, p 1169-1189, 2009.
- MANFREDI, L. B. et al.; **Thermal Degradation and Fire Resistance of Unsatured Polyester, Modified Acrylic Resins and their Composites with Natural Fibres**. Polymer Degradation and Stability, p. 255-261, 2006.
- MANIKANDAN NAIR, K.C. et al.; **Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres**. Composites Science and Technology 61. p.2519–2529. 2001.
- MARCONCINI, J. M. et al.; **Studies on polypropylene/cellulose microfiber composites**. 6th International Symposium on Natural Polymers and composites, 2007.
- MARINELLI, A. L. et al. - **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, n° 2, p. 92-99, 2008.

- MARINHO, N. P. et al. - **Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu.** Polímeros, vol. 23, n. 2, p. 201-205, 2013.
- MAX.; YU. J.; KENNEDY, J. F. **Studies on the Properties of Natural Fibers- Reinforced Thermoplastic Starch Composites.** Carbohydrate Polymers, p. 19-24, 2005.
- MEHL, E. L.; **Conceitos fundamentais sobre placas de circuito impresso.** Apostila do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: < http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf> Acessado em: 08 de maio de 2013.
- 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.
- MONTEIRO, S.N., **Tenacidade ao Entalhe por Impacto Charpy de Compósitos de Poliéster Reforçados com Fibras de Piaçava.** Revista Matéria, v. 11, n. 3, pp. 204 – 210, 2006.
- MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D.; **Análise Térmica de Materiais.** São Paulo: iEditora, 2002. 302 p.
- MOTHÉ, C.; ARAUJO, C. R. **Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá.** Polímeros, v.14, n.4, p.274-278, 2004.
- OLIVEIRA, M. C. B. R. ; **Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no brasil.** Dissertação de mestrado em Ciências. Universidade Federal do Rio De Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, p.55, 2012.
- PIGATTO, C.; **Polipropileno e blendas de PP/EPDM reforçadas com fibras curtas de sisal.** Dissertação mestrado (Engenharia de minas, metalúrgica e materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.
 - PINTO, A. G. **Plástico.** In: IPT/ CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 1995.
- PIRES, E. N.; **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi.** Dissertação mestrado (Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.
 - SPINACÉ, M. A. S. et al. - **Poliiolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal vs. Curauá.** Polímeros, vol. 21, nº 3, p. 168-174, 2011.
 - RADISPIEL FILHO, H.; **Avaliação de compósitos cimentícios com adição de fibras curtas originadas de placas de circuito impresso.** Dissertação mestrado (Engenharia de Materiais). Universidade federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

- REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C., **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. p.28-29, 2011.
- RODRIGUES, S. C.; PEIXOTO, J. A. A.; XAVIER, L. S.; **Formação de cadeia verde de suprimento a partir da gestão sustentável de resíduos industriais – Um exemplo no setor de reciclagem**. Revista Eletrônica Sistemas & Gestão Volume 8, Número 1, pp. 44-57, 2013.
- SARKIS, C. E. ; **Reciclagem de poliestireno expandido (EPS) para o uso na fabricação de perfilados de poliestireno (PS)**. Dissertação mestrado (Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.
- SCHMIDT, P. N. S., **A qualidade de placas de circuito impresso confeccionadas a partir de poliestireno reciclado**. Dissertação mestrado (engenharia mecânica) – Faculdade de engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2012.
- SILVA, F. S. M., **Responsabilidade social e desenvolvimento sustentável da cultura do sisal (*Agave sisalana*) no semi-árido baiano**. Dissertação mestrado. Fundação Visconde de Cairu. Salvador, Bahia, 2008.
- SOUZA, J. P. B ; **Análise térmica de polímero dgeba (diglicidil éter de bisfenol a) e sua relação na resistência de juntas coladas**. Dissertação mestrado. Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal Fluminense. Niterói-RJ. 2012.
- SOUZA, S. F. ; **Produção de compósitos reforçados com fibras naturais: macro e nano escalas**. Bolsa Mestrado. Universidade Estadual Paulista- Campus Botucatu. 2010.
- TESSARI, J.; **Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento de seus Resíduos pela Construção Civil**. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- TOSATO, M. G.; AIRTON, L. D.; MARTIN, A. **Análise da constante dielétrica através do modelo harmônico**, In: XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica/VIII Encontro Latino Americano de Pós-graduação, São José dos Campos – SP, 2008.
- WALLEMBERGER, F.T.; WESTON, N.E; **Natural Fibers, Plastics and Composites**, Ed. KAP, 2010)
- WILSON, P. Printed Circuit. IN:__. **The circuit designer’s companion**. 3rd ed. [S.l.]: Newnes, 2012. p.45-84.