

PAULA NOVAIS DA SILVA SCHMIDT

**A QUALIDADE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
CONFECCIONADAS A PARTIR DE POLIESTIRENO RECICLADO**

Guaratinguetá

2012

PAULA NOVAIS DA SILVA SCHMIDT

A QUALIDADE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
CONFECCIONADAS A PARTIR DE POLIESTIRENO RECICLADO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Odila Hilário Cioffi
Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá
2012

S353q	Schmidt, Paula Novais da Silva A qualidade de placas de circuito impresso confeccionadas a partir de poliestireno reciclado / Paula Novais da Silva Schmidt. – Guaratinguetá: [s.n], 2012 79 f.: il. Bibliografia: f. 70 - 79 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012 Orientador: Profa. Dra. Maria Odila Hilário Cioffi Co-Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira 1. Poliestireno - Reaproveitamento 2. Circuitos impressos I .Título. CDU 628.4
-------	---

PAULA NOVAIS DA SILVA SCHMIDT

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

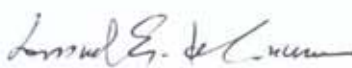
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr.ª. MARIA ODILA HILARIO CIOFFI
Orientadora / Unesp-Feg


Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA
Unesp-Feg


Prof. Dr.ª. TESSIE GOUVEA DA CRUZ
UFRRJ

Agosto de 2012

DADOS CURRICULARES

PAULA NOVAIS DA SILVA SCHMIDT

NASCIMENTO	27.10.1984 – GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	Regis Fernando Schmidt Gracia Luiza Novais da Silva
2004/2009	Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, na Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2010/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

...à minha mãe Gracia, que sempre esteve ao meu lado,
acreditando nos meus sonhos e vibrando com minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e por ter colocado nela pessoas especiais que estiveram ao meu lado nessa caminhada;

à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a *Maria Odila Hilário Cioffi*, pela confiança, incentivo, amizade e todo apoio no desenvolvimento dessa dissertação;

ao meu co-orientador Prof. Dr. *José Luz Silveira*, pela oportunidade de trabalhar nesta pesquisa;

aos meus pais *Regis Fernando Schmidt* e *Gracia Luiza Novais da Silva*, pelo amor, carinho, dedicação, amizade, incentivo, enfim, por existirem na minha vida;

à minha avó materna *Luiza Novais da Silva* que nunca mediu esforços para me ajudar;

à minha tia Ana Luiza Novais da Silva e Sousa que com sua espontaneidade transforma simples fatos em verdadeiros acontecimentos;

aos meus sobrinhos *Henrique, Augusto e Fernando* que são minha fonte de alegria;

à minha família, em especial à minha irmã *Renata Schmidt Carvalho*, por estarem sempre ao meu lado dividindo os momentos felizes e tristes;

aos meus amigos, em especial à *Renata Santos Mutton*, pela amizade e incentivo,

aos amigos do Grupo de Pesquisa Fadiga e Materiais Aeronáuticos, em especial às alunas *Tamires Polydoro Saldanha Santos* e *Kamila Maria de Sousa Silva*, pelo constante apoio;

ao meu chefe Eng^o *Dirceu Paulo de Oliveira* pelo apoio e incentivo;

aos técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia – FEG/UNESP – em especial ao Manoel Francisco dos Santos Filho e Domingos Hasmann Neto, pelo apoio, disponibilidade e dedicação nas diversas etapas dessa dissertação;

às funcionárias da Biblioteca do *Campus* de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“Se, a princípio, a ideia não é absurda,
então não há esperança para ela.”

Albert Einstein

SCHMIDT, P. N. S. A Qualidade de placas de circuito impresso confeccionadas a partir de poliestireno reciclado. 2012. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

No cenário sócio-ambiental atual percebe-se um aumento da preocupação com o meio ambiente quanto à utilização dos recursos naturais e, ainda, na importância da reutilização dos produtos e subprodutos derivados desses recursos. A reciclagem reintroduz no sistema produtivo parte da matéria ou da energia que seria descartada, o que diminui o volume de lixo despejado. O poliestireno expandido, que hoje em dia é descartado por fábricas, construção civil, setores comerciais e residenciais, é depositado em aterros sanitários ou lixões sem nenhum controle, como consequência, este material tem grande contribuição na poluição ambiental. Na presente dissertação foram propostas soluções de aproveitamento destes materiais, adequando-os a novas aplicações a partir de sua reciclagem. O poliestireno expandido foi reciclado por dissolução, moldagem por compressão e injeção para a produção de placas de circuito impresso, o material obtido em cada processo 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. Com a análise dos resultados obtidos foi possível avaliar a viabilidade da reciclagem de poliestireno expandido para aplicação em placas de circuito impresso, visto a reprodutibilidade e qualidade do material obtido. Dentre os materiais obtidos aquele homogeneizado termocineticamente e injetado foi o que apresentou as propriedades mas adequadas à aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem. Poliestireno expandido. Placas de circuito impresso.

SCHMIDT, P. N. S. **The Quality of printed circuit boards made from recycled polystyrene** 2012. 79f. Thesis (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

In the current socio-environmental scenario an increase in concern to environment and the use of natural resources beyond the importance of reuse of products and by-products derived from these resources are observed. Recycling is a way of reintroducing a part of discharged matter or energy in the productive system, reducing the amount of dumped garbage. Polystyrene materials, which are discarded by industries, construction, commercial and residential sectors, are deposited in landfills or dumps without any control causing, as a consequence, an increase in the environmental pollution. This work proposes some solutions for the use of recycled polystyrene, make it suitable for new applying. Then, expanded polystyrene was recycled by dissolution, compression molding and injection process in order to produce printed circuit board. Obtained materials were characterized by mechanical, electrical and physical-chemical characterization on flexure, thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), scanning electron microscopy (SEM), electrical conductivity measurements at 4 points and analysis of texture. With the analysis of the results was possible to evaluate the availability of recycling of expanded polystyrene for application to printed circuit boards since the reproducibility and quality of the obtained material. The thermokinetically homogenized and injected material presented the adequate properties to the application.

KEYWORDS: Recycling. Expanded polystyrene. Integrated circuit boards.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – 4 Rs da reciclagem	21
Figura 2 – Ciclo da reciclagem	25
Figura 3 – Ciclo de vida	27
Figura 4 – Obtenção do poliestireno a partir do petróleo	29
Figura 5 – Processo de fabricação da matéria prima de poliestireno	29
Figura 6 – Processos de fabricação dos materiais a base de poliestireno expandido (EPS).....	30
Figura 7 – Estrutura do poliestireno expandido	31
Figura 8 – Processos de reciclagem de resíduos de materiais a base de poliestireno expandido	32
Figura 9 – Índice de reciclagem do EPS	33
Figura 10 – Foto de um circuito eletrônico confeccionado sobre uma placa com as ligações entre os componentes impressas sobre a mesma.....	34
Figura 11 – Fluxograma esquemático da metodologia	36
Figura 12 – Materiais utilizados na dissolução do EPS	37
Figura 13 – Capela e estufa a vácuo.....	37
Figura 14 – Triturador	39
Figura 15 – Estufa a vácuo	40
Figura 16 – Esquema do processo de extrusão.....	40
Figura 17 – Detalhe da cápsula de mistura.....	41
Figura 18 – Prensa a quente.....	42
Figura 19 – Esquema do processo de injeção.....	43
Figura 20 – Esquema montado para teste de flexão	44
Figura 21 – Aparelho de ultrassom C-scan por imersão em água.....	45
Figura 22 – Molde de injeção do substrato	47
Figura 23 – Folha de Cobre	47
Figura 24 – Resultados da dissolução do EPS com acetona	48
Figura 25 – Resultados da dissolução do EPS com d-limoneno	49
Figura 26 – Filamento de poliestireno.....	50

Figura 27 – Grânulos	50
Figura 28 – EPS prensado	51
Figura 29 – Corpos de prova de flexão processados	52
Figura 30 – Gráfico de TGA do EPS.....	55
Figura 31 – Gráfico do TGA do EPS processado e da fenolite.....	56
Figura 32 – Gráfico do DSC.....	57
Figura 33 – Gráfico do DSC do EPS processado e da fenolite	58
Figura 34 – Escala de atenuação para mapas de C-SCAN.....	59
Figura 35 – Ultrassom	60
Figura 36 – Microscopia das amostras do processamento (1).....	62
Figura 37 – Microscopia das amostras do processamento (2).....	63
Figura 38 – Microscopia das amostras do processamento (3).....	64
Figura 39 – Microscopia das amostras da fenolite	65
Figura 40 – Histograma	66
Figura 41 – Mapa de elevação.....	67
Figura 42 – Segmentação	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as características físicas de fenolite e fibra de vidro.....	34
Tabela 2 – Valores de resistência à flexão da fenolite.....	53
Tabela 3 – Valores de resistência à flexão dos materiais obtidos.....	53
Tabela 4 – Dados obtidos das curvas termogravimétricas dos materiais.....	56
Tabela 5 – Dados obtidos das curvas DSC dos materiais.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	- American Society for Testing and Materials
CFC	- Clorofluorcarbonetos
CRT	- Tubos de Raios Catódicos
DSC	- Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	- Derivada Termogravimétrica
EPS	- Poliestireno Expandido
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
PS	- Poliestireno
TGA	- Termogravimetria
Tg	- Temperatura de transição vítrea
Tm	- Temperatura de escoamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Questão ambiental	17
2.2	Gestão de resíduos sólidos.....	17
2.3	Lixo.....	22
2.3.1	Lixo plástico	23
2.4	Reciclagem.....	24
2.4.1	Reciclagem no Brasil	26
2.4.2	Reciclagem de plásticos	26
2.5	Poliestireno expandido (EPS)	28
2.5.1	Reciclagem do EPS	31
2.6	Placas de circuito impresso	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Dissolução do EPS	46
3.2	Reciclagem mecânica.....	37
3.2.1	Trituração do EPS	39
3.2.2	Aglomeração.....	39
3.2.3	Homogeneização	40
3.2.3.1	Extrusora	40
3.2.3.2	Homogeneizador termocinético.....	41
3.2.4	Processamento.....	42
3.2.4.1	Prensagem	42
3.2.4.2	Injeção.....	42
3.2.5	Caracterização	43
3.2.5.1	Ensaio de flexão	43
3.2.5.2	Termogravimetria (TG/DTG)	44
3.2.5.3	Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	44
3.2.5.4	Inspeção por ultrassom	45
3.2.5.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	44

3.2.5.6	Medida de condutividade elétrica em 4 pontos.....	46
3.2.5.7	Análise da textura	46
3.3	Processamento da placa de EPS reciclado	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS	70
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	74

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos plásticos constituem um dos maiores problemas ambientais devido a sua degradação dificultada pela baixa reatividade química. Em virtude disso, várias pesquisas sobre reciclagem de polímeros vêm surgindo.

O poliestireno expandido, conhecido também como isopor, é fabricado há muito tempo e possui características como baixo custo, baixa densidade, baixa absorção de umidade e resistência química.

Devido a suas propriedades físico-químicas, o isopor pode ser encontrado em diversos lugares, nas embalagens de eletrodomésticos, bonecos de pelúcia, em câmaras frigoríficas, na construção civil e em uma série de outros produtos. Porém, sua composição tem um grande impacto ambiental associado principalmente à sua baixa densidade o que facilita a dispersão, gerando portanto um enorme problema ao meio ambiente.

Atualmente os resíduos a base de poliestireno expandido são depositados em aterros sanitários, que devido ao grande volume ocupado e a facilidade de se espalharem por ação eólica, causam danos ao meio ambiente. O isopor sozinho não polui nem contamina a terra, mas como leva centenas de anos para se decompor, acaba ocupando muito espaço, diminuindo a área útil dos lixões.

E em razão do seu pequeno valor comercial, os catadores de lixo reciclável desprezam o isopor que encontram pelas ruas, e os caminhões da coleta de lixo também já não o coletam mais. Sendo assim, empresas e a população erram ao queimarem o material como forma de descarte rápido e conseqüentemente agrava muito o problema do aquecimento global, causador das constantes alterações climáticas, bem como aumenta a poluição do ar.

A reciclagem do poliestireno expandido evita o seu mau uso e, considerando que este material é obtido a partir do petróleo, que é um recurso mineral natural esgotável, sua reciclagem implica em uma melhor utilização do mesmo. Outra vantagem da reciclagem é que várias etapas iniciais de fabricação realizadas quando se parte da matéria-prima virgem são eliminadas, o que leva a diminuição de 78,8% do gasto com energia. Conseqüentemente a emissão de

poluentes associada ao processo de obtenção de poliestireno expandido é também diminuída, pois permite a redução da demanda de insumos (eletricidade, combustível, etc.).

Essa dissertação tem como objetivo a reciclagem do poliestireno expandido para o aproveitamento do material na produção de placas de circuitos impressos, essenciais à indústria eletrônica.

As placas de circuito impresso são largamente utilizadas na indústria eletrônica, por ser o meio mais comum e prático para montagens definitivas. Circuitos impressos são pistas de metal condutor padrão, geralmente de cobre, ligados a um substrato (base de material isolante) para apoio. As pistas de metal servem como meio de ligação para os componentes elétricos que são montados no lado oposto da placa. Sua confecção melhora a distribuição dos componentes em um espaço reduzido, por substituir os fios nas ligações dos componentes, possibilitando uma melhor fixação e disposição, diminuindo o tamanho dos equipamentos e melhorando a sua estética.

Visando diminuir o custo das placas de circuito impresso usuais de forma sustentável, surgiu a ideia de utilizar material reciclado na fabricação do substrato. Desta forma, estudaram-se materiais que possuem características adequadas para a aplicação e que não possuem um pós-uso, de forma a promover sua reutilização e minimizar os problemas ambientais causados. Devido a características, como o isolamento elétrico, o poliestireno expandido foi utilizado nesta dissertação, a fim de mostrar a qualidade deste material reciclado na aplicação desejada.

Assim, neste trabalho o poliestireno expandido, provenientes de proteção de eletrodomésticos, foi reciclado utilizando três diferentes processamentos. Os materiais obtidos foram caracterizados em diversas direções e os resultados foram comparados de forma a individualizar aquele com propriedades mais adequadas para aplicação como substrato de placa de circuito impresso, tendo sido, portanto, indicado o poliestireno termocineticamente homogeneizado e injetado como o mais adequado a tal aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Questão ambiental

A questão ambiental visa estabelecer uma relação de harmonia e não de domínio da natureza, sendo de fundamental importância os princípios de sustentabilidade, os quais deixam claro que não se devem retirar recursos da natureza além de sua capacidade de reposição, visto que se trata de fonte esgotável de recursos materiais e energéticos, além disso não devem ser adicionados na natureza resíduos em quantidade acima de sua capacidade de absorção (ZANIN; MANCINI, 2004, RAJENDRAN et al., 2012).

O desenvolvimento sustentável visa beneficiar não apenas o presente, mas também as gerações futuras a partir de um desenvolvimento econômico que emprega os recursos naturais e o meio ambiente (JARDIM, 1995).

Desenvolvimento tem sido convencionalmente visto como o crescimento econômico e ao aumento do nível de vida material dos seres humanos. Ética ambiental tem-se centrado sobre o mundo natural como fonte de valor e nas nossas responsabilidades para com as gerações futuras (DOWER, 2012).

A consciência ecológica vem aumentando visto que o crescimento acelerado das cidades e as mudanças de consumo da população geram lixo diferentes com respeito à quantidade, qualidade e composição. A reutilização de materiais surgiu com o incremento da indústria gráfica, onde os papéis de segunda mão passavam por processos industriais sucessivos que os tornavam perfeitamente reutilizáveis, desde então surgem métodos de reciclagem para os diferentes tipos de resíduos produzidos pela população (GRIPPI, 2001).

2.2 Gestão de resíduos sólidos

Os resíduos sólidos são partes geradas após a produção, utilização ou transformação de bens de consumo, originários de residências, escolas, indústrias e construção civil. Muitos destes resíduos sólidos são compostos de materiais

recicláveis e podem retornar à cadeia de produção, gerando renda para trabalhadores e lucro para empresas (GONÇALVES, 1997).

Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com a origem, tipo de resíduo, composição química e periculosidade, conforme descrito abaixo (JARDIM, 1995):

a) De acordo com a ORIGEM:

- **Resíduo Hospitalar** ou de **Serviços de Saúde**: qualquer resto proveniente de hospitais e serviços de saúde como pronto-socorro, enfermarias, laboratórios de análises clínicas, farmácias, etc.. Geralmente é constituído de seringas, agulhas, curativos e outros materiais que podem apresentar algum tipo de contaminação por agentes patogênicos (causadores de doenças);

- **Resíduo Domiciliar**: são aqueles gerados nas residências e sua composição é bastante variável sendo influenciada por fatores como localização geográfica e renda familiar. Porém, nesse tipo de resíduo podem ser encontrados restos de alimentos, resíduos sanitários (papel higiênico, por exemplo), papel, plástico, vidro, etc.

- **Resíduo Agrícola**: são aqueles gerados pelas atividades agropecuárias (cultivos, criações de animais, beneficiamento, processamento, etc.). Podem ser compostos por embalagens de defensivos agrícolas, restos orgânicos (palhas, cascas, estrume, animais mortos, bagaços, etc.), produtos veterinários e etc..

- **Resíduo Comercial**: são aqueles produzidos pelo comércio em geral. A maior parte é constituída por materiais recicláveis como papel e papelão, principalmente de embalagens, e plásticos, mas também podem conter restos sanitários e orgânicos.

- **Resíduo Industrial**: são originados dos processos industriais. Possuem composição bastante diversificada e uma grande quantidade desses rejeitos é considerada perigosa. Podem ser constituídos por escórias (impurezas resultantes da fundição do ferro), cinzas, lodos, óleos, plásticos, papel, borrachas, etc.

- **Entulho**: resultante da construção civil e reformas. Quase 100% destes resíduos podem ser reaproveitados embora isso não ocorra na maioria das situações por falta de informação. Os entulhos são compostos por: restos de

demolição (madeiras, tijolos, cimento, rebocos, metais, etc.), de obras e solos de escavações diversas.

- **Resíduo Público ou de Varrição:** é aquele recolhido nas vias públicas, galerias, áreas de realização de feiras e outros locais públicos. Sua composição é muito variada dependendo do local e da situação onde é recolhido, mas podem conter: folhas de árvores, galhos e grama, animais mortos, papel, plástico, restos de alimentos, etc..

- **Resíduos Sólidos Urbanos:** é o nome usado para denominar o conjunto de todos os tipos de resíduos gerados nas cidades e coletados pelo serviço municipal (domiciliar, de varrição, comercial e, em alguns casos, entulhos).

- **Resíduos de Portos, Aeroportos e Terminais Rodoviários e Ferroviários:** o lixo coletado nesses locais é tratado como “resíduo séptico”, pois pode conter agentes causadores de doenças trazidas de outros países. Os resíduos que não apresentam esse risco de contaminação podem ser tratados como lixo domiciliar.

- **Resíduo de Mineração:** podem ser constituídos de solo removido, metais pesados, restos e lascas de pedras, etc.

b) De acordo com o TIPO:

- **Resíduo Reciclável:** papel, plástico, metal, alumínio, vidro, etc.

- **Resíduo Não Reciclável ou Rejeito:** resíduos que não são recicláveis, ou resíduos recicláveis contaminados;

c) De acordo com a COMPOSIÇÃO QUÍMICA:

- **Orgânicos:** restos de alimentos, folhas, grama, animais mortos, esterco, papel, madeira, etc.. Muita gente não sabe, mas alguns compostos orgânicos podem ser tóxicos. São os chamados “Poluentes Orgânicos Persistentes” e “Poluentes Orgânicos Não Persistentes”.

- **Poluentes Orgânicos Persistentes:** hidrocarbonetos de elevado peso molecular, clorados e aromáticos, alguns pesticidas. Estes compostos orgânicos são tão perigosos que foi criada uma norma internacional para seu controle denominada “Convenção de Estocolmo”.

- **Poluentes Orgânicos Não Persistentes:** óleos e óleos usados, solventes de baixo peso molecular, alguns pesticidas biodegradáveis e a maioria dos detergentes.

- Inorgânicos: vidros, plásticos, borrachas, etc.

d) De acordo com a PERICULOSIDADE:

Essa classificação foi definida pela ABNT na norma NBR10004 (2004) da seguinte forma:

- **Resíduos Perigosos** (Classe I): são aqueles que por suas características podem apresentar riscos para a sociedade ou para o meio ambiente. São considerados perigosos também os que apresentem uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade. Na norma estão definidos os critérios que devem ser observados em ensaios de laboratório para a determinação destes itens. Os resíduos que recebem esta classificação requerem cuidados especiais de destinação.

- **Resíduos Não Perigosos** (Classe II): não apresentam nenhuma das características acima, podem ainda ser classificados em dois subtipos:

Classe II A – não inertes: são aqueles que não se enquadram no item anterior, Classe I, nem no próximo item, Classe II B. Geralmente apresentam alguma dessas características: biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

Classe II B – inertes: quando submetidos ao contato com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, com exceção da cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da norma NBR10004(2004).

Para JARDIM (1995), gerenciar o lixo é adotar um conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento, com base em critérios sanitários, ambientais e econômicos para coletar, tratar e dispor o resíduo sólido municipal urbano. A execução de ações planejadas, de forma racional e integrada, leva ao gerenciamento adequado do lixo, assegurando saúde, bem-estar

e economia de recursos públicos, além de ir ao encontro de um desejo maior que é a melhoria da qualidade de vida das gerações atuais e futuras.

A gestão de resíduos compreende o conjunto das decisões estratégicas e das ações voltadas à busca de soluções para resíduos sólidos. Para a obtenção de uma tecnologia limpa é preciso que o consumo seja sustentável, o que viabiliza a implantação dos 4Rs: Reduzir, Reutilizar, Reciclar e Recuperar (MANSOR et al., 2010; ROHR; MARTIN, 2012).

- **REDUZIR:** A redução na fonte é definida como qualquer mudança no projeto, fabricação, compra ou uso de materiais/produto, inclusive embalagens, de modo a reduzir a sua quantidade ou periculosidade, antes de se tornarem resíduos sólidos, por isso é também conhecido como “prevenção de resíduos”.

- **REUTILIZAR:** A reutilização torna desnecessário qualquer tratamento que altere as características físicas ou químicas do resíduo, o qual é empregado diretamente com a mesma finalidade para a qual foi concebido.

- **RECICLAR:** A reciclagem consiste em transformar os resíduos, alterando suas características físico-químicas, em novos produtos com a mesma finalidade ou com a finalidade distinta da original.

- **RECUPERAR:** A recuperação de energia é necessária visto que a disposição final em aterros se torna problemática pela carência de espaço físico. Hoje, a recuperação de energia é considerada como passível de viabilidade, contudo esta tecnologia é dispendiosa para o Brasil, devido a esta ser importada.



Figura 1 - 4Rs da reciclagem

2.3 LIXO

Para Teixeira e Bidone (1999), o lixo é definido de acordo com a conveniência e preferência de cada um. Dentre as diferentes acepções para conceituar o termo “Lixo” será considerada a pertinente ao tema meio ambiente que diz:

Lixo constitui um conjunto de elementos materiais e/ou orgânicos, sem utilidade direta, resultante da atividade humana ou da natureza, que deve ser coletado, tratado, depositado e controlado a fim de preservar a saúde e o bem-estar da sociedade (FERNANDES, 2001, p.3).

Atualmente, o volume de resíduos gerados tem aumentado consideravelmente devido ao crescimento populacional, à urbanização e à introdução da cultura de produtos descartáveis, que o torna um dos maiores problemas ambientais do mundo, devido a uma lógica de vida baseada na produção e no consumo exagerado (PIVA; WIEBECK, 2004).

O lixo é um indicador de crescimento do país, de forma que a população consome mais produtos de diferentes materiais, descartando-os em latas, sem ter a noção de que neste momento o problema está apenas começando. O lixo indevidamente administrado provoca mau cheiro, favorece a proliferação de animais nocivos e transmissores de doenças (ratos, formigas, moscas e mosquitos), polui, pelo chorume, o solo e o lençol d'água subterrâneo e também o ar, uma vez que é prática comum a queima do lixo em ruas, lotes baldios e lixões (BLECK; WETTBERG, 2012). Calcula-se que 30% do lixo brasileiro fiquem espalhados pelas ruas nas grandes cidades, o qual causa enchentes, obstrui bueiros e diminui a vazão de água (GONÇALVES, 1997).

Deve-se levar em conta a durabilidade dos materiais considerando o impacto ambiental envolvido desde a primeira etapa de obtenção da matéria-prima, passando pela fabricação, utilização, alternativa de reuso, reciclagem e alternativa de disposição final do produto quando o mesmo não se presta mais a fim algum (BIDONE, 1999).

2.3.1 Lixo plástico

A problemática do lixo plástico prende-se ao fato destes resíduos possuírem grande volume em relação ao seu peso e dificuldade de compactação, ocupando assim muito espaço quando refugado. Além de possuírem baixa biodegradabilidade, os plásticos contêm materiais que causam problemas na queima em instalações de incineração de lixo. Os resíduos plásticos, quando sujos e misturados, são dificilmente recicláveis, mas levando em consideração seu valor estes resíduos deveriam ser reduzidos e melhor reaproveitados (MICHAELI et al., 1995).

Os lixos plásticos que se espalham nas cidades, parques e praias degradam as diferentes regiões do globo. Estes subprodutos da indústria petrolífera são os ícones de uma economia industrial construída na super-exploração do petróleo e outros combustíveis fósseis que transformam o planeta literalmente em um mundo do lixo terminal (JABBOUR et al., 2012).

Apesar de ser permitida a reciclagem de diversos tipos de plásticos, atualmente se recicla somente 7%. O restante é abandonado em aterro ou incinerado. A maioria dos plásticos não são biodegradáveis o que significa que eles levarão um longo tempo para se decompor naturalmente (PIVA; WIEBECK, 2004).

A fabricação de plásticos exige uma boa quantidade de água, produzindo resíduos e a emissão de gases estufa. Envolve ainda a utilização de substâncias químicas perigosas que geram substâncias tóxicas durante a fabricação. Enterrando resíduos plásticos nos aterros ou queimando em incineradores cria ainda mais danos para a saúde e o ambiente (PATEL et al., 2000).

A melhor maneira de cortar o lixo plástico é reduzir seu uso, eliminando as embalagens desnecessárias e a reutilização de itens tais como sacolas plásticas, brinquedos, frascos de cosméticos, etc.. O melhor uso a seguir é reciclar (JABBOUR et al., 2012).

2.4 Reciclagem

Reciclar significa repetir o ciclo, ou seja, iniciar novamente um ciclo.

A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA/USA), citada por Piva e Wiebeck (2004, p.57), define reciclagem como “[...] a coleta, processamento, comercialização e uso dos materiais considerados lixo”. Os mesmo autores afirmam que a definição encontrada em dicionários aponta a reciclagem como “[...] o processo pelo qual passa um mesmo material já utilizado para fazer o mesmo produto ou um produto equivalente”.

Leite (2003, p.7), por sua vez, define reciclagem do ponto de vista da logística reversa para o desenvolvimento de novos produtos. Sob essa perspectiva, o autor afirma que

Reciclagem é o canal reverso de revalorização, em que os materiais constituintes dos produtos descartados são extraídos industrialmente, transformando-se em matérias-primas secundárias ou reciclagem que serão reincorporadas à fabricação de novos produtos.

A reciclagem tem se tornado uma das atividades mais importantes com relação à proteção ambiental e atribui valores econômicos e desenvolvimento tecnológico, devido ao aumento da produção e do consumo de produtos industrializados (JARDIM, 1995).

O ciclo da reciclagem esquematizado na Figura 2 não permite que o lixo fique sem utilização, reinserindo-o na produção, através da preparação do material, de forma a aproveitar todos os materiais (MICHAELI et al., 1995).

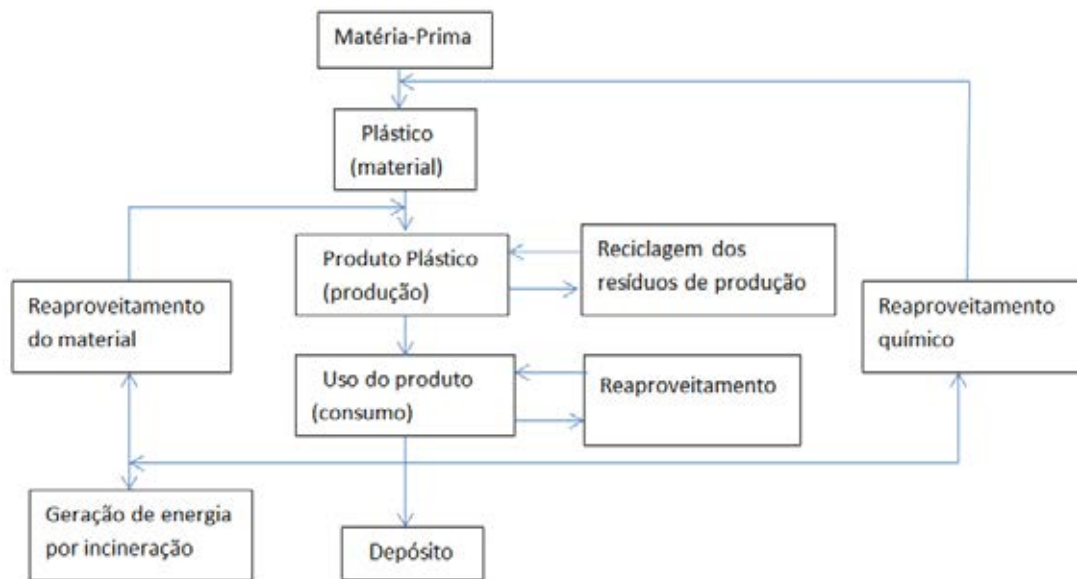


Figura 2 - Ciclo da reciclagem (MICHAELI et al., 1995).

A necessidade e a importância da reciclagem do lixo advêm de um conjunto de fatores que envolvem os benefícios e dificuldades desta atividade (CALDERONI, 2003).

➤ BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM

- Economia de matéria prima, de forma a evitar a exaustão e os custos crescentes da obtenção desta, assim reduzindo o consumo de recursos naturais não-renováveis;
- Economia de energia, reduzindo o seu uso durante o processo de produção;
- Redução de emissão de poluentes;
- Redução da quantidade de lixo a ser disposto e consequentemente a necessidade de área para aterro, o que diminui a poluição e os prejuízos à saúde pública;
- Geração de renda e emprego;
- Redução no custo de produção.

➤ DIFICULDADES DA RECICLAGEM

- Falta de organização e adequação do sistema de coleta;
- Mistura de diferentes materiais no mesmo produto, diminuindo a reciclabilidade do material;
- A mistura dos resíduos recicláveis com orgânicos gera dificuldades e aumento dos custos da reciclagem;
- Falta de mercado para absorver o material reciclado.

2.4.1 Reciclagem no Brasil

O lixo brasileiro não exige muitos cuidados com o tratamento visto que são praticamente isentos de substâncias tóxicas e industriais, ao contrario de países desenvolvidos como França, Inglaterra e Estados Unidos que devido à existência de parques industriais desenvolvidos possui grandes problemas em relação ao lixo produzido (FERNANDES, 2001).

A reciclagem do plástico é realizada sob sérias restrições no Brasil, sendo os principais a falta de incentivos fiscais e de separação seletiva de lixo (PACHECO; RONCHETTI; MASANET, 2011).

A capacidade de reciclagem de plásticos das empresas de reciclagem no Brasil aumenta com o tempo, mas ainda corresponde a uma pequena parcela do total de resíduo sólido plástico gerado no país (PACHECO; RONCHETTI; MASANET, 2011).

2.4.2 Reciclagem de plásticos

Projetos de educação ambiental, que visam a coleta seletiva, são importantes na reciclagem dos resíduos plásticos visto que estes devem ser convenientemente separados para que não comprometa as propriedades finais do produto reciclado (LA MARCA et al., 2012).

O ciclo de vida esquematizado na Figura 3 de cada material deve ser analisado desde a matéria-prima até a possibilidade de sua reutilização, reciclagem ou forma de descarte, a fim de determinar o impacto global de um produto ou serviço sobre o meio ambiente. A reciclagem e reutilização asseguram um maior tempo no ciclo de vida dos materiais plásticos, o que reduz a geração de resíduos e preserva os recursos naturais (PIVA; WIEBECK, 2004; ZANIN; MANCINI, 2004).

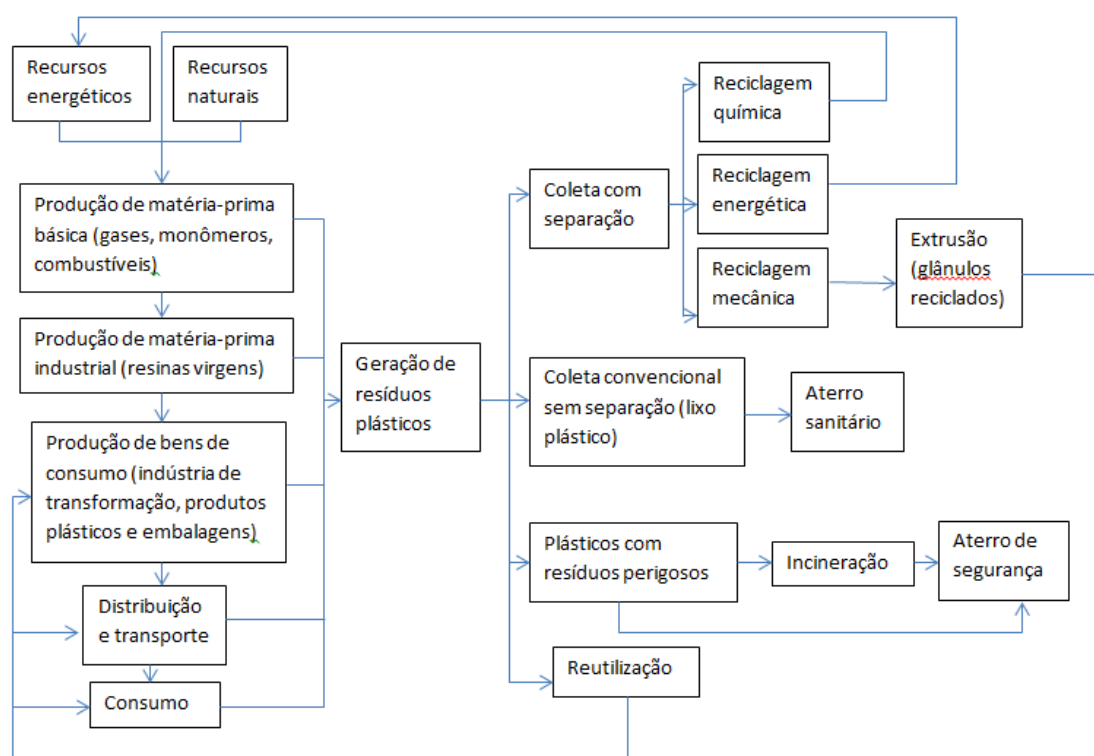


Figura 3 - Ciclo de vida (ZANIN; MANCINI, 2004).

A decomposição dos plásticos descartados como resíduo sólido doméstico leva muito tempo, o que estimula o investimento em tecnologias avançadas de reciclagem. Hoje, a reciclagem do plástico pode ser feita por processo mecânico ou químico (MANSOR et al., 2010):

- **Reciclagem Mecânica:** neste processo o resíduo plástico é convertido em grânulos através das etapas: moagem, lavagem, aglutinação e extrusão.

- **Reciclagem Química:** consiste no processo químico que visa à recuperação do resíduo plástico.

2.5 Poliestireno expandido (EPS)

O EPS é a sigla internacional que indica o Poliestireno Expandido (isopor). O nome isopor é uma marca registrada da empresa BASF. Esse material é identificado como um material celular rígido, resultante da polimerização do estireno em água e pertencendo ao grupo dos termoplásticos (TECHNICAL INFORMATION, 1992).

Há 50 anos atrás foi criado o EPS, que é composto de 98% de ar e 2% de matéria prima (poliestireno). Desde a criação tem sido amplamente aplicado de diversas formas como embalagens industriais (tanto para conservação de produtos alimentícios como para proteção de equipamentos), artigos de consumo, materiais para construção civil, aplicação em processos de fundição de blocos de motores na indústria automobilística, etc. (FRANCA; VIANA; RODRIGUES, 1997). O EPS constitui uma parte considerável do resíduo de termoplástico descartado no meio ambiente em termos de volume (SEKHARAN; ABRAHAM; THACHIL, 2012).

O poliestireno é um material sólido transparente, formado pela polimerização de muitas moléculas de estireno, que se forma a partir do benzeno e do etileno derivados do petróleo, conforme ilustrado na Figura 4.

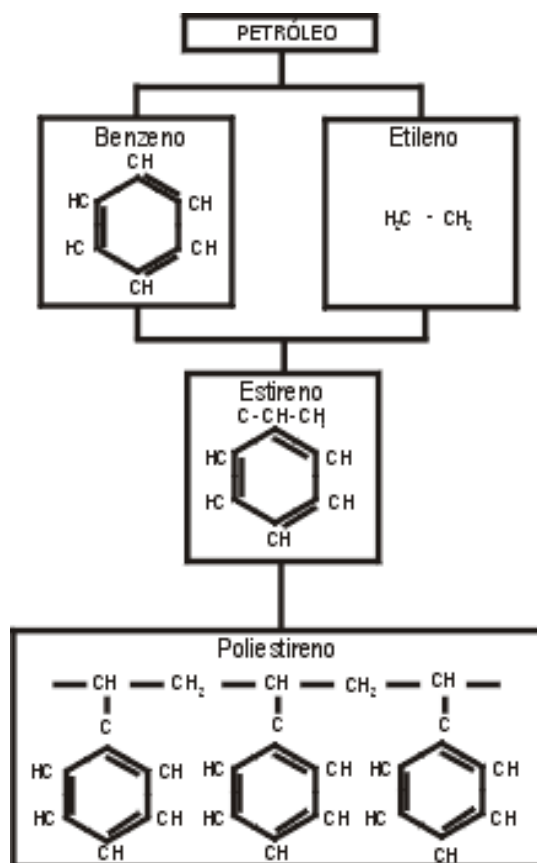


Figura 4 – Obtenção do poliestireno a partir do petróleo.

A Figura 5 ilustra o processo de fabricação da matéria prima do poliestireno, o qual é formado pela polimerização em água do estireno proveniente do petróleo.

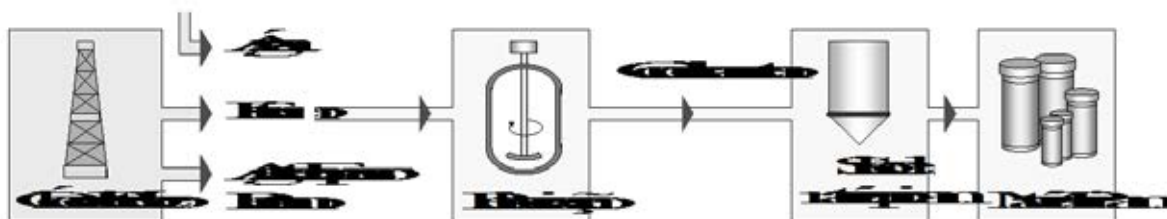


Figura 5 - Processo de fabricação da matéria prima de poliestireno.

Para obter o poliestireno expandido, o material obtido passa pelo processo de expansão, conforme Figura 6:

a) Pré-expansão: A expansão do poliestireno (PS) expansível é efetuada na primeira fase em um pré-expansor através de aquecimento

por contato com vapor de água. O agente expensor incha o PS para um volume cerca de 50 vezes maior do original. Daí resulta um granulado de partículas de isopor constituídas por pequenas células fechadas, que é armazenado para estabilização.

b) Envelhecimento Intermediário: O armazenamento é necessário para permitir a posterior transformação do isopor. Durante esta fase de estabilização, o granulado de isopor arrefece o que cria uma depressão no interior das células. Ao longo deste processo o espaço dentro das células é preenchido pelo ar circundante.

c) Expansão: O granulado estabilizado é introduzido em moldes e novamente exposto a vapor de água, o que provoca a soldadura do mesmo; assim obtém-se um material expandido, que é rijo e contém uma grande quantidade de ar.

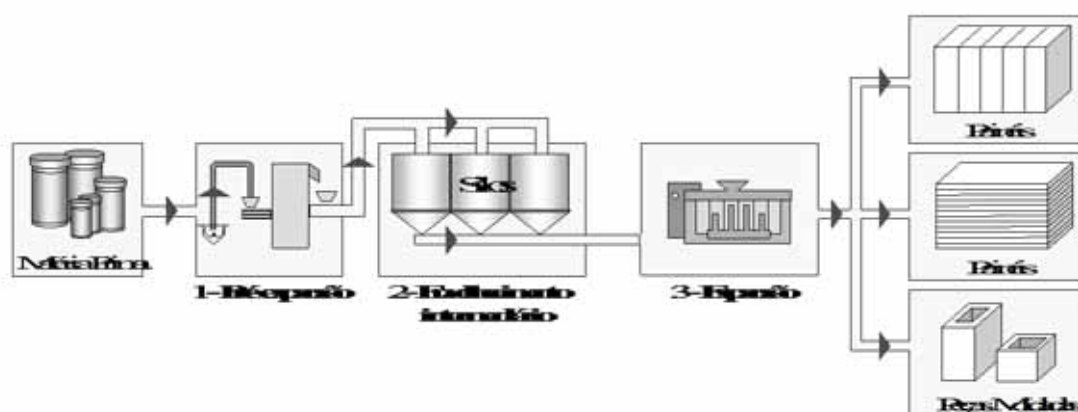


Figura 6 - Processo de fabricação dos materiais a base de poliestireno expandido (EPS)

A estrutura de poliestireno expandido pode ser vista em dois níveis. Ao nível macroscópico, a estrutura-padrão de bolas fechadas, geralmente com um diâmetro na ordem de 2-4 mm de acordo com a Figura 7(a). A estrutura celular está presente em cada esfera, como mostrado na Figura 7(b) (ROSSACCI; SHIVKUMAR, 2003).

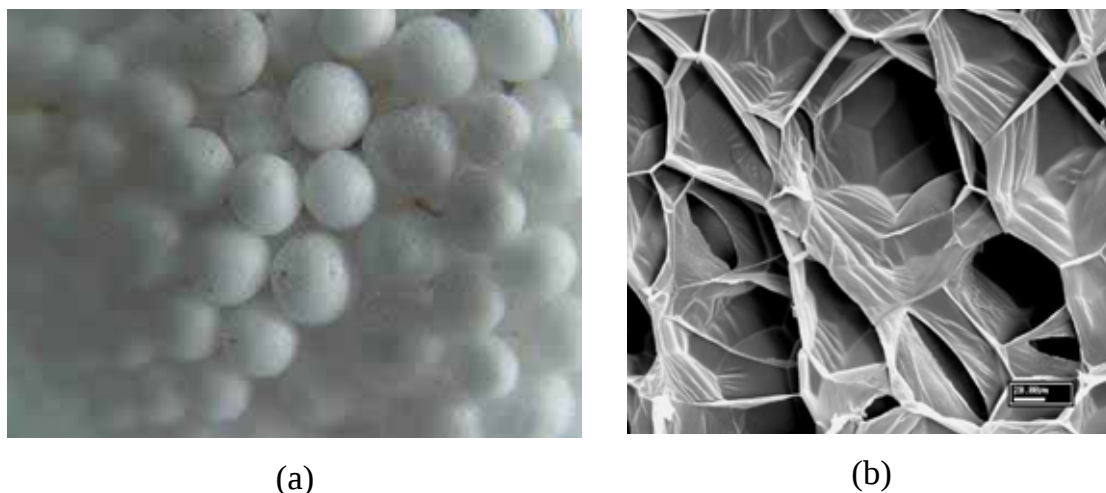


Figura 7 – Estrutura do poliestireno expandido: (a) nível macroscópico; (b) nível microscópico (ROSSACCI; SHIVKUMAR, 2003).

2.5.1 Reciclagem do EPS

Os dados de um artigo do Grupo Polimex (1997) com o nome de “Reciclabilidade e Ecologia” mostram que o EPS é um material inerte quimicamente, não é biodegradável, isto é, não se decompõe, não se desintegra, não desaparece no ambiente e não contém CFC. Devido a esse fato, o EPS não contamina quimicamente o solo, a água ou o ar, mas constitui um problema ambiental se não reciclado, pois é considerado um material eterno e ocupa muito espaço (devido a sua baixa densidade). Dessa forma faz-se necessário a reciclagem desse material.

A técnica de reciclagem do isopor, conforme ilustrado na Figura 8, pode ser feita de diversas formas, dependendo da utilização final do produto:

- os rejeitos podem ser processados para serem novamente moldados em forma de blocos, injetados para formar peças para embalagens;
- usados como substratos para melhoramento de solo, em drenagens, jardineiras, aeração de material para decomposição;

- reutilizados na construção civil ou até gerar energia elétrica ou calorífica por combustão direta.

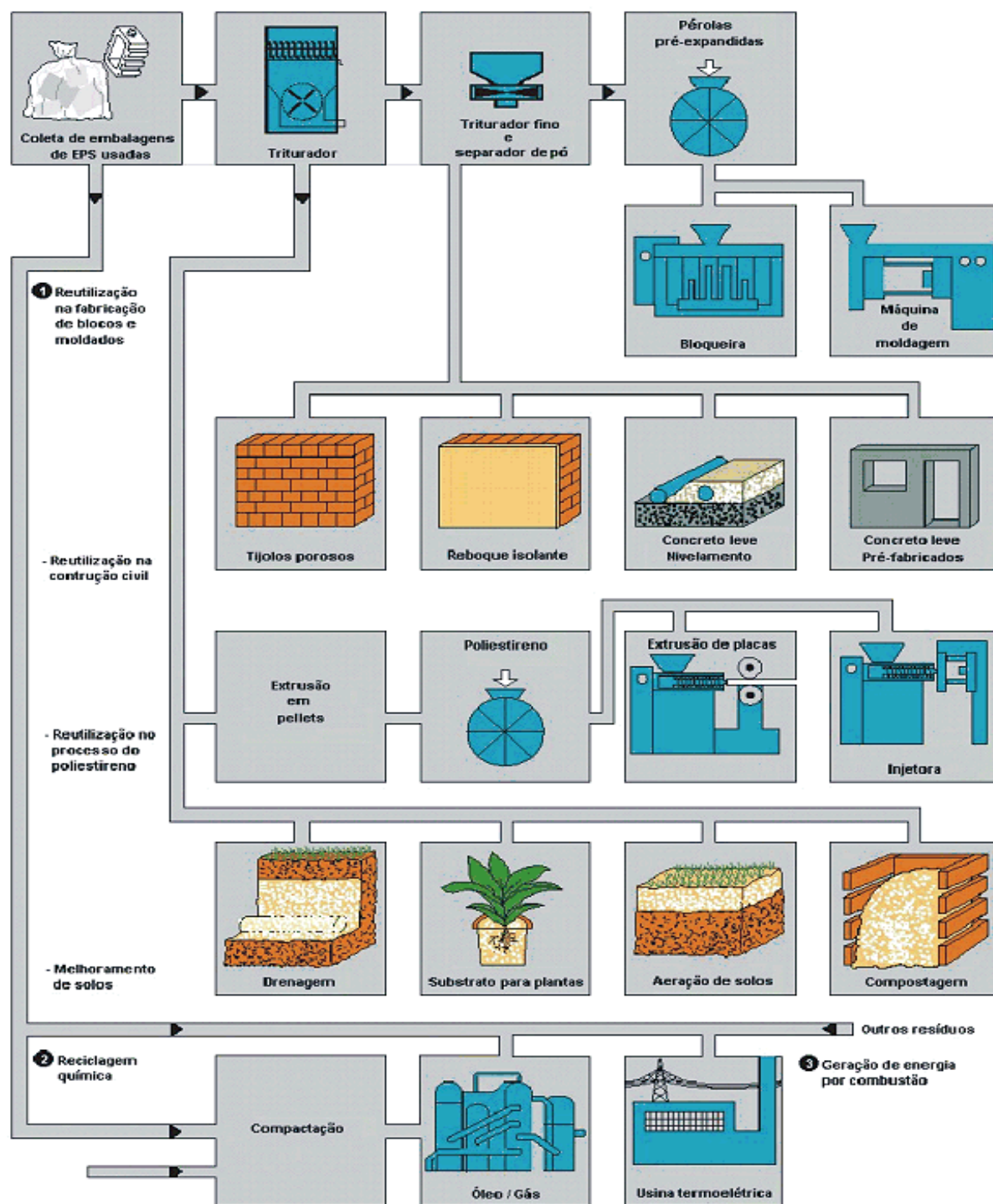
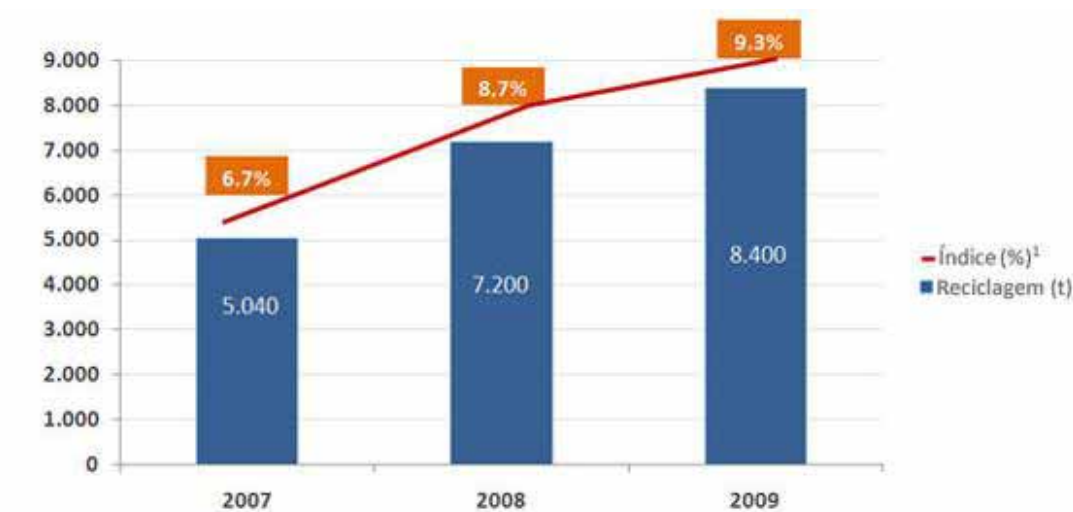


Figura 8 - Processos de reciclagem de resíduos de materiais a base de poliestireno expandido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO, 2011).

Segundo dados da PLASTIVIDA (2012), o EPS reciclado pode ser utilizado como matéria prima na produção de uma grande gama de produtos, tais como: molduras, rodapés, perfis para obras civis, solados plásticos para calçados, insumos para concreto leve / obra civil, entre outros.

Por ser um plástico 100% reciclável seu índice de reciclagem vem aumentando com o passar do tempo, como mostra a Figura 9.



¹ Esse índice mede a relação entre quantidade reciclada x produzida

Figura 9 – Índice de reciclagem do EPS (PLASTIVIDA, 2012).

2.6 Placas de circuito impresso

A placa de circuito impresso ilustrada na Figura 10 é um componente básico e essencial, largamente utilizada em toda indústria eletroeletrônica. É o meio mais comum e prático para montagens definitivas de circuitos eletrônicos. Sua confecção proporciona a circulação de corrente elétrica de um circuito por uma fina camada de um condutor estampada na placa, base isolante, na qual são fixados os componentes através da solda, substituindo assim a fiação. Dessa forma se obtém uma melhor distribuição dos componentes em um espaço reduzido, possibilitando a diminuição de equipamentos (WILSON, 2012). Atualmente, na indústria, os materiais mais utilizados na base isoladora são:

fenolite, papel epóxi, fibra de vidro e fibra de poliéster, porém ainda existem placas de filme de poliéster, filmes específicos à base de diversos polímeros ou compostos desses materiais.

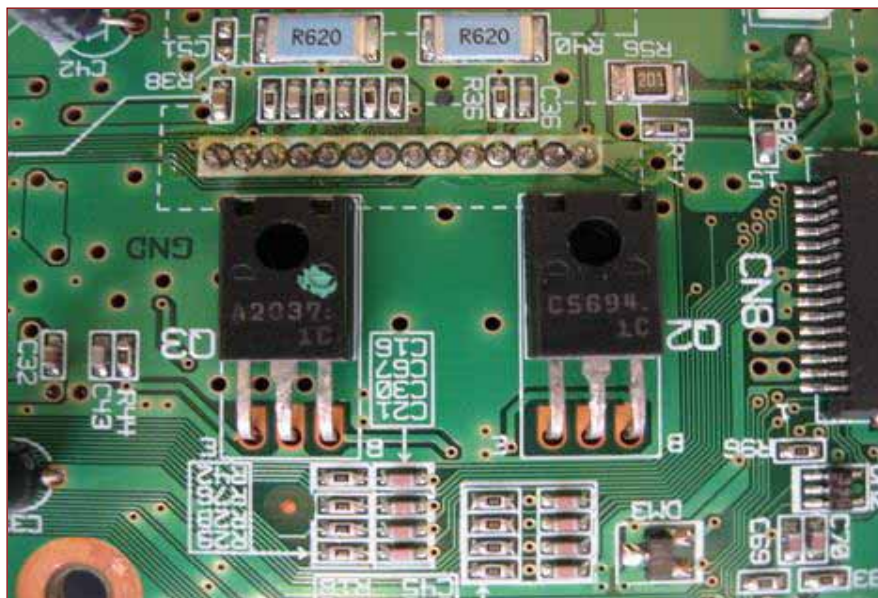


Figura 10– Foto de um circuito eletrônico confeccionado sobre uma placa com as ligações entre os componentes impressas sobre a mesma.

A determinação do material empregado obedece às características físicas determinadas pelos esforços a que serão expostas as placas. Podemos citar exemplos de algumas características usualmente utilizadas: flexibilidade, resistividade da superfície, dissipação de calor, constante dielétrica, resistência à elevação da temperatura, umidade, etc (WILSON, 2012). A Tabela 1 mostra uma comparação entre as propriedades físicas dos dois materiais mais utilizados para a base de placas de circuitos impressos: fenolite e fibra de vidro.

Tabela 1 – Comparação entre as características físicas de fenolite e fibra de vidro (CIRVALE, 2011).

Tipo	<u>Comparação entre materiais usados nas placas</u>				
	Custo	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Isolação Galvânica	Resistência à fusão
Fenolite	Baixo	Razoável	Baixa*	Baixa	Baixa
Fibra de Vidro	Alto	Alta	Alta	Alta	Alta

*no caso de queima e carbonização, o fenolite torna-se condutor

As placas-base são projetadas rígidas ou flexíveis e são classificadas em condutores de uma face, dupla-face e multicamadas. Independentemente do tipo, todas as placas de circuitos impressos são formadas com um material de base isolante em que a folha condutora é quimicamente ou mecanicamente ligada. Essa folha pode ser de cobre, prata e até mesmo ligas à base de ouro e níquel, entre outras, dependendo da aplicação. Nelas são desenhadas trilhas condutoras onde são fixados os componentes eletrônicos de forma a se produzir o circuito desejado. Industrialmente são usados diversos métodos como a serigrafia, processos fotográficos de gravação, jatos abrasivos, deposição metálica, entre outros, para gravação das trilhas condutoras (MADEHOW, 2012).

As placas de circuito impresso mais utilizadas são a de uma face condutora, a qual possui extensa aplicação e menor custo. As placas de dupla face condutora são empregadas quando complexidades do circuito tornar difícil ou impossível desenvolver layouts de fiação em um único lado. E também reduzir o tamanho total de uma placa de circuito comparável em uma placa de um único lado, uma vez que os componentes são montados em ambos os lados. As placas multicamadas, com faces condutoras internas e externas, foram desenvolvidas para esquemas de fiação extremamente complexos num espaço relativamente pequeno (MADEHOW, 2012).

Depois de terminado o *layout*, foram-se as ilhas com furadeiras, para posteriormente ocorrer a fixação dos componentes que é feita com solda elétrica, que utiliza a fusão de uma liga de estanho e chumbo com proporções que adquirem um ponto de fusão baixo em aproximadamente 183°C.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da Figura 11 descreve de maneira geral todas as etapas de obtenção e caracterização do material desenvolvido.



Figura 11- Fluxograma esquemático da metodologia

Para ser moldado, conforme desejado nesta dissertação, é necessário caracterizar o material de forma a garantir a qualidade do produto final, conferindo assim suas propriedades quanto à: caracterização mecânica e térmica, inspeção por ultrassom, microscopia eletrônica de varredura, medida de condutividade elétrica em 4 pontos e análise de textura.

3.1 Dissolução do EPS

O EPS é dissolvido utilizando-se o solvente para homogeneização da matéria-prima, conforme ilustrado na Figura 12. Todo o procedimento é realizado dentro da capela, a esquerda da Figura 13, para não haver contato direto com os voláteis. Para a eliminação do solvente é utilizado a estufa à vácuo mostrada a direita da Figura 13.



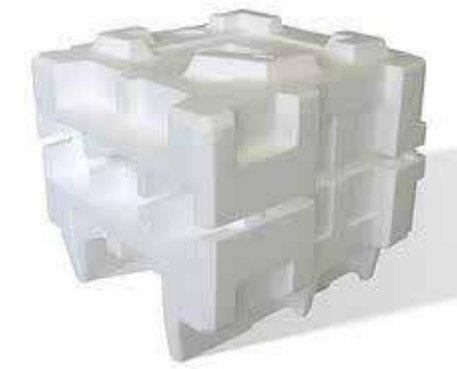
Figura 12 – Materiais utilizados na dissolução do EPS.



Figura 13 - Capela e estufa a vácuo.

3.2 Reciclagem Mecânica

A reciclagem do poliestireno expandido segue as seguintes etapas de processamento (SILVEIRA, 2010):



1ª etapa: “Quebra” do isopor em pedaços menores (forma correta para melhoria da reciclagem e ocupação do espaço);



2ª etapa: O material é aglutinado, através de exposição ao calor e ao atrito;



3ª etapa: Já bastante adensado, o material é submetido a novo aquecimento, até sua fusão;



4ª etapa: Neste estado, o poliestireno expandido é homogeneizado e transformado em grânulos.

Após as quatro etapas do processo de reutilização, conforme informado acima, o material está pronto para ser moldado em diversas formas e formato.

A etapa de moldagem do material tem como função proporcionar a forma e dimensão final desejada, através de processos como moldagem por compressão, extrusão e injeção (SILVEIRA, 2010).

3.2.1 Trituração do EPS

O resíduo de EPS, proveniente em sua maioria de embalagens protetoras, foi triturado em triturador convencional conforme Figura 14 de forma a obter o material em tamanho adequado para as outras etapas do processo de reciclagem.



Figura 14 - Triturador

3.2.2 Aglomeração

A aglomeração do EPS é realizada através de aquecimento com a finalidade de reduzir o volume e assim possibilitar a extrusão do mesmo. Esta etapa é realizada em estufa a vácuo da Figura 15 onde o EPS é exposto a uma temperatura de 100°C por 60 minutos.



Figura 15 – Estufa a vácuo

3.2.3 Homogeneização

3.2.3.1 Extrusora

Na extrusão o material, já aglomerado, é submetido a novo aquecimento, em temperaturas controladas, até seu “derretimento” (e não a queima). Nesse estado o isopor é homogeneizado e transformado em filetes, na forma de “espaguete”. Este processo segue o esquema da Figura 16. Depois de resfriados e secos, os filetes passam pelo picotador que transforma o poliestireno extrudado em grânulos.

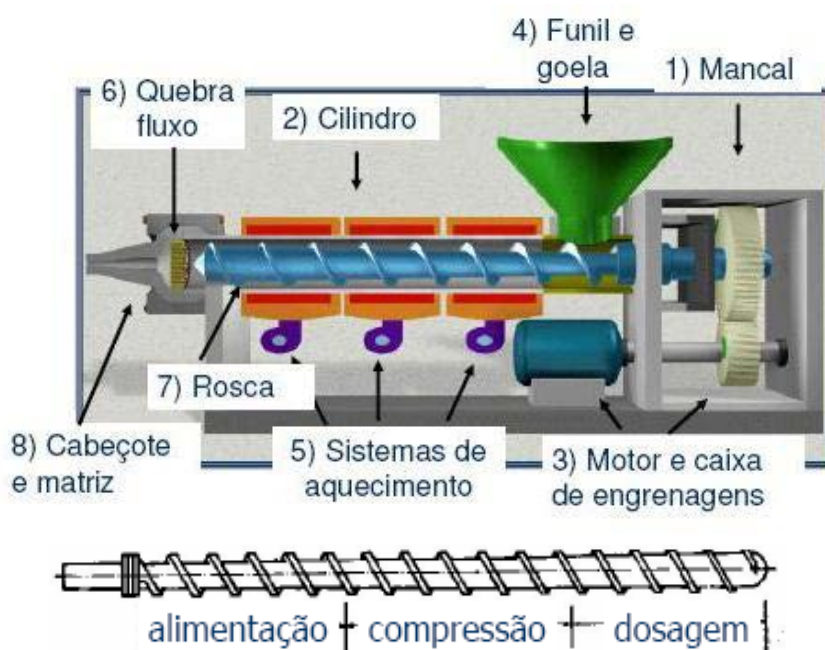


Figura 16 - Esquema do processo de extrusão

3.2.3.2 Homogeneizador termocinético

O PS foi fundido em um homogeneizador de plásticos de laboratório da MH Equipamentos (modelo MH-50H), disponível na Divisão de Materiais (AMR) do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA). A fusão do isopor ocorre dentro da cápsula bi-partida, conforme Figura 17, com arrefecimento de água. 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. E é neste momento que o equipamento é desligado para que não ocorra a degradação do material.

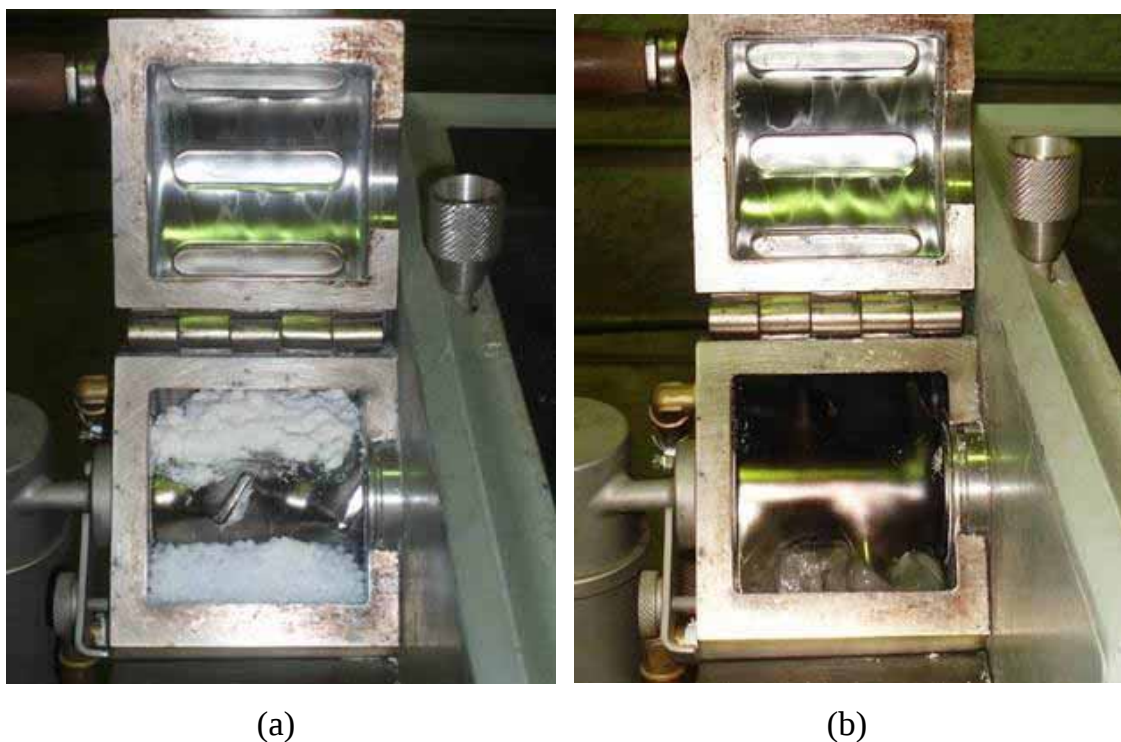


Figura 17 - Detalhe da cápsula de mistura: (a) PS antes da fusão; (b) PS após a fusão.

3.2.4 Processamento

3.2.4.1 Prensagem

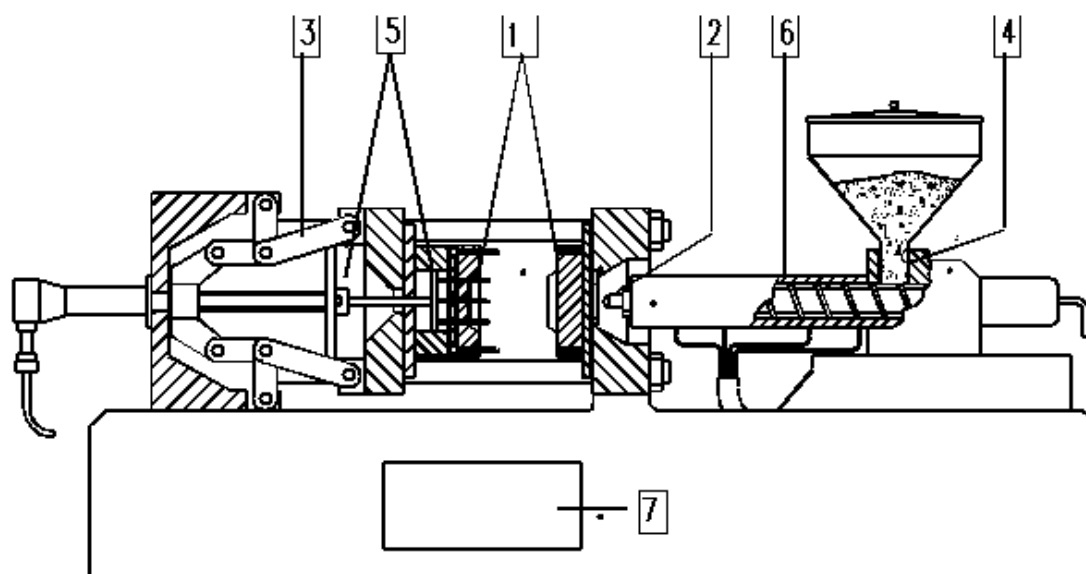
Os grânulos, obtidos na extrusão, são submetidos à prensagem a quente para obter uma placa de material reciclado. Na prensagem é utilizado molde metálico, o qual é previamente aquecido juntamente com a prensa até a temperatura de 200°C, quando é removido e colocado o material; assim, o molde com o material é colocado na prensa, Figura 18, já aquecida, para haver formação da placa na forma do molde.



Figura 18 – Prensa a quente

3.2.4.2 Injeção

Os grânulos, obtidos na homogeneização, são submetidos à injeção para obtenção do material reciclado. A moldagem por injeção é um processo dinâmico e cíclico que pode ser dividido em seis etapas sucessivas: fechamento do molde, dosagem, preenchimento, recalque, resfriamento e extração, como pode ser observado na Figura 19.



- 1 - Área do molde
- 2 - Área da unidade de injeção (movimento do bico)
- 3 - Área do mecanismo de fechamento
- 4 - Área da alimentação de material
- 5 - Área dos extratores de machos e peças (se existentes)
- 6 - Área das resistências de aquecimento
- 7 - Área da descarga de peças

Figura 19 – Esquema do processo de injeção

3.2.5 Caracterização

3.2.5.1 Ensaios de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados em uma máquina universal de ensaios INSTRON 880, como indicado na Figura 20, com carregamento em três ponto e adotando a norma ASTM D790 (2010).

Os corpos de prova foram preparados com 48 mm de comprimento, que atende a razão de 16:1 entre o comprimento e a espessura da amostra estabelecida pela norma.



Figura 20 – Esquema montado para teste de flexão

3.2.5.2 Termogravimetria (TG/DTG)

As amostras foram analisadas em uma termobalança Seiko (modelo TGA-50), disponível no DMT/FEG/UNESP, com uma razão de aquecimento de 20 °C.min⁻¹, em fluxo de nitrogênio no intervalo de temperatura de 40 a 600 °C utilizando aproximadamente 10 mg de cada amostra.

3.2.5.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As análises por calorimetria exploratória diferencial (DSC) do material obtido foi realizada em um calorímetro TA *Instruments* modelo DSC Seiko, disponível no DMT/FEG/UNESP, sob atmosfera de nitrogênio a uma razão de aquecimento 10°C.min⁻¹, aquecendo-se cerca de 5 mg de cada amostra.

3.2.5.4 Inspeção por ultrassom

A inspeção por ultrassom foi realizada com o auxílio do microscópio de inspeção acústica – método C-scan, Figura 21. A análise foi realizada por imersão em água do tipo pulso-eco que utiliza somente um transdutor, para verificação de possíveis descontinuidades.



Figura 21 – Aparelho de ultrassom C-scan por imersão em água.

O equipamento C-scan utiliza o transdutor de 2,25 MHz, 5 MHz e 10 MHz, operando com 3,5 dB e auxílio do A-scan, que separa os níveis ou camadas a serem varridas pelo transdutor. Para uma leitura sem ruídos é importante separar os níveis de modo a não sobrepor a próxima camada ou ler a anterior, pois a leitura sobreposta forneceria um mapa C-scan com cores diferentes e, portanto, uma interpretação errada.

O software utilizado fornece um mapeamento do material inspecionado, gerando uma imagem, o que facilita bastante a identificação de áreas de interesse particulares, como por exemplo, danos ocasionados por esforços ou ensaios, de impacto, por exemplo, do material inspecionado. Poderão ser, assim,

determinadas a presença de vazios, entre outros defeitos. O controle de formação de vazios é muito importante em compósitos, pois dependendo da extensão com que ocorram, prejudicam muitas as propriedades mecânicas do material, principalmente quando o material é submetido à variação de temperatura e umidade.

3.2.5.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM5310, disponível no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/INPE em São José dos Campos, operando de 15 a 20 kW e utilizando detector de elétrons secundários.

3.2.5.6 Medida de condutividade elétrica em 4 pontos

Podemos definir a resistência entre dois pontos quaisquer de um material isotrópico, aplicando-se uma diferença de potencial V (ou tensão elétrica) entre estes pontos e medindo a corrente elétrica i que flui entre eles, utilizando o **método da sonda quatro pontas**, onde são utilizadas quatro pontas, sendo que duas delas servem para “transportar” a corrente (i) e as outras duas para monitorar a tensão (V).

3.2.5.7 Análise da textura

Textura de imagem, definida como uma função da variação espacial na intensidade dos pixels (valores de cinza) é útil numa variedade de aplicações e tem sido um objeto de intenso estudo por muitos investigadores. Uma aplicação imediata de textura de imagem é o reconhecimento de imagem usando as propriedades de textura. Textura é a dica mais importante visual na identificação de regiões homogêneas, isto é chamado de classificação de textura. O objetivo de classificação da textura é o de produzir um mapa de classificação da imagem

de entrada, onde cada região texturizadas uniforme é identificada com a classe de textura a que pertence. Uma segunda aplicação é a segmentação de textura, a qual visa obter o mapa de limite. Outra aplicação é a síntese de textura, frequentemente utilizada para a imagem com aplicações de pressão.

3.3 Processamento da placa de EPS reciclado

Para poder realizar o processamento da placa de EPS reciclado foi necessário confeccionar um molde conforme ilustrado na Figura 22 para a injeção do substrato no formato e espessura adequados para a aplicação em placas de circuito impresso.



Figura 22 – Molde de injeção do substrato

Com o material injetado é necessário colar uma folha de cobre, Figura 23, em uma ou nas duas faces do substrato para viabilizar a confecção do circuito impresso.



Figura 23 – Folha de cobre

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente o poliestireno expandido foi dissolvido em solventes para extração de ar e para ruptura de ligações secundárias obtendo-se assim uma pasta gelatinosa, nesta fase o importante era evitar a degradação química do isopor ou a ruptura de ligações primárias; foram usados dois solventes: acetona e d-limoneno.

Na dissolução com acetona o polímero apresentou-se na forma de uma pasta acinzentada e após moldagem obteve-se um sólido extremamente frágil com enorme quantidade de vazios e de baixas propriedades mecânicas, conforme a Figura 24, inviabilizando quaisquer ensaios mecânicos e, conseqüentemente, impossibilitando sua aplicação como o substrato da placa de circuito impresso.



Figura 24 – Resultados da dissolução do EPS com acetona

A figura 25 apresenta o polímero moldado obtido na dissolução do poliestireno expandido no d-limoneno, o mesmo aspecto frágil e baixas propriedades mecânicas foram observados para este material, porém com uma coloração marrom.



Figura 25 – Resultados da dissolução do EPS com d-limoneno

A partir dos dados obtidos nos experimento com a dissolução do EPS decidiu-se por triturar o material e aglomerá-lo de forma a eliminar a grande quantidade de ar presente em sua estrutura e possibilitar a homogeneização, esta etapa foi então realizada em estufa à 100°C por 1 hora.

Para o processo de homogeneização foram utilizados dois métodos: a extrusão e a homogeneização termocinética.

Na extrusão o EPS aglomerado foi homogeneizado durante o processo de aquecimento controlado, ou seja, no sistema de aquecimento foi utilizada a temperatura de 50°C na entrada, 100°C na alimentação, 150°C na compressão finalizando com a temperatura de 200°C na dosagem. Neste processo o EPS foi então transformado em filamentos, como mostra a Figura 26, observa-se que a cloração se manteve branca, porém com aspecto perolizado, associado então ao fato do polímero não ter se degradado durante o processo de extrusão.



Figura 26 – Filamento de poliestireno.

No homogeneizador termocinético, o EPS aglomerado foi fundido pela rotação das palhetas. Homogeneizado, o material foi triturado em grânulos como indicado na Figura 27, viabilizando o seu processamento, para o qual foram utilizados dois métodos: prensagem e injeção.



Figura 27 – Grânulos (a) extrusora; (b) homogeneizador termocinético

Após a extrusão, o EPS aglomerado foi transformado em um material mais uniforme e praticamente sem vazios, ou seja, o processo proporcionou um

material com boa homogeneidade e a eliminação do ar residual presente no material utilizado.

O EPS extrudado foi, então, submetido à prensagem como ilustrado na Figura 28. Nessa etapa obteve-se uma placa plastificada com maior resistência mecânica em relação às placas obtidas na dissolução e praticamente sem vazios. Porém notou-se que o método não permitiu uma homogeneidade na distribuição do material pelo molde, o que dificultou sua reprodutividade com as características necessárias à aplicação.



Figura 28 – EPS prensado

Tanto o EPS processado no homogeneizador termocinético quanto aquele extrudado foram submetido à injeção, moldados em corpos de prova de flexão, conforme as Figuras 29a e 29b, respectivamente.



Figura 29 – Corpos de prova de flexão processados por: (a) Homogeneizador termocinético; (b) Extrusão

Com a injeção, o material apresentou-se uniformemente distribuído, o que permite uma reprodutividade de características mecânicas e térmicas do material, viabilizando o uso desta técnica industrialmente na obtenção de substrato para placas de circuito impresso.

O estudo da resistência à flexão permitiu avaliar o comportamento do material quanto à força de dobramento aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal. A força aplicada pela carga de flexão é uma combinação de forças de compressão e tensão.

O teste de flexão foi realizado nos corpos de prova da fenolite e naqueles obtidos pela injeção do material processado no homogeneizador termocinético (1), material extrudado (2) e pela prensagem do material extrudado (3). A Tabela

2 apresenta os valores das propriedades de flexão da fenolite e a Tabela 3 apresenta os valores das propriedades de flexão dos materiais obtidos.

Tabela 2 - Valores de resistência à flexão da fenolite

Processamento	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	
Fenolite	449,1	443,4 ± 9,4	13147,8 ± 1053,9
	444,7		
	447,1		
	426,9		
	449,3		

Considerando que a fenolite é um compósito composto de camadas de papel especial (papel fenólico, Kraft) com resina fenólica de alta resistência mecânica, variando suas propriedades de flexão de acordo com a quantidade de camadas utilizadas na fabricação. Trata-se de um material de fabricação industrial, comercialmente pronto, no qual pode ser observado que tanto o valor de resistência quanto o módulo de flexão são consideravelmente mais altos, o que impossibilita a comparação de valores, assim serão comparados os materiais processados com o poliestireno reciclado a medida que durante os experimentos, foi observada a plastificação adequada nos três processos para a aplicação.

Tabela 3 - Valores de resistência à flexão dos materiais obtidos

Processamento	Resistência à Flexão (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)
1	47,9	55,6 ± 9,2	2817,8 ± 1246,5
	58,8		
	44,6		
	59,5		
	67,1		
2	15,1	15,9 ± 1,4	48,9 ± 0,5
	13,8		
	16,5		
	16,9		
	17,2		
3	3,6	6,6 ± 6,4	13,2 ± 0,3
	3,7		
	3,1		
	4,6		
	17,9		

Na realização do ensaio mecânico é necessário utilizar 5 corpos de prova de cada processamento, comprovando a reprodutibilidade do processo de obtenção das amostras. Desta forma, observa-se que o processamento via prensagem é de difícil reprodução, visto a diferença de resistência observada em um de seus valores em resistência à flexão. As propriedades de flexão dos materiais obtidos foram influenciadas pelo processamento utilizado, conforme mostra a Tabela 3.

Analisando as propriedades mecânicas em flexão dos materiais obtidos nos três processamentos observou-se que o material homogeneizado no homogeneizador termocinético e injetado possui valores de resistência e módulo em flexão iguais a 55,6 MPa e 3 GPa, respectivamente, os quais comparando com os dois outros processamentos é superior, sendo considerado o mais adequado para a aplicação estudada. Deve-se considerar que 55,6 MPa é resistência para suportar pelo menos 500 Kg de carga o que justifica a aplicação do material como substrato para placa de circuito impresso, componente que mesmo quando utilizado em operações aéreas, não suportará mais que esse valor de carga.

A análise TGA foi realizada no EPS antes do processamento, de forma a avaliar seu comportamento durante o aquecimento. O gráfico da Figura 30 mostra o percentual de perda de massa versus temperatura, em uma faixa de temperatura de 25°C a 500°C. Até 333,96°C pode-se observar que não há uma perda de massa significativa, sendo portando considerada com a temperatura de estabilidade térmica do EPS. Entre 333,96°C e 387,48°C há uma diminuição de 94,36% da massa do EPS, estágio no qual ocorreu a degradação do material ou o processo de ruptura de ligações primárias devido à energia térmica.

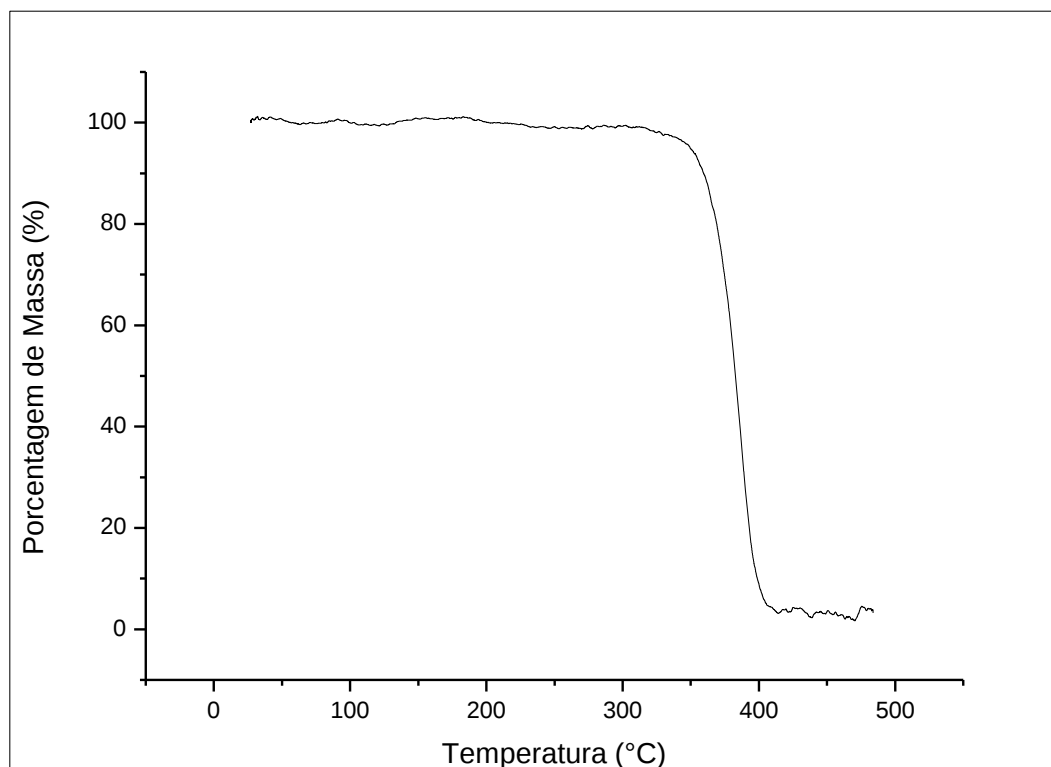


Figura 30 – Gráfico de TGA do EPS

Comparativamente, a análise TGA foi realizada no EPS após os processos de homogeneização seguida de injeção e também na fenolite. A Figura 31 mostra que a fenolite tem o início da perda de massa na temperatura de 210,15°C, considerada assim sua temperatura de estabilidade térmica e perde 34,2% em massa até a temperatura de 479,42°C, ou seja, no intervalo de temperatura de 210,15°C a 349,42°C ocorre a degradação térmica do material, ou a ruptura das ligações primárias de estrutura fenólica, sendo que os 65,8% restantes podem ser associados ao papel Kraft utilizado como reforço na estrutura.

Os EPS aglomerados, processados na extrusora, e no homogeneizador termocinético e injetados tiveram um comportamento parecido. Nos dois casos a perda de massa foi de 97,9%, considerando tratar-se de polímeros não reforçados, assim em 242,78°C foi observado o início da degradação térmica, a qual pode ser considerada a temperatura de estabilidade térmica dos materiais,

terminado na temperatura de degradação do material processado de 296,11°C e os 2% restantes são associados às cinzas geradas pela queima durante o ensaio.

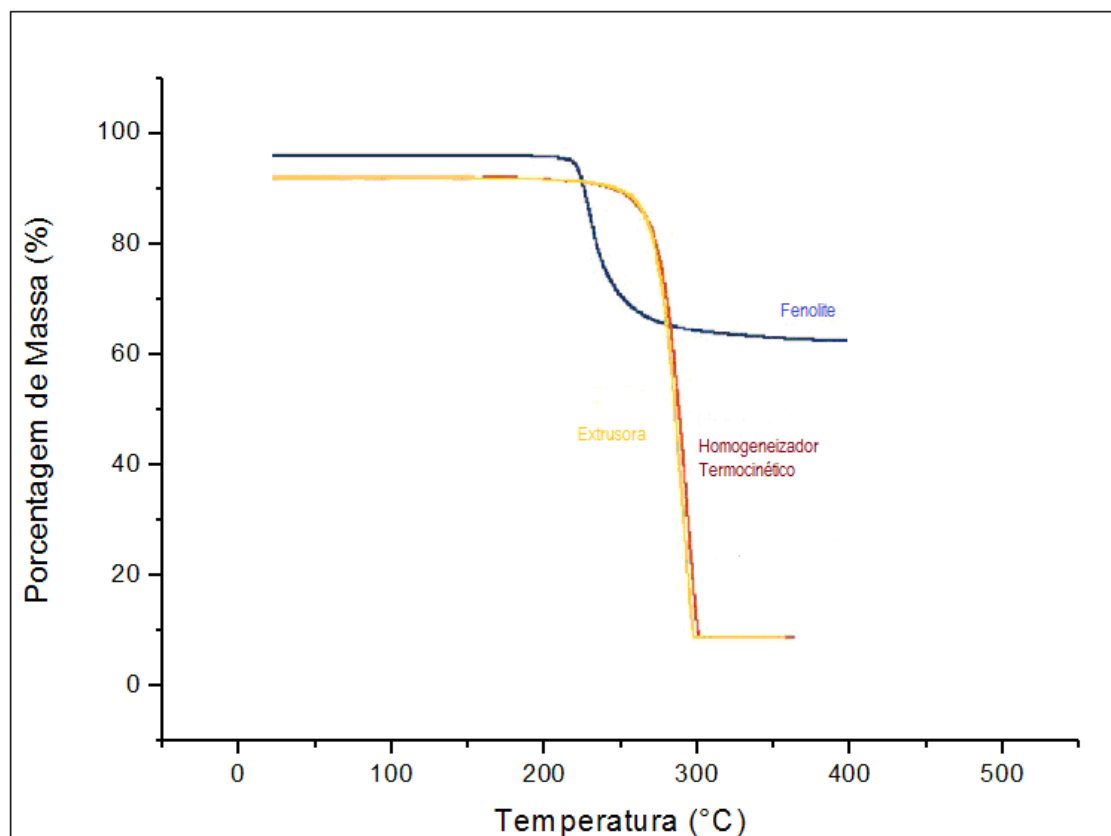


Figura 31 - Gráfico de TGA do EPS processado e da fenolite

A Tabela 4 mostra os dados obtidos pela perda de massa em diferentes temperaturas e temperatura de degradação, do EPS, da fenolite e dos materiais processados.

Tabela 4 – Dados obtidos das curvas termogravimétricas dos materiais

Amostras	Perda de massa (%)			Temperatura de estabilidade térmica (°C)
	200°C	300°C	400°C	
EPS	0,74	1,13	94,16	333,96
Fenolite	2,35	34,11	34,23	210,15
Homogeneizador Termocinético/Injetora	5,11	97,88	97,91	242,78
Extrusora/Injetora	5,03	97,88	97,91	242,78

Pode ser observado que tanto o EPS homogeneizado quanto o extrudado apresentaram temperaturas de estabilidade térmica maiores em relação a fenolite e, considerando tratar-se de um compósito e não de um polímero puro, tem-se um resultado positivo já que utilizando os novos materiais, evita-se uma etapa a mais de processo, ou seja, a necessidade de reforçar o polímero para a aplicação.

O DSC foi realizado no poliestireno expandido antes e depois do processamento, a fim de verificar mudanças no valor da transição vítrea causadas durante todas as etapas de processamentos realizadas.

A curva DSC, Figura 32, indica que a temperatura de transição vítrea (T_g) do poliestireno expandido ocorre em $106,6^{\circ}\text{C}$. Após extrudado e extrudado/prensado foram observadas diminuições nas T_g s dos EPS, as quais ocorreram em $101,1^{\circ}\text{C}$ e em $101,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Essa redução de 5°C pode ser considerada insignificante já que o erro associado ao equipamento torna os valores praticamente igual, além disso o fato que EPS apresentar 98% de ar dificulta também a detecção das transições, aumentando assim os valores de temperaturas associadas.

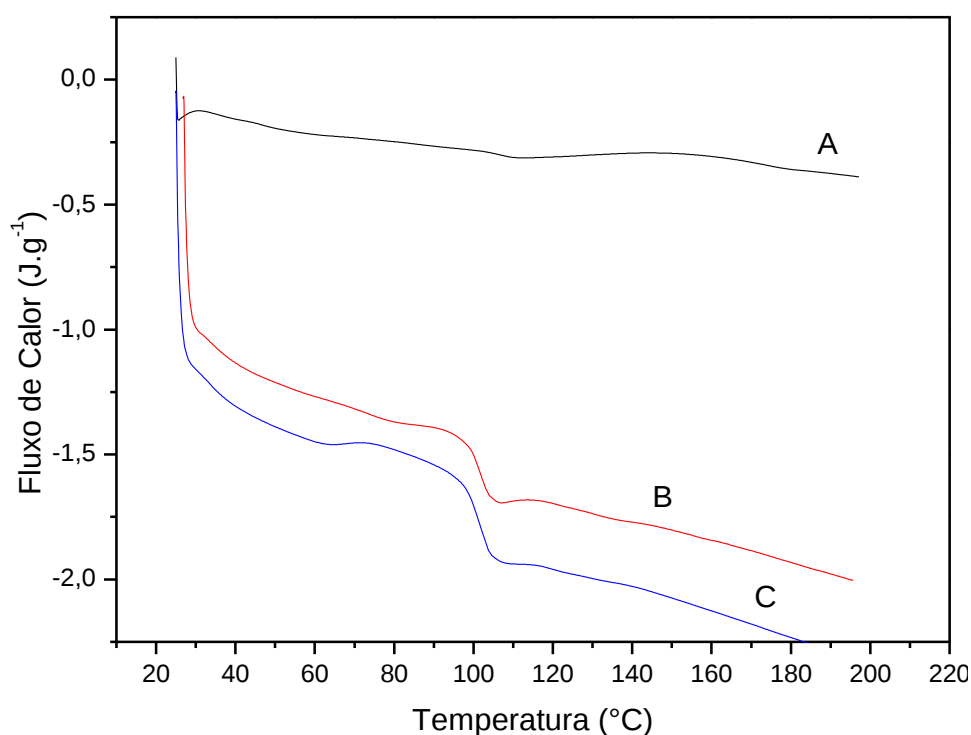


Figura 32 – Gráfico do DSC - A é o EPS, B é o PS extrudado e C é PS prensado.

Comparativamente, após o processo de homogeneização e injeção, foi realizada a análise de DSC. A curva DSC, Figura 33, indica que a temperatura de transição vítrea (T_g) da fenolite ocorre em cerca de $97,6^\circ\text{C}$, possivelmente devido ao alto conteúdo de reforço de papel Kraft no compósito. A T_g do poliestireno extrudado e injetado ocorre em $101,4^\circ\text{C}$ e T_g do poliestireno homogeneizado termocineticamente e injetado ocorre em $107,8^\circ\text{C}$, observa-se assim pequeno aumento, o qual pode ser considerado pois trata-se de materiais igualmente aglomerado, e esse aumento pode ser associado ao aumento da rigidez da macromolécula provocada pelo processo de homogeneização termocinético seguida de injeção.

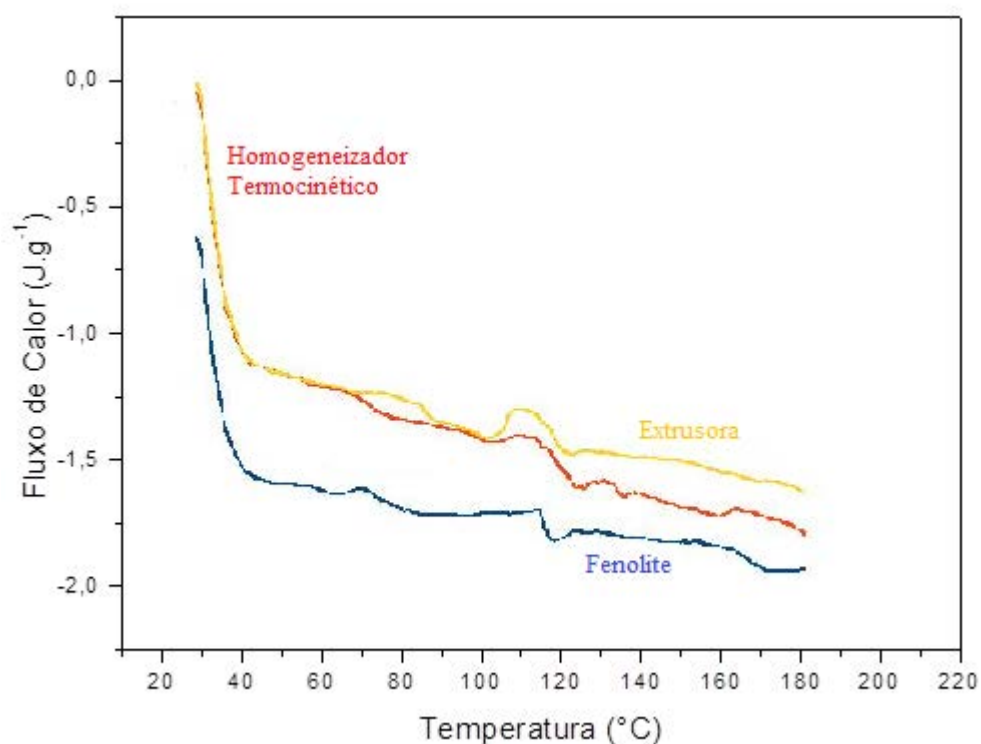


Figura 33 – Gráfico do DSC do EPS processado e da fenolite

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos das curvas DSC do EPS, da fenolite e dos materiais processados.

Tabela 5 – Dados obtidos das curvas DSC dos materiais

Amostras	T_g(°C)	ΔH (J/G)
EPS	106,6	0,60
Extrudado	101,1	1,80
Extrudado/Prensado	101,8	2,50
Fenolite	97,6	1,55
Homogeneizado	107,8	1,75
Termocinético/Injetado	101,4	1,50
Extrudado/Injetado		

Considerando ainda a energia envolvida na fusão dos materiais, pode ser observado que os materiais aglomerados exigem maior energia de dissociação das ligações secundárias em relação ao EPS, o que pode ser associado ao fato de que, na aglomeração, a maior parte do ar foi eliminada, aumentando assim a quantidade em massa da amostra. Um valor relativamente maior foi observado para ao EPS extrudado e prensado, provavelmente, na prensagem houve uma maior aglomeração de cadeias, o que exigiu uma maior energia para a dissociação do material.

Na Inspeção por ultrassom foi utilizada a escala da Figura 34 como referência para análise dos mapas de atenuação utilizando o método C-scan. A escala 0% em preto representa alta atenuação ou região do material de baixa densidade, como vazios, e 100% em branco representa nenhuma atenuação ou completo retorno do eco.



Figura 34 – Escala de atenuação para mapas de C-scan

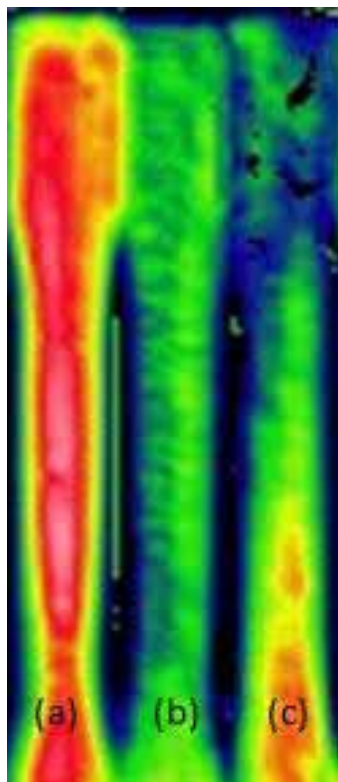


Figura 35 - Ultrassom: (a) processamento 1 (homogeneizador termocinético/injeção); (b) processamento 2(extrusora/injeção) e (c) processamento 3 (extrusão/prensagem).

Foi realizado ultrassom no material dos processamentos (1), (2) e (3). No processamento 1, Figura 35a, foi observado baixa atenuação, ou seja, um retorno em torno de 80% da onda emitida, o que caracteriza pouca presença de descontinuidades no material, sendo observada uma maior uniformidade na distribuição do material durante o processamento. No processamento 2, Figura 35b, nota-se uma atenuação de 60% indicando descontinuidades caracterizadas por poros e vazios, que pode ser explicado pela mudança no processo de homogeneização em relação ao processamento 1, o qual não foi tão eficiente como no primeiro caso, não eliminando completamente o ar existente no material.

No processamento 3, Figura 35c, a atenuação é maior na parte superior da imagem retornando somente 20% da onda. Pode ser observada na imagem que houve concentração de poros e vazios, provenientes do ar presente no material, e na parte inferior uma menor atenuação, retornando até 80%, caracterizando uma falta de uniformidade na distribuição do material durante o processamento.

A análise da microscopia eletrônica foi utilizada para estudar a superfície de fratura das imagens geradas dos corpos de prova ensaiados em flexão obtidos nos processamentos (1), (2), (3) e na fenolite, em quatro ampliações: 35X, 100X, 500X e 2000X.

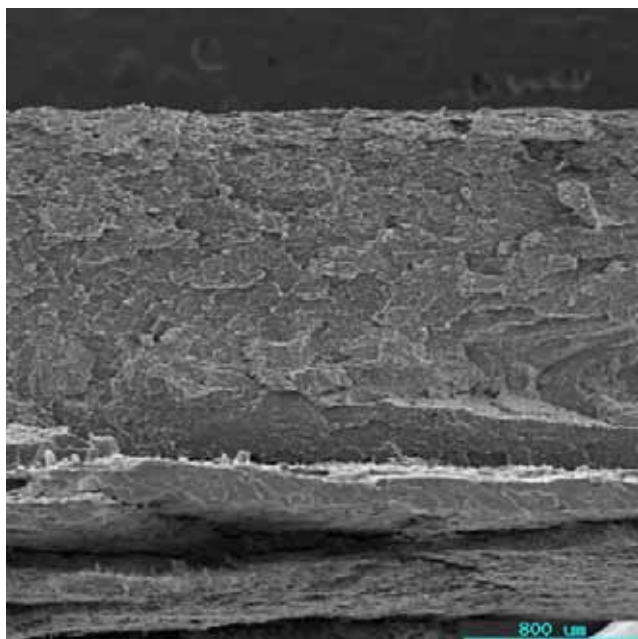
Na Figura 36 é possível visualizar as imagens da fratura dos corpos de prova processados utilizando o homogeneizador termocinético. Nestas imagens é possível observar alta rugosidade na textura do material, o que indica rompimento dúctil da amostra, o qual é caracterizado por uma deformação plástica no início da trinca.

O comportamento dúctil do material representa o grau de deformação que este suporta até o momento de sua fratura, desta forma é possível destacar a flexibilidade referente à deformação plástica suportada pelo material em estudo (OEHLERS; SERACINO, 2004).

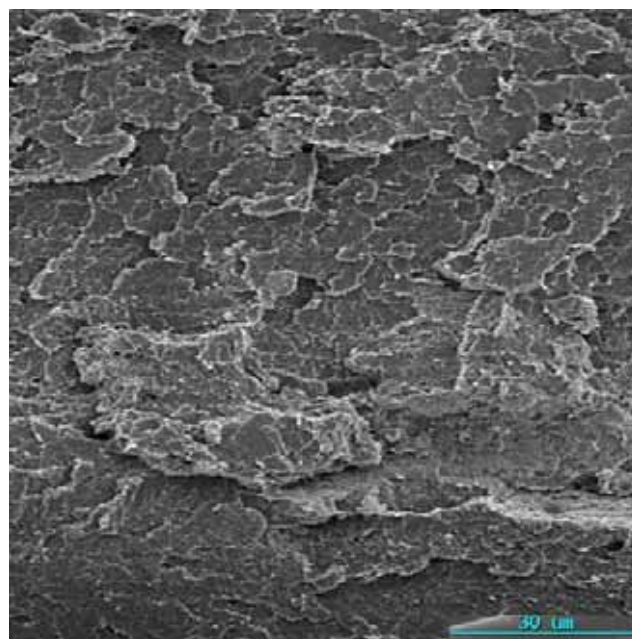
Na Figura 37 são apresentadas as imagens da fratura dos corpos de prova processados utilizando a extrusora, observa-se uma superfície de fratura em camadas formada por planos caracterizando a clivagem. A ruptura ocorre por meio da quebra das ligações poliméricas por clivagem, como consequência ocorre a fragmentação do material.

A Figura 38 das imagens da fratura dos corpos de prova processados utilizando a prensa apresenta poros de diâmetro aproximados de 327,21 μm , os quais fragilizam o material. Materiais frágeis suportam pouca ou nenhuma deformação durante ensaios mecânicos (OEHLERS; SERACINO, 2004).

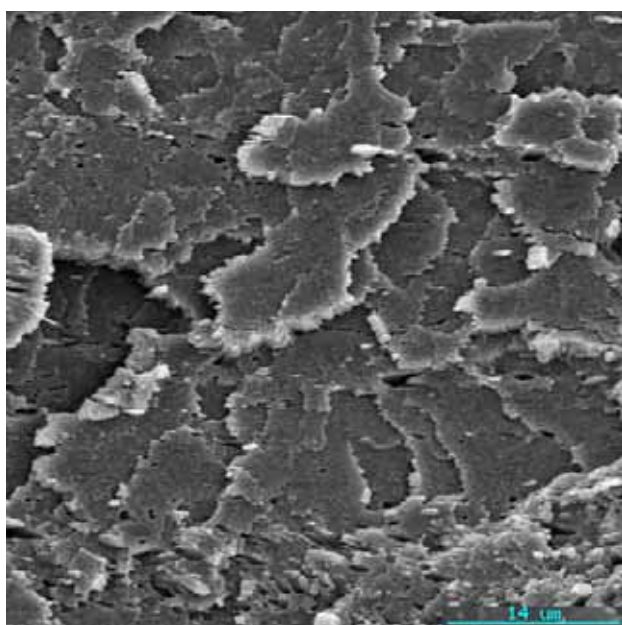
Na Figura 39 mostra a microscopia da fenolite, na qual observa-se a impregnação das camadas do reforço pela resina fenólica. Nota-se alta rugosidade caracterizando a ductilidade do material, o que indica um alto grau de resistência à deformação durante o ensaio de flexão.



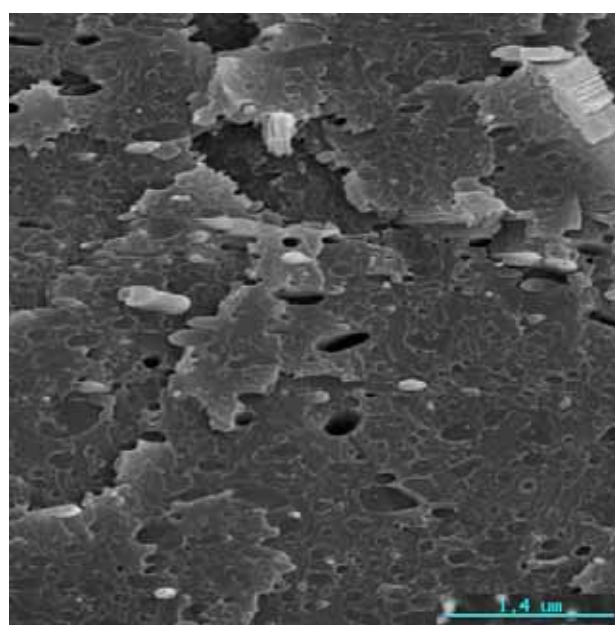
(a)



(b)

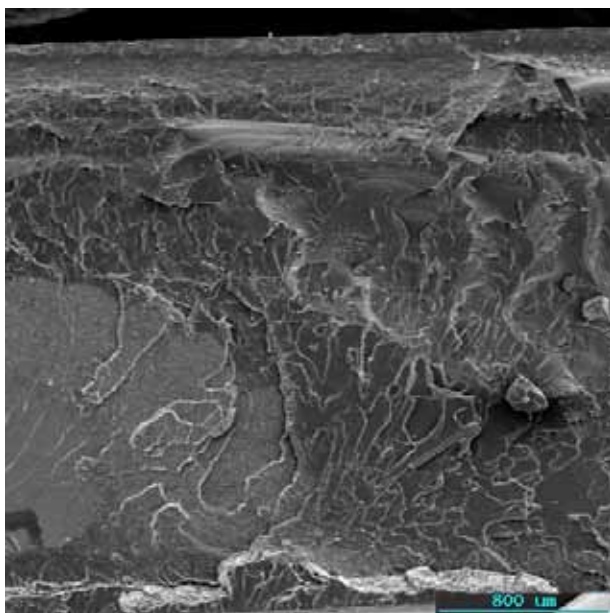


(c)

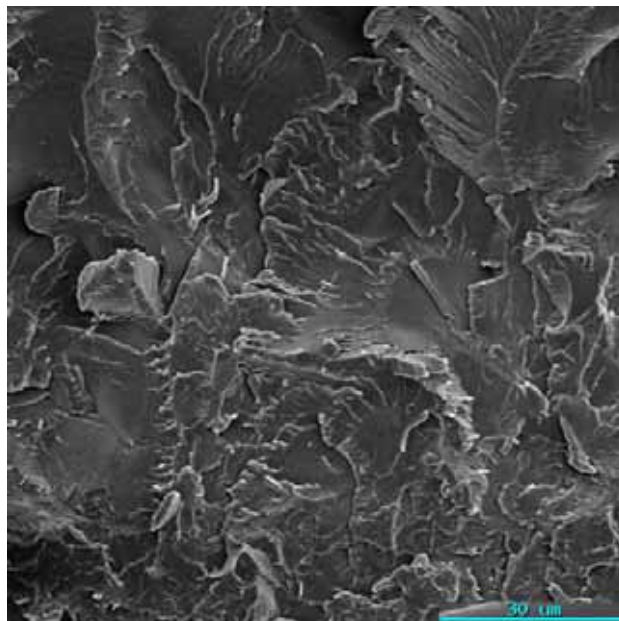


(d)

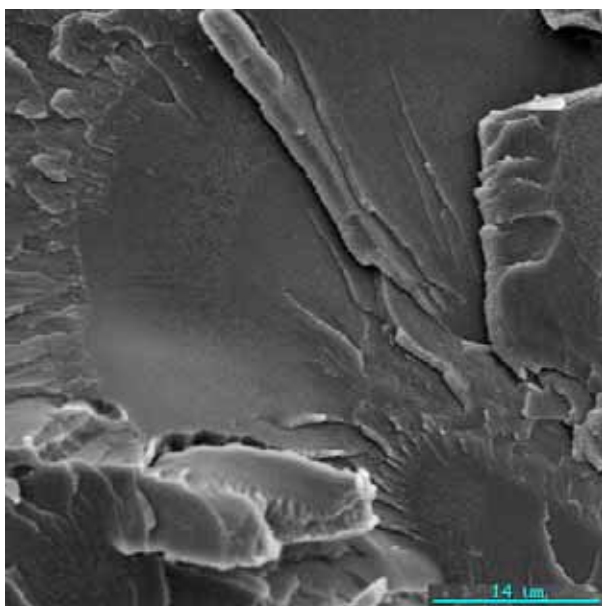
Figura 36 - Microscopia das amostras do processamento (1): (a) aumento de 35X; (b) aumento de 100X; (c) aumento de 500X e (d) aumento de 2000X.



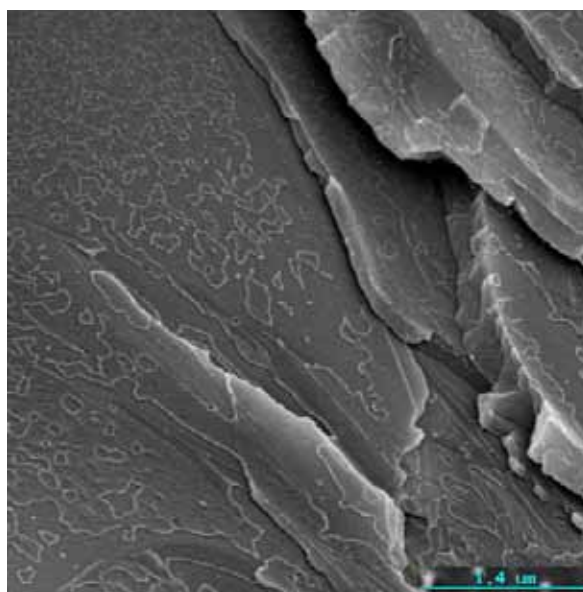
(a)



(b)

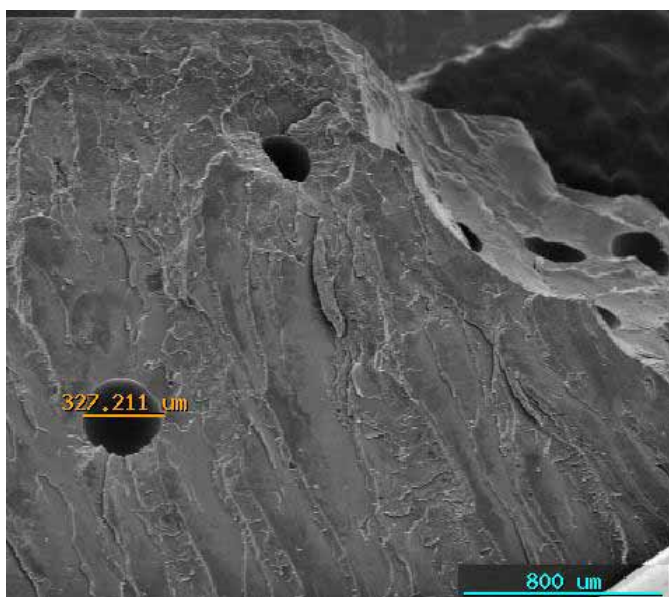


(c)

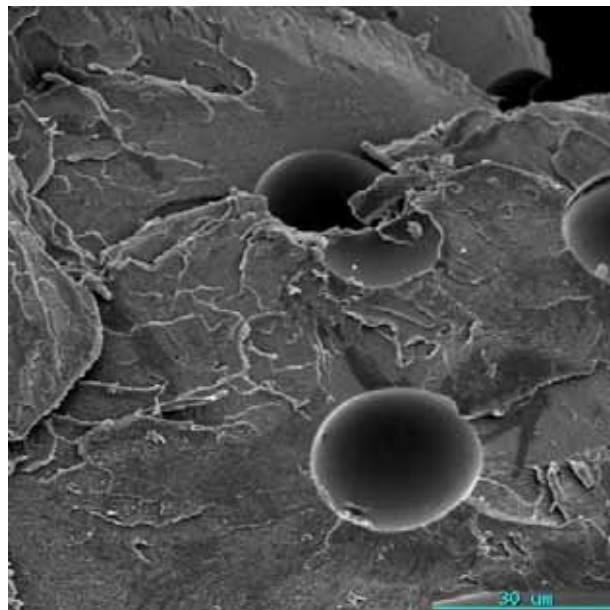


(d)

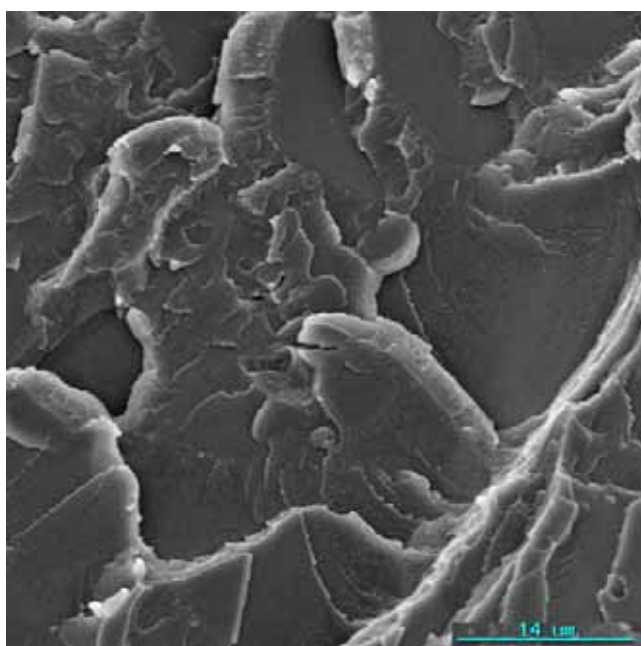
Figura 37 - Microscopia das amostras do processamento (2): (a) aumento de 35X; (b) aumento de 100X; (c) aumento de 500X e (d) aumento de 2000X.



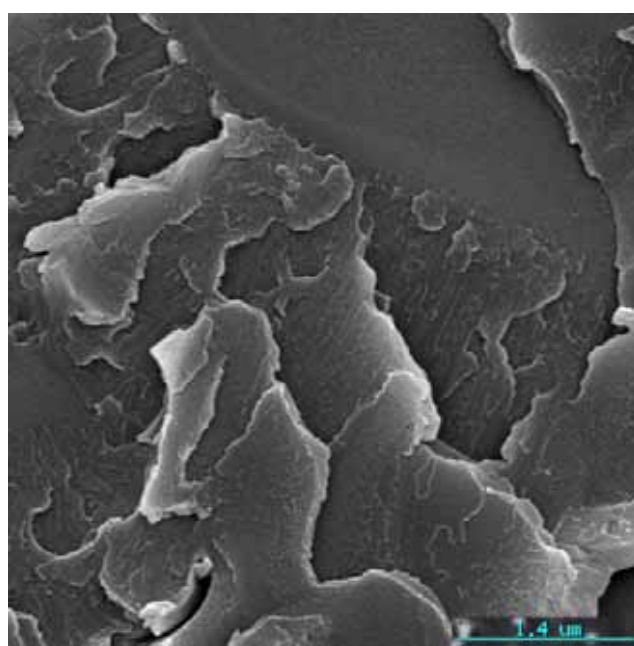
(a)



(b)

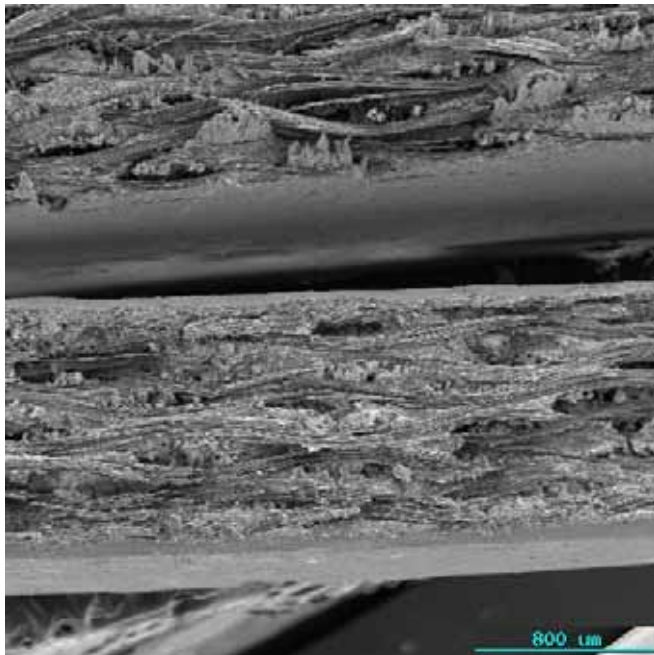


(c)

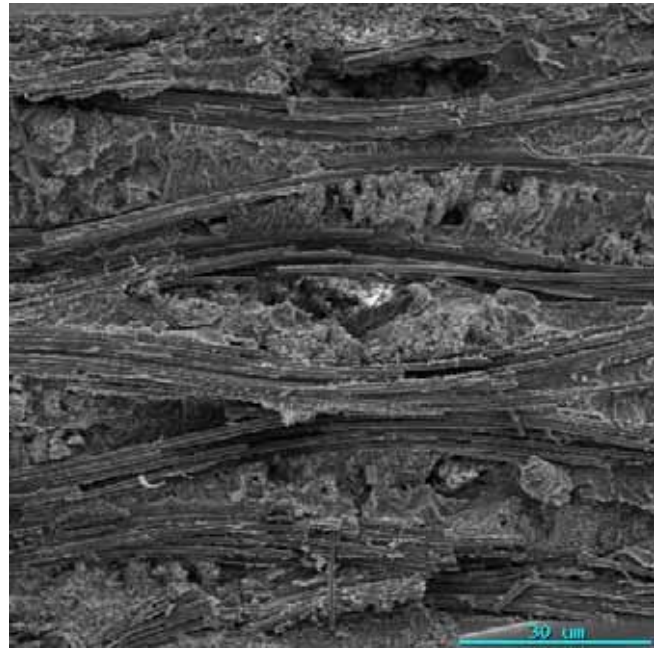


(d)

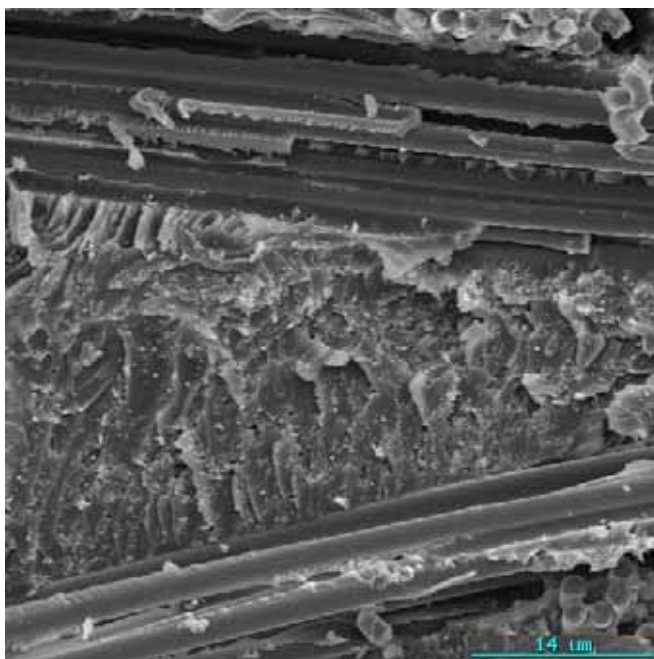
Figura 38 - Microscopia das amostras do processamento (3): (a) aumento de 35X; (b) aumento de 100X; (c) aumento de 500X e (d) aumento de 2000X.



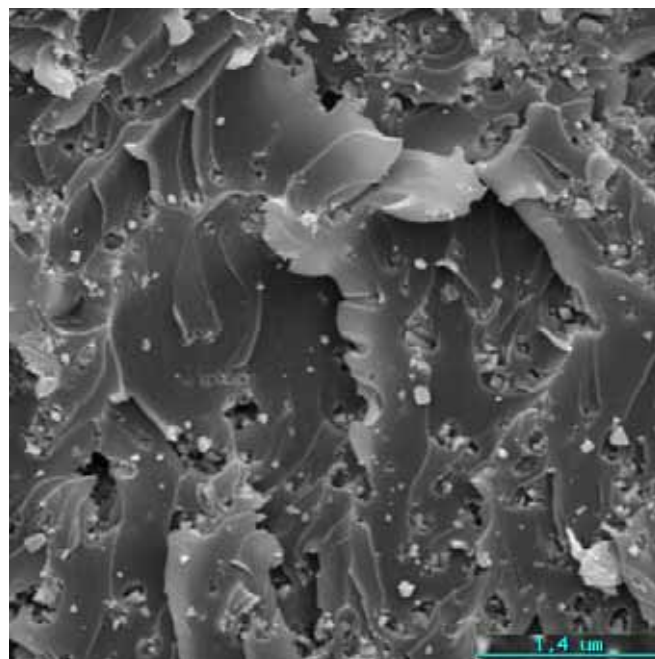
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 39 - Microscopia das amostras da fenolite: (a) aumento de 35X; (b) aumento de 100X; (c) aumento de 500X e (d) aumento de 2000X.

As Figuras 36b e 37b constituem a micrografia de dois diferentes processos, os quais foram submetidos à análise de textura. Uma análise do histograma de cada micrografia revela detalhes da topografia da imagem.

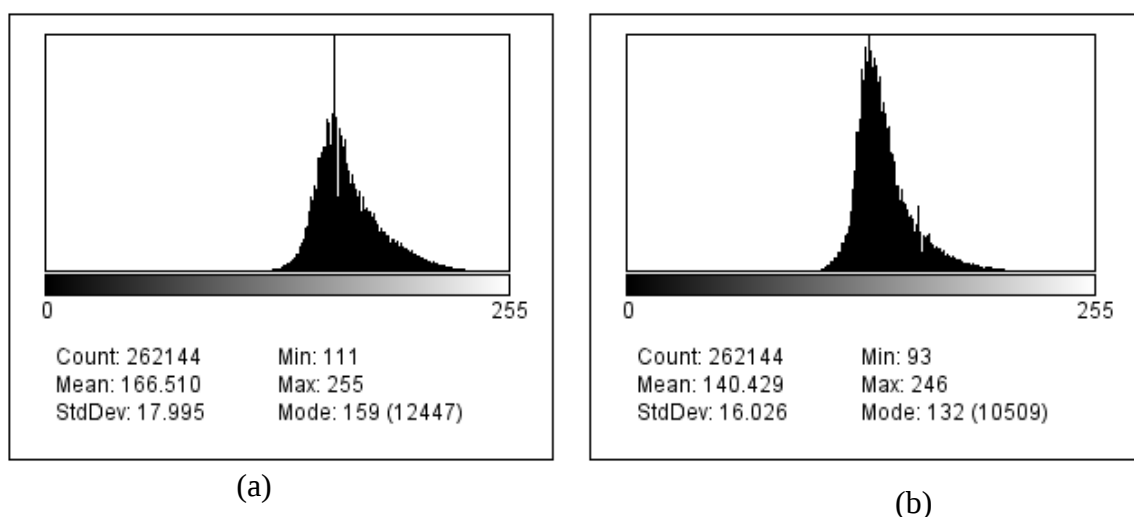


Figure 40 - Histograma da (a) amostra do processamento (1); (b) amostra do processamento (2).

No histograma da Figura 40a pode ser observada que a distribuição dos valores de cinza não estão concentrados em um valor médio e são mais distribuídos ao longo dos valores de 0-255 dos níveis de cinza. Neste caso a quantidade de níveis de cinza nas regiões mais próximas a 255 é maior.

No caso da Figura 40b a concentração de valores de níveis de cinza se concentra na média de 140 com uma frequência e/ou presença relativamente baixa em relação aos demais valores de cinza. Vale notar que existe pouca frequência em relação a valores próximos a 255, que correspondem a regiões mais claras. As imagens foram obtidas por meio de análise em um microscópio eletrônico de varredura e, conseqüentemente, as regiões mais claras correspondem a elevações na topografia da região analisada.

Dessa forma, pode-se dizer que a região da Figura 40b possui mais elevações que a região da Figura 40a. Isso pode ser comprovado no mapa de elevação das duas imagens de acordo com a Figura 41. Embora as elevações na

Figura 41b sejam mais altas que na Figura 41a, a presença de mais elevações comprova a maior rugosidade na região da Figura 41a.

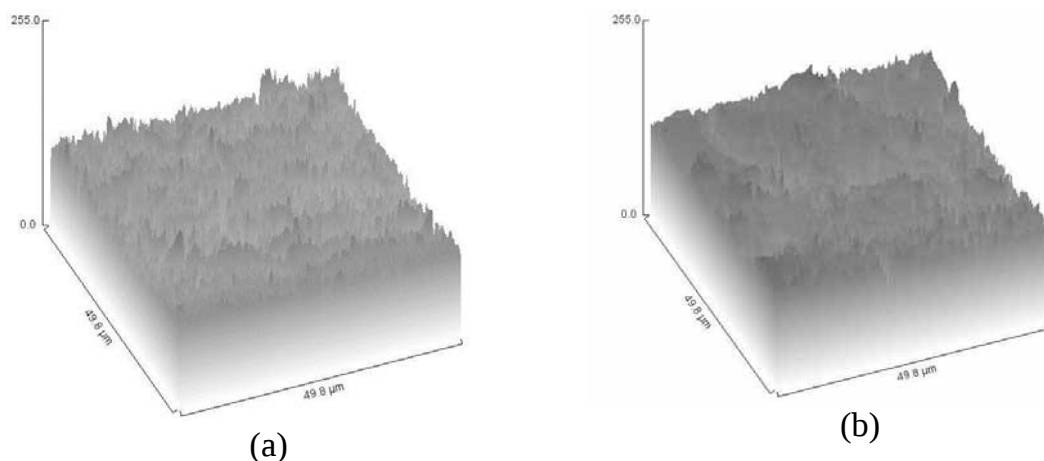
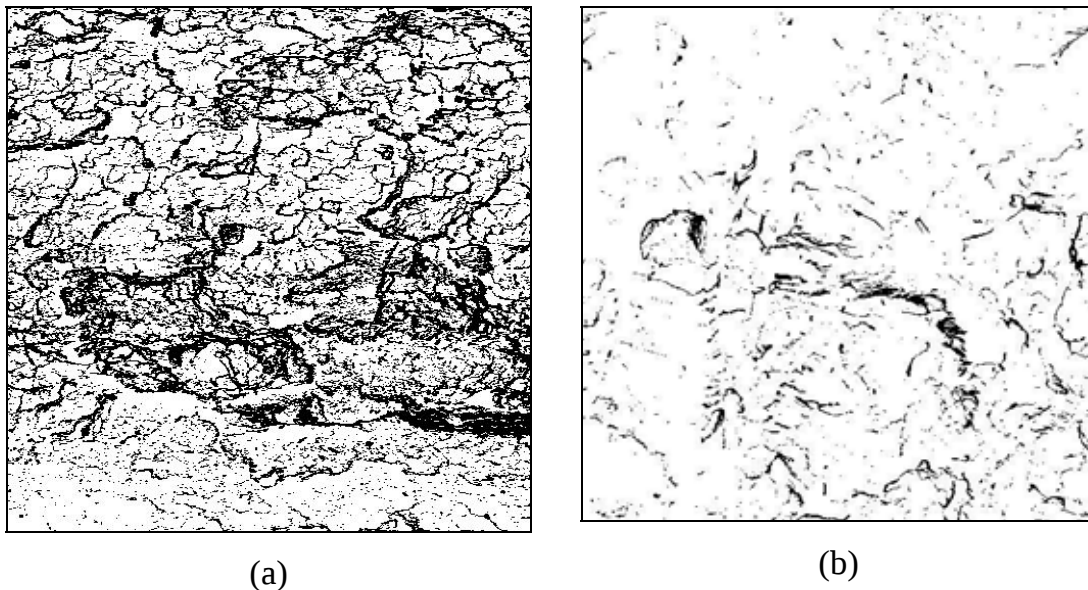


Figura 41 - Mapa de elevação da (a) amostra do processamento (1); (b) amostra do processamento (2).

Essa observação pode ser também atestada na segmentação das duas imagens. Neste processo, divide-se a imagem em regiões que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação: no caso, a região plana é separada das elevações. De acordo com os histogramas da Figura 40, podem-se definir essas regiões entre os valores de 172-255. Com base nessas considerações, as duas regiões das duas amostras são apresentadas na Figura 42.



Figuar 42 - Segmentação da (a) amostra do processamento (1); (b) amostra do processamento (2).

A região em preto representa a elevação na topografia das duas amostras, e como se pode observar, a região da Figura 42a é mais rugosa que a região da Figura 46b. Quantitativamente, a região (a) e (b) possuem, respectivamente, 30% e 5.0 % de elevação na topografia.

Nas medidas de condutividade elétrica em 4 pontos realizadas nas amostras homogeneizada/injetada e extrudada/injetada, verificou-se que os materiais obtido com a reciclagem de poliestireno expandido são isolante, a medida que este não gerou nenhum sinal durante o ensaio. Esta característica é necessária para que o material possa ser utilizado como substrato de placa de circuito impresso.

5 CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados obtidos nesta dissertação foi possível avaliar a viabilidade da reciclagem de poliestireno expandido para aplicação em placas de circuito impresso, visto a reprodutibilidade e qualidade do material obtido.

Na dissolução há reação entre o solvente e o EPS, a qual diminui a qualidade do material obtido para a aplicação desejada, e ainda dificulta a reprodutibilidade do processo, inviabilizando o uso desta técnica para o fim estudado.

No método de extrusão seguido de prensagem obteve-se um material pouco resistente mecanicamente, impossibilitando a fabricação de substratos qualificados para placas de circuito impresso. Este fato pode ser explicado pela presença excessiva de vazios e pela baixa homogeneização na distribuição do material pelo molde.

No método de extrusão seguido de injeção obteve-se um material homogêneo, mas com presença de descontinuidades, com baixa resistência mecânica, boa reprodutibilidade e isolante, não sendo a melhor opção para a aplicação desejada.

Observa-se que a extrusão não elimina totalmente o ar existente no material, o que fragiliza o produto final. Porém a injeção homogeneiza a distribuição do material pelo molde e melhora a resistência mecânica do material.

No método utilizando o homogeneizador termocinético seguido de injeção o material apresentou-se homogêneo, ausente de poros, com boa resistência mecânica e boa reprodutibilidade. Além disso, apresentou características de ductilidade, flexibilidade e caráter isolante, as quais são necessárias para a aplicação estudada. Desta forma, conclui-se que este método é viável e adequado para a produção de placas de circuito impresso a partir da reciclagem de poliestireno expandido.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 790**: standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. United States, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos - classificação. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO - ABRAPEX. **Mercado de EPS e Reciclagem**. Disponível em: <<http://www.abrapex.com.br>>. Acesso em: 20 de mar. 2011.

BIDONE, F.R.A. **Metodologias e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

BLECK, D.; WETTBERG, W. Waste collection in developing countries – Tackling occupational safety and health hazards at their source. **Waste Management**. April, 2012. In Press.

CALDERONI, S. **Os Bilhões perdidos no lixo**. 4.ed. São Paulo: Humanitas, 2003.

CIRVALE. Disponível em: <www.cirvale.com.br>. Acesso em: 03 mar. 2011.

DOWER, N. Development issues enviromental. In:__. **Encyclopedia of applied ethics**. 2.ed. San Diego: Academic Press, 2012. p.789-799.

FERNANDES, J.U.J. **Lixo**: limpeza pública urbana. Belo Horizonte: Del Rey, 2001.

FRANCA, A.B.M.; VIANA, M.F.A.; RODRIGUES, M.F. **Estudo comparativo entre laje convencional e lajes com blocos de EPS nas modernas construções de concreto armado**. João Pessoa : Universidade Federal da Paraíba, 1997.

GONÇALVES, C.L. **Definindo a questão do lixo urbano**: consumo, lixo e meio ambiente. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 1997.

GRIPPI, S. **Lixo**: reciclagem e sua história; guia para prefeituras brasileiras. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

GRUPO POLIMEX. **Reciclabilidade y ecologia** . México: Grupo Polimex, 1997. Disponível em: <<http://www.polimex.com.mx/reciclado.html> >. Acesso em: 20 out. 2011.

JABBOUR, J. et al. Internationally agreed environmental goals: a critical evaluation of progress. **Environmental Development**. v.3, p 5-24, may, 2012.

JARDIM, N. S. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT, 1995. (Publicação IPT, 2163).

LA MARCA, F. et al. Separation of plastic waste via the hydraulic separator multidune under different geometric configurations. **Waste Management**. v.32, p.1306-1315, july, 2012.

LEITE, P.R. **Logística reversa**: meio ambiente e competitividade. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

MADEHOW. Disponível em: <www.madehow.com>. Acesso em 21 jan. 2012.

MANSOR, M. T. C. et al. **Resíduos Sólidos**. São Paulo : Secretaria do Meio Ambiente, 2010.

MICHAELI, W. et al. **Tecnologia dos plásticos**: livro texto e de exercícios. São Paulo : Edgard Blucher, 1995. 205p.

OEHLERS, D. J.; SERACINO, R. Flexural strength and ductility, In: __. **Design of FRP and Steel Plated RC Structures**. [S.l.]: Elsevier Science, 2004. p. 46-99.

PACHECO, E. B. A. V.; RONCHETTI, L. M.; MASANET, E. An overview of plastic recycling in Rio de Janeiro. **Resources, conservation and recycling**, Amsterdam. v.60, p 140-146, dec, 2011.

PATEL, M. et al. Recycling of plastic in Germany. **Resources, conservation and recycling**, Amsterdam. v.29, p 65-90, may, 2000.

PIVA, A. M.; WIEBECK, H. **Reciclagem do plástico**: como fazer da reciclagem um negócio lucrativo. São Paulo: Artliber, 2004.

PLASTIVIDA. Disponível em: <<http://www.plastivida.org.br>>. Acesso em 27 jan. de 2012 .

RAJENDRAN, S., et al. Environmental impact assessment os composites containing recycled plastics. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam. v.60, p.131-139, mar. 2012.

ROHR, J.R.; MARTIN, L.B. Reduce, reuse, recycle scientific reviews. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam. v.27, p.192-193, apr. 2012.

ROSSACCI, J.; SHIVKUMAR, S. Bead fusion in polystyrene foams. **Journal of Materials Science**, Norwell. v.38, n.2, p. 201-206, 2003.

SEKHARAN, R. V., ABRAHAM, B. T., THACHIL, E. T, Utilization os waste expanded polystyrene: blends with sílica-filled natural rubber. **Materials & Design**, Survey. v. 40, p.221-228, sept. 2012.

SILVEIRA, I. **Reciclagem de isopor**. Disponível em: <<http://www.tvecologia.com.br>>. Acesso em: 22 nov. 2010.

TECHNICAL INFORMATION. **Properties – General** . Ludwigshafen, Alemanha.1992. Catálogo Técnico da Basf, n. 22246. 1CD-ROM

TEIXEIRA, E.N.; BIDONE, F.R.A. **Conceitos básicos. metodologias e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

WILSON, P. Printed Circuit. IN:__. **The circuit designer's companion**. 3rd ed. [S.l.]: Newnes, 2012. p.45-84.

ZANIN, M. ; MANCINI, S. D. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. São Carlos : Ed. Da UFSCar, 2004. 143p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALBANO, C. et al. Thermal, mechanical, morphological, thermogravimetric, rheological and toxicological behavior of HDPE/ Seaweed Residues Composites. **Composite Structures**, v.71, n.3-4, p. 282-288, 2005.

AL-SALAM, S.M.; LETTIERI P.; BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. **Waste management**, Oxford, v.29, p.2625-2643, july, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 2550**: standard test method for thermal stability by thermogravimetry . United States, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11948**: poliestireno expandido para isolamento térmica – determinação da flamabilidade. São Paulo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11949**: poliestireno expandido para isolamento térmica – determinação da massa específica aparente. São Paulo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7973**: poliestireno expandido para isolamento térmica – determinação de absorção de água. São Paulo, 2007.

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**. 2011. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

BGA – Departamento Federal De Sanidad. **Separación de los residuos de combustión de los sólidos**. Espanha: Hoja Federal de Sanidad, 1990.

BOESIGER, E.; GIRSBERGER, H. **Le Corbusier 1910-65**. Barcelona: Gustavo Gili, 1971.

BURAKOWSKI, L. **Estudo da interface de compósitos termoplásticos estruturais processados a partir de fibras de carbono com superfícies modificadas**. 2001. 189f. Dissertação (Mestrado em Física – Física de Plasmas) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

CALLISTER JUNIOR, W. D. ; SOARES, S. M. S.; MIRANDA, P. E. V. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 589p.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo : ArtLiber, 2004.

CENTRAL EPS - Tecnologia e serviços. **Características exigíveis para o poliestireno expandido**. São Paulo: Catálogo Técnico da Basf, Shell, Resinor e Tupy.

COSTA, R. A. A. **Materialografia quantitativa de micro estruturas complexas baseada na segmentação por texturas**. 2006. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

CRUZ, T.G. **Monitoramento por microscopia óptica e processamento digital de imagens do processo de conformação cerâmica por conformação com amidos comerciais**. 2007. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica -

Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

FELISBERTI, M. I. **Caracterização de blendas poliméricas através de análise térmica e termomecânica.** Campinas, 1995. Apostila.

GIROTTI, E.M.; SANTOS, I.A. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente. **Química Nova**, São Paulo, v.25, n.4, p.639-647, 2002.

GROTE, Z. C. V. **Estudo do uso do EPS na construção civil:** uma opção para a conservação de energia, 1999. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *compus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1999.

HENEKE, E. G. II. Destructive and nondestructive tests. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **Engineered materials handbook:** composites. Metals Park: ASM , 1987. v.1, p.774-778.

HOLMAN, J. P. **Transferência de calor.** São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1983. 639 p.

INFORMACIONES TÉCNICAS. **Propriedades:** resistência química dos materiais expandidos de *styropor*. Ludwigshafen, Alemanha, 1992. Catálogo Técnico da Basf, n. 33684. 1 CD-ROM.

INFORMACIÓN TÉCNICA. **Reciclar/eliminar:** procedimientos de reciclado y eliminación de materiales expandidos de EPS usados. Ludwigshafen, Alemanha, 1992. Catálogo Técnico da Basf. n. 23734. 1CD-ROM.

JOSEPH, P. V. et al. The thermal and crystallization studies of short sisal fiber

reinforced polypropylene composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Kidlington. v. 34, n.3, p. 253-266, 2003.

KASAP, S. O. et al. Ultrasonic evaluation of thermal fatigue of composites. **Journal of Engineering Materials and Technology**, New York. v.114, n.2, p.132-136, 1992.

MA, X.; YU, J.; KENNEDY, J. F. Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites. **Carbohydrate Polymers**, Barking. v.62, n.1, p. 19-24, 2005.

MANFREDI, L. B. et.al. Thermal degradation and fire resistance of unsaturated polyester, modified acrylic resins and their composites with natural fibres. **Polymer Degradation and Stability**, Barking. v.91, n.2, p. 255-261, 2006.

MILARE, E. **Legislação Ambiental do Brasil**. São Paulo: APMP, 1991. 636 p.

MORAIS, W. A. ; D'ALMEIDA J. R. M. Comparação do comportamento à flexão com restrições à deflexão de placas de compósitos de matriz polimérica epoxídica em função do tipo de fibra de reforço. **Polímeros : ciência e tecnologia**, São Carlos. v.13,n.3,p.181-187, 2003.

MULINARI, D. R; SILVA, M. L. C. P.; SILVA, G. L. J. P. Adsorção de íons dicromato nos compósitos celulose/ $ZrO_2.nH_2O$ preparados pelos métodos da precipitação convencional e em solução homogênea. **Química Nova**, São Paulo. v. 29, n. 3, p. 496-500, 2006.

MULINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 111f. Dissertação (Doutorado em

Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

PIPES, R. B. **Nondestructive evaluation and flaw criticality for composite materials** : a symposium. Philadelphia : ASTM, 1979.

REIMER, L. **Scanning electron microscopy**: physics of image formation and microanalysis. Berlin: Springer, 2Ed, 1998. 527p.

SHIINO, M.Y. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos processados por RTM para aplicação aeroespacial**. 2011. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SILVEIRA, J.L; GROTE, Z. V.; TRAVASSOS; S.E.P. Análise comparativa entre materiais empregados na construção de uma câmara frigorífica: styrobloc e alvenaria de tijolos maciços: transferência de calor. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA, 7. 1998, Salta. **Anais...** Salta: INIQUI, 1998. p.476-480.

SILVEIRA, J.L. **Cogeração disseminada para pequenos usuários**: estudo de casos para o setor terciário. 1994. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

STRAUSS, W. **Air pollution control**. New York: Wiley-Interscience, 1971. 449 p.

STYROPOR – EXPANDABLE POLYSTYRENE. **Construction with Styropor**. São Paulo. 1993. Catálogo Técnico da Basf.

SULKOWSKI, W. W., et al. Preparation and properties os flocculants derived from polystyrene waste. **Polymer Degradation and Stability**, Barking. v.90, p.272-280, november, 2005.

SURESH, G. A. **Process modeling in composites manufacturing**. New York : Marcel Dekker, 2003. 113p.

YANG, Y., et al. Recycling of composite materials. **Chemical Engineering and Process Intensification**, Lausanne. v.51, p.53-68, jan. 2012.