UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
1999



1110000419

"Madeira-Plástica: Estudo de Propriedades e Aplicações"

HANS CRISTIAN BOROWSKI

113

unesp

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

MADEIRA-PLÁSTICA:

ESTUDO DE PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

HANS CRISTIAN BOROWSKi

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Nazem Nascimento
Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic

419

419

Guaratinguetá
1999

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

Ficha catalográfica preparada na Seção de Aquisição e Tratamento da Informação da Biblioteca - FEG/UNESP

Borowski, Hans Cristian
B736m Madeira-plástica, estudo de propriedades e aplicações/Hans Cristian Borowski. Guaratinguetá, 1999
107f.: il.; 30cm

Bibliografia: f.99-107
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 1999.
Orientador: Prof. Dr. Nazem Nascimento
Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic

1. Propriedades mecânicas - Plástico I. Título

CDU 541.68

T541.68
B736m

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

"MADEIRA-PLÁSTICA: ESTUDO DE PROPRIEDADES E APLICAÇÕES"

HANS CRISTIAN BOROWSKI

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

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. NAZEM NASCIMENTO
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. JOSE ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Unesp-Feg

Prof. Dr. PAULO CARLOS KAMINSKI
USP

Dezembro de 1999

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

DADOS CURRICULARES

HANS CRISTIAN BOROWSKI

NASCIMENTO: 16. 09. 1961 - SANTO ANDRÉ / SP

FILIAÇÃO: Hans Adolf Borowski
Lygia Ghirardello Borowski

1980/1989 Graduação em Engenharia Geológica pela Escola de Minas e Metalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto.

1991/1992 Especialização em Engenharia de Saúde e Segurança do Trabalho pela Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

1992/1996 Sócio-gerente da firma Polinco Indústria e Comércio de Polímeros Ltda..

1997/1999 Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, nível de mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Margareth,
amiga e companheira em todos os momentos.

À minha sogra Maria José Barbosa,
pelo apoio e incentivo.

Aos meus pais pelo apoio e compreensão.

Ao amigo Fernando Porto e todos os que
me incentivaram a avançar neste estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Nazem Nascimento pelo incentivo e orientação na preparação deste trabalho,

ao Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald pela amizade e apoio,

ao Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic, co-orientador e incentivador,

ao Prof. Dr. Rogério de Oliveira Hein, por sua importante colaboração,

aos Professores da FEG/UNESP, pela dedicação em nos preparar em novos e importantes conhecimentos,

aos Técnicos da FEG/UNESP, que em muito colaboraram para a realização desta pesquisa,

ao Laboratório de Química da FEG/UNESP, por permitir os ensaios de densidade aparente,

às Funcionárias da biblioteca da FEG/UNESP pela eficiência e boa vontade,

à Obra Social Nossa Senhora da Glória por ter cedido as amostras de madeira-plástica e ao Eng. Friedrich Michael Bastartz por suas importantes informações,

ao Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira da USP de São Carlos pela realização dos ensaios mecânicos da madeira-plástica nos padrões para madeira,

ao Departamento de Materiais da FAENQUIL, pela realização dos ensaios mecânicos da madeira-plástica segundo as normas para plásticos,

ao Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, pelas importantes informações relacionadas às propriedades das madeiras,

aos colegas, que sempre auxiliaram nos momentos de dúvida,

à CAPES por conceder a bolsa de estudos,

e a todas as demais pessoas que colaboraram direta ou indiretamente pela realização deste trabalho.

unesp

Uma longa viagem começa com um único passo.

Lao-Tsé

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO.....15

1.1. Considerações.....15

1.2. Justificativas.....16

1.3. Objetivos da pesquisa.....17

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....18

2.1. O plástico.....18

2.1.1. Classificações.....19

2.1.2. Cargas e aditivos.....20

2.1.3. Características gerais dos plásticos.....22

2.3.4. Plásticos e seus usos.....28

2.2. Resíduos sólidos urbanos e a questão do plástico.....33

2.3. Propostas de solução para o resíduo plástico.....40

2.3.1. Redução.....42

2.3.2. Reutilização ou reuso.....43

2.3.3. Biodegradabilidade.....44

2.3.4. Reciclagem.....45

2.4. A madeira.....52

2.4.1. Classificações e características gerais das madeiras.....52

2.4.2. Propriedades mecânicas das madeiras.....54

2.4.3. Usos e mercados.....58

3. AVALIAÇÃO DA MADEIRA-PLÁSTICA.....62

3.1. Introdução.....62

3.1.1. O processo de fabricação.....64

3.1.2. Características do material em estudo.....69

3.1.3. Aplicações com interesse comercial.....71

3.2. Procedimentos Experimentais.....73

3.2.1. Os materiais.....73

3.2.2. Metodologia.....74

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....82

4.1. Densidade aparente.....82

4.2. Propriedades mecânicas.....82

4.2.1. Ensaios de tração padrão NBR 7190.....82

4.2.2. Ensaios de compressão padrão NBR 7190.....83

4.2.3. Ensaios de tração padrão ASTM D 638.....83

4.2.4. Ensaios de compressão padrão ASTM D 695.....85

4.2.5. Ensaios de flexão padrão ASTM D 790.....86

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....91

5.1. Propostas de uso para a madeira-plástica.....94

unesp

5.2. Sugestões para o processo de fabricação.....96

6. CONCLUSÕES.....97

7. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....98

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Representação de cadeias carbônicas lineares (A), ramificadas (B), com ligações cruzadas (C) e em rede (D).....19

FIGURA 2 - Perfil de consumo do polietileno de baixa densidade no Brasil. 31

FIGURA 3 - Perfil de consumo do polietileno de alta densidade no Brasil....31

FIGURA 4 - Perfil do consumo do polipropileno no Brasil.....32

FIGURA 5 - Perfil de consumo do poliestireno no Brasil.....32

FIGURA 6 - Perfil de consumo do poli (cloreto de vinila) no Brasil.....33

FIGURA 7 - Composição do lixo da cidade de São Paulo.....38

FIGURA 8 - Destino do lixo da cidade de São Paulo.....39

FIGURA 9 - Esquema da composição do caule de árvore em seção transversal.....53

FIGURA 10 - Visão externa da extrusora.....67

FIGURA 11 - Visão do sistema giratório onde são colocados os moldes; à direita, acima, se observa o mecanismo que expulsa a peça acabada do molde..... 67

FIGURA 12 - Fluxograma do sistema de produção da madeira-plástica da Obra Social Nossa Senhora da Glória.....68

FIGURA 13 - Região de extração do corpo-de-prova de tração no padrão da norma ASTM D 638.....75

FIGURA 14 - Região de extração do corpo-de-prova de tração no padrão da norma NBR 7190.....76

FIGURA 15 - Região de extração do corpo-de-prova de compressão no padrão da norma NBR 7190.....77

FIGURA 16 - Região de extração do corpo-de-prova de compressão no padrão da norma ASTM D695.....78

FIGURA 17 - Região de extração do corpo-de-prova de flexão.....79

FIGURA 18 - Seção rompida em tração no padrão da ASTM D 638 para material de base poliestireno, com grão de PET favorecendo a fratura.....88

FIGURA 19 - Seção rompida em tração no padrão da ASTM D 638 para material de base polipropileno, com grão de PET favorecendo a fratura.....88

FIGURA 20 - Seção rompida em tração no padrão da ASTM D 638 para material de base polipropileno, em grão de PVC decomposto.....89

FIGURA 21 - Visão lateral de corpo-de-prova de flexão rompido em contato com grão de alumínio.....89

FIGURA 22 - Corpo-de-prova rompido de compressão no padrão NBR 7190 de material de base poliestireno.....90

FIGURA 23 - Corpo-de-prova rompido de compressão no padrão NBR 7190 de material de base polipropileno.....90

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Temperatura de decomposição, ponto de fulgor e ponto de ignição de alguns polímeros.....24

TABELA 2 - Densidade específica, resistência à tração e módulo de elasticidade em tração de alguns plásticos.....26

TABELA 3 - Alongamento na ruptura, coeficiente de Poisson e tenacidade à fratura de alguns plásticos.....26

TABELA 4 - Calor específico, temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão de alguns plásticos.....27

TABELA 5 - Coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica de alguns plásticos.....27

TABELA 6 - Consumo aparente dos principais plásticos, em toneladas, entre 1995 e 1997, no Brasil..... 28

TABELA 7 - Materiais e tipo de plástico associado.....30

TABELA 8 - Propriedades das madeiras.....56

TABELA 9 - Classificação dos produtos sólidos de madeira.....59

TABELA 10 - Produtos sólidos de madeira: preços médios praticados no Brasil - 1998 (em US$/m^3).....61

TABELA 11 - Resultados dos ensaios realizados no CTA.....70

TABELA 12 - Resultados dos ensaios realizados na Universidade de Darmstadt, Alemanha.....71

BOROWSKI, H. C. *Madeira-plástica: estudo de propriedades e aplicações.* Guaratinguetá, 1999, 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

O produto resultante da combinação de resíduos plásticos, denominado "madeira-plástica", visa ao baixo custo e propriedades mecânicas que o tornem competitivo em aplicações onde a madeira tem sido utilizada. As condições específicas a cada local onde é produzida, como a composição básica (dependente dos resíduos disponíveis) e o tipo de sistema de equipamentos utilizado, determinam variações no produto final e, conseqüentemente, nas características mecânicas. A partir de uma planta produtora situada em Guaratinguetá, SP, foi feita uma avaliação do tipo de material produzido, segundo suas características mecânicas principais, comparadas com as dos plásticos puros e madeiras mais utilizadas. Considerando esses resultados e a observação do processo de produção, são feitas sugestões de procedimentos para possibilitar melhorias no material resultante e propostas aplicações relacionadas com as propriedades observadas.

PALAVRAS-CHAVE: Lixo, madeira-plástica, plásticos, propriedades mecânicas, reciclagem, resíduo sólido.

unesp

BOROWSKI, H. C. *Madeira-plástica: study of properties and aplications.* Guaratinguetá, 1999, 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

The resulting product of a plastics residues combination, named "madeira-plástica", seek for low cost and mechanical properties who make it competitive to applications where wood have been utilized. The specific conditions of each local where it is produced, like basic composition (dependent of the disponible residues) and kind of equipments system utilized, determine variations in the final product and, consequently, in the mechanical characteristics. From a plant situated in Guaratinguetá, SP, a evaluation was made of the kind of produced material, according to its main mechanical characteristics, compared to that from pure plastics and more utilized woods. Considering this results and the observation of the production process, sugestions of proceedings to enable increments in the resulting material are made and applications related with the observed properties are proposed.

KEYWORDS: Mechanical properties, plastic-lumber, plastics, recycling, solid residue, waste.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações

Os resíduos produzidos por nossa atual sociedade de consumo são motivo de preocupação sempre que ameaçam extrapolar as áreas que podem ser destinadas ao seu descarte, e sempre que ameaçam a saúde e o conforto das pessoas que têm que conviver com lixões nas proximidades de seus lares ou que têm sua água contaminada por poluentes; isto desde muito antes deste assunto ter ganhado um espaço importante nos meios de comunicação e no interesse da sociedade como um todo, o que pode ser identificado do início da década de 1970 em diante.

O lixo plástico possui grande importância neste problema, por dificultar a degradação adequada dos demais resíduos, por representar uma parcela significativa, em volume, do lixo descartado, e por ser um material resistente à degradação, podendo permanecer por décadas, talvez séculos, no ambiente onde é deixado.

O material denominado madeira-plástica e seu processo de fabricação, aqui estudados, são um exemplo de reciclagem mecânica que abre uma alternativa de solução ao problema do resíduo plástico, apresentando elementos inovadores que vêm ao encontro de algumas das dificuldades latentes na aplicação dos processos de reciclagem tradicionais.

unesp

1.2. Justificativas

O material que é objeto desta pesquisa é oriundo de um sistema de processamento recebido como doação do governo alemão à Obra Social Nossa Senhora da Glória, e instalado em sua unidade de Guaratinguetá, SP.

O sistema apresenta diferenças marcantes em relação à reciclagem tradicional, que separa e processa os plásticos segundo seus diferentes tipos; este sistema dispensa, em princípio , a seleção prévia e a limpeza do material, aceitando uma proporção elevada de impurezas no processo, em patamares impensáveis para os sistemas tradicionais, o que pode viabilizar a reciclagem de certos resíduos plásticos que antes só poderiam ser descartados.

A simplificação do processo envolvido em relação aos processos tradicionais indica a existência de vantagens no custo de processamento e na exigência de qualificação do pessoal envolvido, havendo ainda, uma vez conhecidas as características oferecidas pelo material, possibilidade de se desenvolver o mercado consumidor onde haja vantagens comparativas de preço e características técnicas em relação a outros materiais, entre os quais a madeira; nesse caso haveria a solução tanto do problema ambiental do resíduo plástico como do da madeira, cujo interesse nas espécies mais nobres acaba levando ao desmatamento indesejável de florestas nativas.

Em locais onde a quantidade de cada tipo de plástico descartado é insuficiente para justificar o processamento em separado, este processo se apresenta como uma alternativa interessante para dar destino aos resíduos existentes.

unesp

1.3. Objetivos da pesquisa

A presente pesquisa tem como objetivos:

- O conhecimento geral das características dos plásticos, sua reciclagem e fatores que afetam seu comportamento, com ênfase dada ao comportamento mecânico.
- A compreensão do processo de fabricação do produto denominado *madeira-plástica*, de modo a que haja a possibilidade de desenvolvimento futuro de sistemas similares com características melhoradas.
- A determinação das propriedades do material, com ênfase nas propriedades mecânicas, fazendo-se comparações com outros tipos de plásticos e madeiras.
- A indicação das aplicações a que o material possa se destinar.
- A sugestão de modificações no processo que o torne mais eficiente ou que melhore as características do material produzido.

unesp

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O plástico

O termo *plástico*, de origem grega, que significa "adequado à moldagem", representa o material cujo componente principal é um polímero orgânico sintético, também chamado de resina, que é uma substância amorfa ou uma mistura, de peso molecular intermediário ou alto, insolúvel em água, mas solúvel em alguns solventes orgânicos, e que, à temperatura ordinária, é solida ou um líquido muito viscoso, que amolece gradualmente por aquecimento.[1]

Polímeros, por sua vez, são moléculas relativamente grandes, com pesos moleculares da ordem de 10^3 a 10^6, em cuja estrutura se repetem unidades simples conhecidas como *meros*, originados de produtos conhecidos como *monômeros*.[1]

Como exemplo, moléculas de etileno podem ser *polimerizadas* (unidas em uma cadeia polimérica) para obter o polímero polietileno.

Materiais poliméricos podem ainda ser a base de *borrachas* ou *elastômeros*, *fibras*, *revestimentos* (como tintas e vernizes) e *adesivos*, entre outros usos.[1]

Embora os plásticos tenham iniciado seu desenvolvimento no século XIX, com as primeiras modificações de polímeros naturais, como a celulose, apenas em 1907 foi patenteado o primeiro polímero sintético, conhecido como *bakelite*; novos polímeros foram sendo desenvolvidos nas décadas seguintes, e atualmente existem algumas dezenas de classes, subdivididas em vários tipos, que combinados entre si e/ou modificados por cargas e aditivos se desdobram em milhares dos chamados *grades*, variedades de plásticos voltadas para fins específicos.[2]

unesp

2.1.1. Classificações

Os plásticos, como os polímeros que os compõe, podem ser classificados segundo a estrutura química, em classes como *poliamidas*, *poliésteres*, *poliéteres*, etc., englobando em cada classe vários tipos quimicamente semelhantes.[3]

Em relação à forma da cadeia polimérica que forma a resina, estas podem ser lineares, ramificadas, com ligações cruzadas ou arranjadas em rede, como ilustrado na FIGURA 1 ; conforme as cadeias se apresentem haverá um comportamento mecânico e perante o aquecimento diferenciado; cadeias lineares são mais dúteis e diminuem facilmente sua viscosidade com o aumento da temperatura; cadeias ramificadas apresentam essas propriedades em menor grau; ligações cruzadas e em rede são mais típicas de plásticos termofixos e elastômeros, que são menos afetados pelo calor.[4]

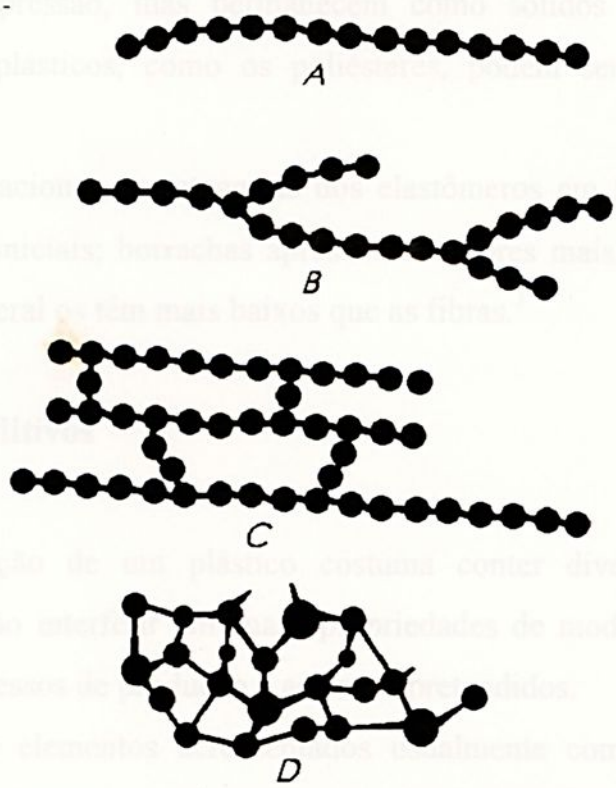


FIGURA 1 - Representação de cadeias carbônicas lineares (A), ramificadas (B), com ligações cruzadas (C) e em rede (D).[4]

Plásticos podem ser classificados também segundo o comportamento perante o aquecimento, denominando-se como *termoplásticos* quando podem ser fundidos por aquecimento e solidificados por resfriamento mais de uma vez, e *termofixos* ou *termorrígidos* quando após um primeiro aquecimento ou tratamento assumem uma estrutura molecular que os tornam insolúveis e infusíveis pelo aquecimento.[3]

Plásticos apresentam comportamento mecânico diferenciado do grupo das *borrachas* ou *elastômeros,* que exibem grande alongamento elástico à temperatura ambiente, e as *fibras,* que apresentam elevada relação entre o comprimento e as dimensões laterais; estas possuem estreita faixa de extensibilidade e são estáveis na faixa de temperatura entre -50 e +150°C, com pouca alteração das propriedades mecânicas; muitas vezes são infusíveis.[3]

Os plásticos podem ser moldados por processos que envolvem temperatura e/ou pressão, mas permanecem como sólidos à temperatura ambiente; alguns plásticos, como os poliésteres, podem ser usados como fibras.[1]

Pode-se relacionar as categorias dos elastômeros em função de seus módulos elásticos iniciais; borrachas apresentam valores mais baixos que os plásticos, que em geral os têm mais baixos que as fibras.[3]

2.1.2. Cargas e aditivos

A composição de um plástico costuma conter diversos tipos de substâncias, que irão interferir em suas propriedades de modo a que sejam adequadas aos processos de produção e aos usos pretendidos.

Cargas são elementos acrescentados usualmente com o intuito de reduzir custos (são baratos e normalmente usados em proporção elevada) e modificar as propriedades mecânicas; não devem se solubilizar ou reagir com

o polímero, permanecendo difundidas homogeneamente; caem nessa categoria a serragem de madeira, pós metálicos, fibras ou esferas de vidro, talco, caulim e outros produtos.[2]

Aditivo é um termo genérico que engloba uma ampla variedade de produtos, entre os quais se incluem:

Lubrificantes: abrangem uma infinidade de materiais que visam facilitar o movimento do polímero em relação a si mesmo, fazendo com que as moléculas deslizem umas em relação às outras e a outros materiais, reduzindo o atrito com a máquina que o processa e o atrito superficial da peça acabada; entre os lubrificantes mais usados estão ésteres, álcoois graxos, ácidos graxos, aminas graxas, estearatos metálicos, polietilenos, silicones, etc..[2]

Estabilizantes: protegem o plástico contra a degradação, normalmente produzida pela ação do calor e da radiação ultravioleta (UV); em geral são usados sais metálicos orgânicos e inorgânicos, óleos e ésteres epoxidados e negro de fumo.[2,5]

Antioxidantes: evitam ou retardam a degradação dos plásticos por oxidação, devido à influência atmosférica ou durante a permanência em altas temperaturas, enquanto é processado; no caso de proteção contra os efeitos atmosféricos se utilizam negro de fumo e compostos fenólicos; para agir durante o processamento utilizam-se derivados de fosfitos; tioésteres atuam em ambas condições.[2,5]

Plastificantes: são empregados para conferir flexibilidade a resinas rígidas ou duras, agindo como solventes, mas sem sua volatilidade; para isso são utilizados o isobutanol, álcool amílico, álcool tridecílio, e outros, combinados

a reagentes como anidrido ftálico, anidro maléico, ácido fumárico, ácido adípico, etc..[2]

Antiestáticos: como os plásticos são bons isolantes elétricos, o atrito durante o processamento em ambiente de pouca umidade atmosférica pode gerar cargas elétricas que causam diversos problemas, como choques em operadores; os produtos antiestáticos costumam atuar diminuindo o atrito e favorecendo a dissipação dessas cargas; entre os produtos utilizados encontram-se ésteres fosfáticos, amônia quaternária, sorbitol, glicerina e ésteres poliglicóis de ácidos graxos.[2]

Retardantes de chama: conferem aos produtos produtos uma maior dificuldade de entrar em ignição ou propagar chama; exemplos destes são o trihidrato de alumina, o óxido de antimônio, boratos, compostos de bromo, compostos de cloro, molibdênio e compostos de fósforo.[6]

2.1.3. Características gerais dos plásticos

Embora plásticos sejam materiais extremamente variados em suas características, algumas de suas propriedades, com maior interesse para a proposta dessa pesquisa, e que podem ser consideradas como representativas dos plásticos de maior consumo, são relacionadas a seguir:

Viscoelasticidade: é uma característica marcante dessa classe de materiais, e significa que o material pode se comportar simultaneamente como se fosse um sólido elástico e como se fosse um líquido viscoso quando submetido à tensão; neste caso, haverá uma deformação elástica instantânea e recuperável e uma deformação plástica dependente do tempo que não é recuperável pela retirada da tensão.[4] A característica de apresentar deformação dependente do tempo é

denominada *fluência*, e pode representar uma restrição real para certas aplicações sob carregamento estático, mesmo que a baixos valores de tensão; é fortemente dependente da natureza química da resina e particularmente pela existência de ligações cruzadas e presença de cargas e impurezas, que dificultam o deslizamento das cadeias poliméricas entre si.[4]

Flamabilidade: plásticos em geral entram em ignição com certa facilidade e são produtos de elevado conteúdo calorífico na combustão; com algumas exceções, como o PVC e o policarbonato, os principais plásticos, incluídos o poliestireno e o polipropileno, não apresentam característica de auto-extinção de chama (a chama no material se extingue se for afastada de uma fonte externa de calor) e, dependendo do uso pretendido, essa característica tem que ser adicionada ao produto, misturando-se agentes químicos em sua composição, ou fazendo-se um revestimento próprio, em geral uma solução bem mais onerosa; os produtos mais utilizados para dar característica de auto-extinção foram mencionados no tópico dos aditivos e costumam ser mais eficientes quando combinados entre si.[7]

Os produtos halogenados, porém, mais do que outros, sofrem restrições por produzirem gases tóxicos ao se decomporem e por gerarem elementos que interferem na camada de ozônio da atmosfera.[7]

Na TABELA 1 podem ser observadas as características de alguns plásticos relacionadas a esse tópico:

unesp

TABELA 1 - Temperatura de decomposição, ponto de fulgor e ponto de ignição de alguns polímeros.[7]

Polímero	Temperatura de decomposição (°C)	Ponto de fulgor (°C)	Ponto de ignição (°C)
Polietileno	340 - 440	340	350
Polipropileno	320 - 400	320	350
Poliestireno	300 - 400	350	490
Poli(cloreto de vinila)	200 - 300	560	450
Poli(tetraflúor-etileno)	500 - 550	390	580
Poli(metil metacrilato)	180 - 280	300	430
Poliacrilonitrila	250 - 300	480	560
Poliamida 6	300 - 350	420	450
Poliamida 66	320 - 400	490	530
Celulose	280 - 380	210	400

Amortecimento: plásticos em geral possuem alta capacidade de amortecimento, que é o poder de dissipar energia mecânica, em geral através de calor (uma pequena parte da energia pode ser absorvida em mudanças na estrutura interna do material); como costumam ser maus condutores de calor e têm, em geral, uma baixa temperatura de fusão, quando solicitados em carregamentos cíclicos de alta freqüência, ou em carregamentos de baixa freqüência, mas com altos níveis de tensão, pode haver a ocorrência de falhas térmicas pelo aquecimento do material, ou a geração de trincas e vazios que acelerarão o desenvolvimento de falhas por fadiga; esse problema afeta de maneira mais significativa termoplásticos como o polietileno que plásticos termofixos, por esses últimos apresentarem sólidas ligações iônicas unindo os segmentos poliméricos.[4,8]

Propagação de trinca por fadiga: à semelhança dos metais, a taxa de propagação de trincas por fadiga em plásticos depende fortemente da amplitude da faixa de intensidade de tensão e pode se desenvolver em níveis abaixo do limite elástico do material; alguns plásticos apresentam um *limite inferior de fadiga*, que é a tensão abaixo do qual a vida da amostra é

unesp

considerada infinita ou a fratura ocorre após um número elevado de ciclos, usualmente 10^7; outros plásticos não aparentam ter esse limite; plásticos de polímeros mais cristalinos ou de mais alto peso molecular possuem maior resistência `a fadiga que os demais.[9]

Resistência química: é uma característica fortemente dependente do tipo de plástico; alguns tipos, como o PTFE, conhecido por *Teflon*, são amplamente usados como revestimento contra agentes químicos variados; outros são sensíveis à maioria dos solventes orgânicos, como o PVC e o poliestireno.[4]

Resistência ao intemperismo: os plásticos em geral são mais sensíveis à ação de radiação ultravioleta que outros materiais, pela ocorrência de quebra das cadeias poliméricas e desenvolvimento de ligações cruzadas, que endurecem o material e facilitam o desenvolvimento de trincas; o poliestireno, o polipropileno e os polietilenos apresentam baixa resistência a essa radiação, mas como outros plásticos, podem receber produtos em sua composição que atuam como protetores, como é o caso do negro de fumo e do dióxido de titânio.[4,10]

Mesmo não recebendo aditivos especiais, os plásticos costumam não ter problemas com a presença de umidade por sua baixa permeabilidade e resistem bem à ação de agentes biológicos como fungos e bactérias.[10]

Misturando-se tipos diferentes de plásticos são obtidas as chamadas *blendas poliméricas*, que podem combinar características favoráveis de um e do outro tipo para uma aplicação específica e/ou reduzir custos; as blendas representam atualmente cerca da metade dos plásticos disponíveis no mercado; sua obtenção, entretanto, não é tarefa simples, pois é comum ocorrer incompatibilidade entre os tipos, com um deles se dispersando em uma matriz do outro, em geral levando a propriedades mecânicas pioradas; para que isso não ocorra costuma-se empregar materiais *compatibilizantes*, usualmente um

unesp

outro material polimérico, que combina em sua cadeia molecular segmentos iguais aos existentes nas cadeias dos plásticos que se deseja combinar.[11] Os materiais do tipo madeira-plástica ou similares são usualmente blendas poliméricas.

A seguir são apresentadas algumas tabelas de propriedades para os plásticos de maior consumo:

TABELA 2 - Densidade específica, resistência à tração e módulo de elasticidade em tração de alguns plásticos.[4]

MATERIAL	Densidade Especifica	Resistência à Tração [MPa]	Módulo em tração [GPa]
PEBD	0,917-0,932	8,3-31,4	0,17-0,28
PEAD	0,952-0,965	22,1-31,0	1,06-1,09
PVC	1,30-1,58	40,7-51,7	2,4-4,1
PTFE	2,14-2,20	20,7-34,5	0,40-0,55
PP	0,90-0,91	31-41,4	1,14-1,55
PS	1,04-1,05	35,9-51,7	2,28-3,28
PMMA	1,17-1,20	48,3-72,4	2,24-3,24
Fenol-formaldeído	1,24-1,32	34,5-62,1	2,76-4,83
Nylon 6,6	1,13-1,15	75,9-94,5	1,58-3,80
Poliéster (PET)	1,29-1,40	48,3-72,4	2,8-4,1
PC	1,2	62,8-72,4	2,38

TABELA 3 - Alongamento na ruptura, coeficiente de Poisson e tenacidade à fratura de alguns plásticos.[4]

MATERIAL	Alongamento na ruptura [%]	Coeficiente de Poisson	Tenacidade à Fratura [MPa.√m]
PEBD	100-650		
PEAD	10-1200		
PVC	40-80	0,38 (rígido)	2,0-4,0
PTFE	200-400	0,46	
PP	100-600		3,0-4,5
PS	1,2-2,5	0,33	0,7-1,1
PMMA	2,0-5,5		0,7-1,6
Fenol-formaldeído	1,5-2,0		
Nylon 6,6	15-300	0,39	
Poliéster (PET)	30-300		5
PC	110-150	0,36	2,2

unesp

TABELA 4 - Calor específico, temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão de alguns plásticos.[4,6]

MATERIAL	Calor específico[J/kg °K]	Temperatura de transição vítrea [°C]	Temperatura de Fusão [°C]
PEBD	2300	-110	110
PEAD	1850	-90	135
PVC	1050-1460	87	210
PTFE	1050	-97	330
PP	1925	de -10(isot.) a -18(atat.)	170
PS	1170	100	240
PMMA	1460	3	160
Fenol-formaldeído			
Nylon 6,6	1670	57	265
Poliéster (PET)	1170	69	265
PC	840	150	267

TABELA 5 - Coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica de alguns plásticos.[4]

MATERIAL	Coeficiente de expansão térmica [10^{-6}/°C]	Condutividade térmica [W/m°K]
PEBD	180-400	0,33
PEAD	106-198	0,46-0,50
PVC	90-180	0,15-0,21
PTFE	126-216	0,25
PP	145-180	0,12
PS	90-150	0,13
PMMA	90-162	0,17-0,25
Fenol-formaldeído		
Nylon 6,6	144	0,24
Poliéster (PET)	117	0,14-0,15
PC	122	0,2

unesp

2.1.4. Plásticos e seus usos

Como é simples de se perceber, os plásticos são extensamente empregados na sociedade moderna; pela combinação de resinas, aditivos e cargas geram-se características gerais de boa resistência química e mecânica, baixo custo de processamento e ampla variedade de formas, cores e transparências, o que conduz a uma grande versatilidade; devido a isso, os plásticos têm se apresentado como substitutos leves, baratos e resistentes em muitas aplicações nas quais antes se empregavam metais, vidros, madeiras, fibras vegetais e outros materiais; conseqüentemente, as aplicações desta classe de materiais são inúmeras, gerando resultados como a redução nos custos de transporte e nas perdas de alimentos.

A produção mundial de plásticos se encontra acima de 100 milhões de toneladas ao ano [12] ; no Brasil, entre 1995 e 1997 houve um aumento constante no consumo dos principais tipos de plásticos, como pode ser observado na TABELA 6.

TABELA 6 - Consumo aparente dos principais plásticos, em toneladas, entre 1995 e 1997, no Brasil.[13]

	1995	1996	1997
PEBD	525.669	495.480	530.418
PEAD	477.592	503.087	564.503
PELBD	136.655	145.442	193.43
PP	525.294	537.233	582.492
PS	235.228	250.256	262.153
PVC	456.410	543.359	587.096
TOTAL	2.356.848	2.470.929	2.719.952

O emprego de plásticos em veículos automotores em substituição a metais tem crescido continuamente; o modelo Classe A, da Mercedes, lançado em 1999, contém cerca de 40 kg de plásticos de engenharia, o dobro dos veículos tradicionais.[14]

unesp

É possível substituir o vidro das lentes do faróis por policarbonato, leve e praticamente inquebrável, e o metal de pedais de embreagem e acelerador por poliamida, com resistência equivalente.[14]

Em construção civil e arquitetura também têm havido incremento no uso de plásticos, continuamente aperfeiçoados em suas propriedades; o poli (cloreto de vinila), mais conhecido como PVC, é um plástico considerado como de uso tradicional em canos e conexões para água e esgoto; poliestireno expandido tem sido amplamente empregado como isolante térmico e como substituto de tavelas de cerâmica e cimento, com grande alívio no peso das lajes e possibilidade de viabilizar grandes vãos livres.[15]

Plásticos são ainda amplamente utilizados na rede elétrica (como camada isolante de fios condutores, em tomadas, interruptores, conduítes, etc.); são também utilizados em juntas de dilatação e em pisos, entre outros usos.[15]

Segundo Liviu Schwartz[16], da Abremplast, cerca de 27% das resinas produzidas no Brasil são destinadas à embalagens ; já segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Embalagens Flexíveis (Abief)[17], as embalagens corresponderiam a cerca de 40% do total de termoplásticos produzidos no Brasil; como exemplo desse uso o Brasil produzia, em 1996, mais de 2 bilhões de unidades anuais de embalagens de PET, valor que deve estar superado em muito atualmente.[18]

A substituição de embalagens de vidro por embalagens de PET podem gerar significativa economia de combustível no transporte de bebidas como refrigerantes, economia que pode chegar a 40%.[17]

Na TABELA 7, extraída do Manual de Gerenciamento Integrado[20] elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), pode-se associar alguns produtos de nosso cotidiano aos principais plásticos empregados em sua elaboração:

unesp

TABELA 7 - Materiais e tipo de plástico associado.

- baldes, garrafas de álcool e bombonas: PEAD;
- condutores para fios e cabos elétricos: PVC, PEBD, PP;
- copos de água mineral: PP e PS;
- copos descartáveis (café, água, cerveja, etc.): PS;
- embalagens de massas e biscoitos: PP, PEBD;
- frascos de detergentes e produtos de limpeza: PP, PEAD, PEBD e PVC;
- frascos de xampus e artigos de higiene: PEBD, PEAD, PP;
- gabinetes de aparelhos de som e TV: PS;
- garrafas de água mineral: a maioria é fabricada em PVC, porém também são encontradas em PEAD, PP e PET;
- garrafas de refrigerantes: fabricadas em PET, com tampa em PP e retentor em EVA;
- isopor: PS;
- lonas agrícolas: PEBD, PVC;
- potes de margarina: PP;
- sacos de adubo: PEBD;
- sacos de leite: PEBD;
- sacos de lixo: PEBD, PVC;
- sacos de ráfia: PP;
- tubos de água e esgoto: a maior parte é fabricada em PVC, mas são encontrados também em PEAD e PP.

As figuras seguintes relacionam os principais tipos de plástico e o modo como são consumidos:

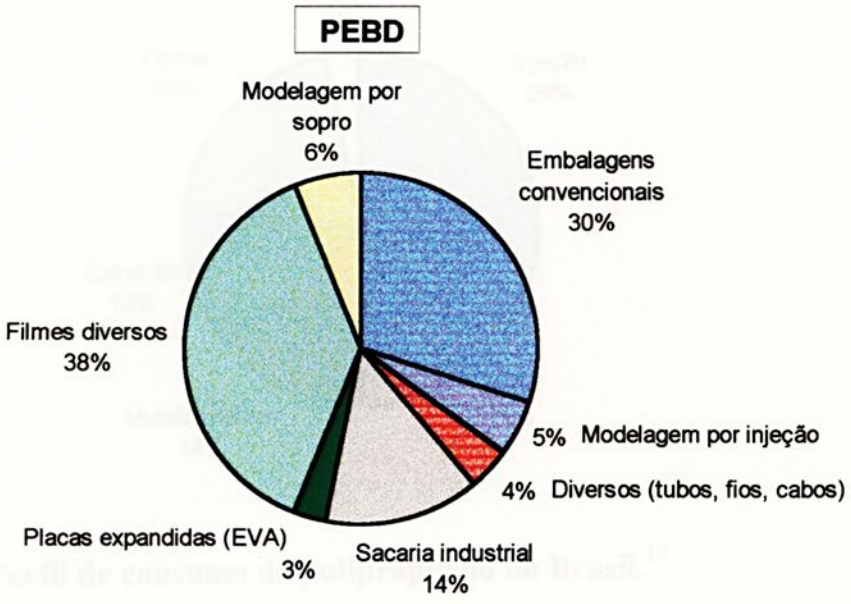


FIGURA 2 - Perfil de consumo do polietileno de baixa densidade no Brasil.[17]

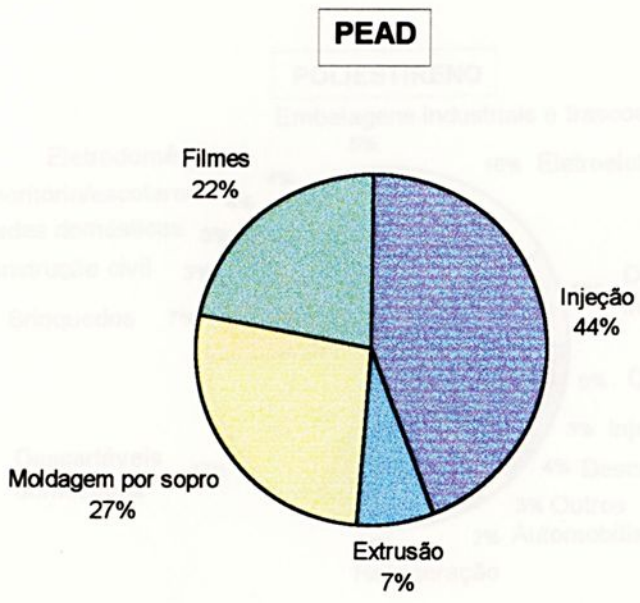


FIGURA 3 - Perfil de consumo do polietileno de alta densidade no Brasil.[17]

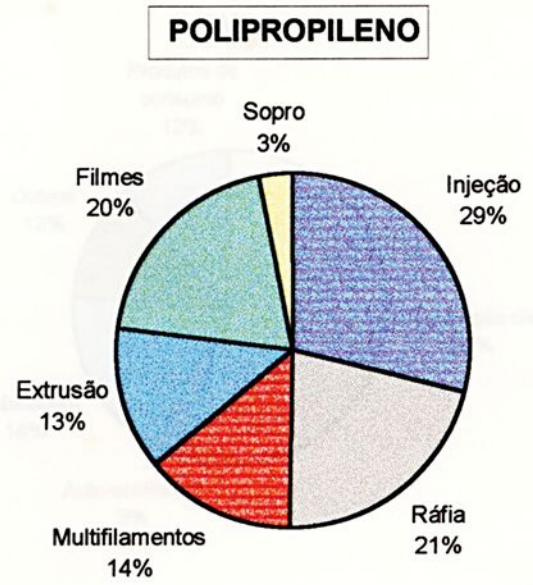


FIGURA 4 - Perfil de consumo do polipropileno no Brasil.[17]

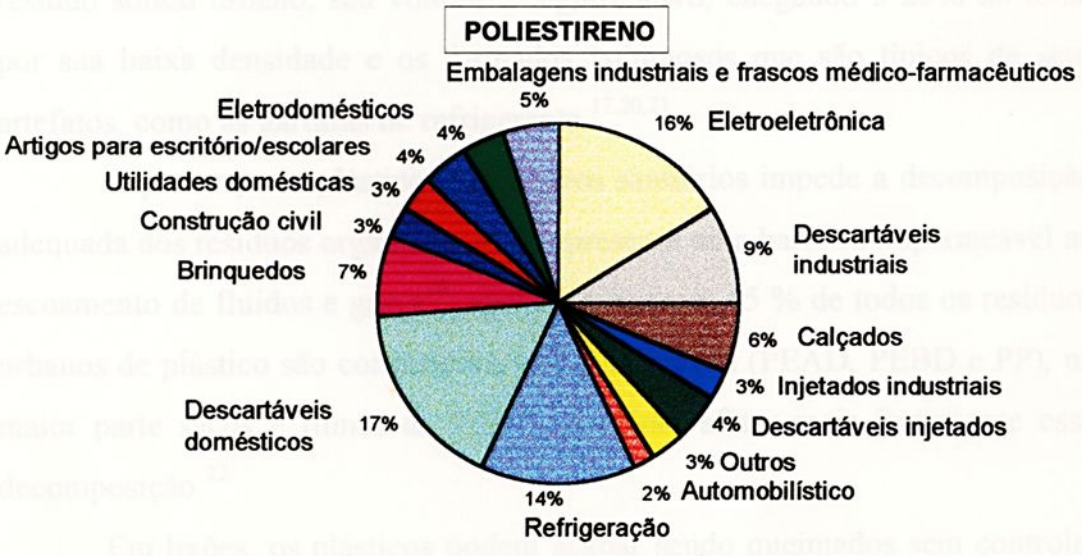


FIGURA 5 - Perfil de consumo do poliestireno no Brasil.[17]

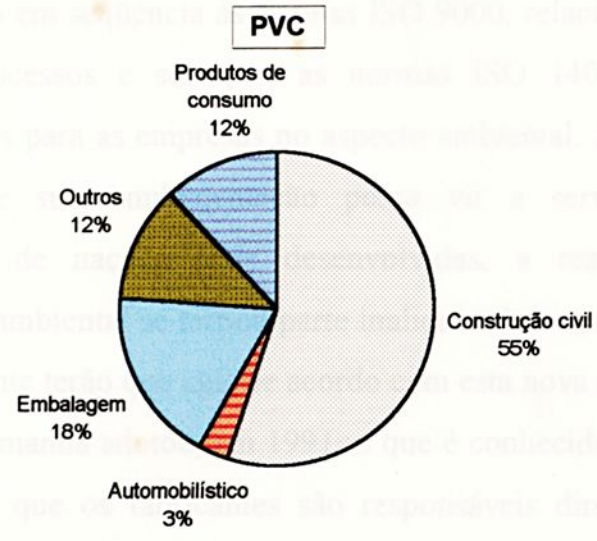


FIGURA 6 - Perfil de consumo do poli (cloreto de vinila) no Brasil.[17]

2.2. Resíduos sólidos urbanos e a questão do plástico

Embora os plásticos representem menos de 10% em peso de todo o resíduo sólido urbano, seu volume é significativo, chegando a 25% do total, por sua baixa densidade e os formados volumosos que são típicos de seus artefatos, como as garrafas de refrigerante.[17,20,21]

A presença de plásticos nos aterros sanitários impede a decomposição adequada dos resíduos orgânicos, pois representa uma barreira impermeável ao escoamento de fluidos e gases[20]; aproximadamente 65 % de todos os resíduos urbanos de plástico são constituídos por poliolefinas (PEAD, PEBD e PP), na maior parte sacos e filmes de PEBD, que irão afetar mais fortemente essa decomposição.[22]

Em lixões, os plásticos podem acabar sendo queimados sem controle, emanando gases nocivos à saúde, como no caso do PVC, que inevitavelmente libera cloro , normalmente convertido em ácido clorídrico, podendo ainda gerar dioxinas, que são produtos reconhecidamente cancerígenos.[20]

unesp

Vindo em seqüência às normas ISO 9000, relacionadas à qualidade de produtos, processos e serviços, as normas ISO 14000 visam estabelecer procedimentos para as empresas no aspecto ambiental. Embora sempre haja o risco de que sua implementação possa vir a servir como mecanismo protecionista de nações mais desenvolvidas, a realidade indica que a preocupação ambiental se tornou parte inalienável da sociedade, e as empresas necessariamente terão que agir de acordo com esta nova realidade.[12]

A Alemanha adotou, em 1991, o que é conhecido como "Sistema Dual Alemão", em que os fabricantes são responsáveis diretos pelo destino das embalagens que fabricam, recebendo em troca, no caso dos plásticos, DM 0,70 por quilo de material a reciclar (cerca de US$ 0,36/kg em novembro de 1999), valor obtido por taxas cobradas sobre o preço dessas embalagens (que recebem um selo próprio); as metas eram ambiciosas, níveis de 72% para vidros, latas e alumínio e 64% para papel/papelão, plásticos e compósitos.[23]

Os custos envolvidos nesse programa são muito elevados, cerca de US$ 2,4 bilhões em 1994, com expectativa de crescimento de 18% no ano seguinte; os materiais são recolhidos em sistemas de coleta seletiva e receptáculos onde o próprio consumidor deposita os materiais recicláveis (cerca de um para cada 500 habitantes).[23]

Paralelamente a esses esforços, houve uma redução no consumo alemão entre 1991 e 1993, de 160 para 145 quilos de embalagens por habitante ao ano.[23]

O intenso trabalho desenvolvido na Alemanha em relação às embalagens despertou grande interesse nas demais nações européias, e influenciou inclusive os projetos de embalagem desenvolvidos pelos demais países; a pressão interna para o atendimento da legislação levou a que grande parte dos resíduos fosse exportada, com o importador se comprometendo a reciclar os materiais recebidos.[23]

unesp

Em 1993 a Alemanha gerou aproximadamente 969 mil toneladas de embalagens plásticas, das quais o Sistema Dual recolheu 378 mil toneladas e reciclou 281 mil toneladas, em sua maior parte por processo mecânico. Para 1998 se almejava reciclar 750 mil t de plásticos, a maior parte através de reciclagem química.[23]

Todos esses movimentos e investimentos aconteceram em um momento em que a Alemanha enfrentava diversas dificuldades, com imensos investimentos governamentais na reintegração de sua região oriental, onde milhares de indústrias eram fechadas por não serem competitivas para os padrões da Alemanha unificada e inúmeros trabalhadores perdiam seus empregos, o que dá maior dimensão ao interesse dedicado ao problema dos resíduos e sua reciclagem.[24]

A partir de 1993, na Universidade de Stuttgart, o Prof. Peter Eyerer e seu grupo têm utilizado o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para plásticos e outros materiais, aplicados à indústria automobilística; nesta avaliação os materiais são classificados segundo critérios de eficiência técnica, econômica e ambiental, sendo comparados entre si segundo suas aplicações; este modelo de análise constitui o parâmetro preconizado pela ISO 14000 para a determinação do impacto ambiental de produtos, devendo ser adaptado à realidade de cada país.[12]

Cada vez mais se torna necessário dar importância a conceitos como o de eco-balanço, que vem a ser, segundo o Departamento Federal Alemão do Ambiente "a comparação mais detalhada possível dos impactos ambientais de dois ou mais produtos diferentes, grupo de produtos, sistemas, processos ou procedimentos".[12]

Até a década de 1970, embora houvessem casos de reciclagem por motivos econômicos, não havia maiores preocupações com a questão ambiental, e só em 1976 foi aprovada nos EUA a Lei de Conservação de

Recursos e Recuperação, que proibiu os "lixões", locais onde se deposita o lixo a céu aberto.[25]

Em 1993 o volume de reciclagem nos EUA já ultrapassava o que é depositado em aterros, 6,3 milhões de toneladas contra 5,7 milhões de toneladas.[25]

A tendência para o manejo de resíduos sólidos urbanos nos EUA tem sido de implementar a separação em programas de coleta seletiva nas residências[26], embora o uso de grandes recipientes de coleta e o retorno das embalagens nos pontos de venda sejam elementos importantes para a redução dos custos.[27]

Na cidade de Filadélfia (EUA), o custo da coleta seletiva para os plásticos (que representavam 6% do peso e 44% do volume de resíduos) era de US$ 1.200/t em 1992 e a partir de 1994 foi reduzido para US$ 750/t., através do uso de centros de coleta operados pelos próprios cidadãos do município; os tempos de coleta foram espaçados (de semanal para bissemanal) e a coleta em separado de garrafas de PET e PEAD foi eliminada.[27]

Dados apresentados pelo vice-presidente da Wellmn Inc.[17] mostram que cada americano produz diariamente 1,9 kg de resíduo sólido, em média; o brasileiro produziria apenas 600 g por dia, dos quais cerca de 7% corresponderiam a plásticos.[17]

Dados recentes indicam, porém, que este valor é mais elevado, com cada indivíduo produzindo cerca de 1,0 kg por dia, em média, o que é creditado à melhoria do padrão aquisitivo da população, havendo um grande aumento, inclusive, no uso de embalagens descartáveis.[28]

O estudo preparado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT)[29], que visou a elaboração do manual que visa orientar as prefeituras no manejo do lixo municipal constatou que menos de 20% dos municípios pesquisados possuía aterro sanitário, e que menos de 10% dos municípios possuía algum programa de coleta seletiva ou fazia compostagem.

unesp

Estudos sobre programas de coleta seletiva demonstraram que seu custo médio é de US$ 262/tonelada, cerca de dez vezes maior que o da coleta convencional, com a venda de materiais recicláveis dando um retorno de apenas 10% dos custos envolvidos.[30]

Em Porto Alegre, o programa de coleta seletiva atingia, em 1995, mais de 1 milhão de pessoas, cerca de 79% da população, e apresentava o menor custo por tonelada das cidades pesquisadas pela organização Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE).[17]

Em Belo Horizonte constatou-se que cerca de um terço do total de resíduos produzidos correspondiam a entulho de construção civil, e cerca de 25% eram resíduos orgânicos.[31]

Os locais destinados ao descarte de resíduos em cidades como São Paulo e Rio de Janeiro são poucos e estão em processo de saturação, o anúncio de novos aterros provoca protestos de quem irá conviver com sua proximidade, e mesmo os administradores consideram a inauguração de lixões um ônus político.[17]

Dados da Limpurb, empresa de limpeza urbana da Prefeitura de São Paulo indicam que a cidade de São Paulo produziu em 1993 cerca de 14 mil toneladas de resíduos sólidos por dia, a partir de uma população de 12 milhões de habitantes; desses resíduos, uma fração de cerca de 5 a 7% em peso, que correspondiam a cerca de 20% do volume total dos resíduos, para a cidade de São Paulo esta fração significou uma quantidade de aproximadamente 250 mil toneladas no ano.[17]

unesp

Na FIGURA 7 pode-se observar os demais componentes do lixo urbano na cidade de São Paulo:

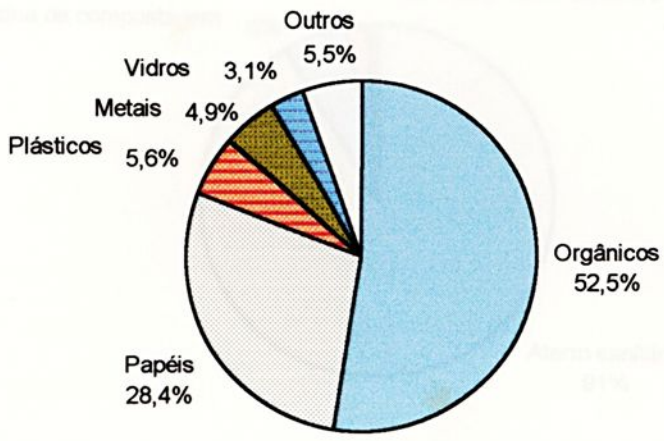


FIGURA 7 - Composição do lixo da cidade de São Paulo.[17]

Durante uma das últimas administrações da cidade de São Paulo tentou-se implementar programas de coleta seletiva em alguns bairros, com coleta diretamente nas casas; é um modelo que está em desuso na Europa, substituído pelos locais de entrega voluntária, com recipientes separados para plásticos, vidros, materiais orgânicos e outros; a administração seguinte argumentou que o projeto trazia poucos benefícios em relação aos custos, dando então preferência a projetos de incineração.[33]

A FIGURA 8 apresenta o destino que é dado ao lixo na cidade de São Paulo:

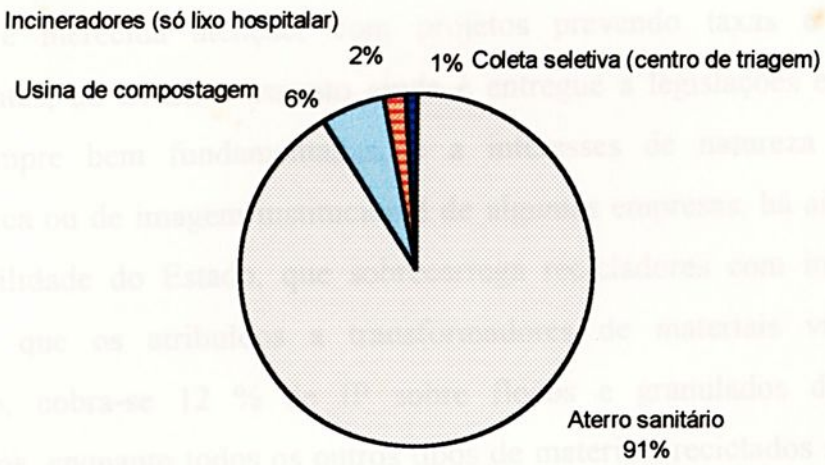


FIGURA 8 - Destino do lixo da cidade de São Paulo.[17]

Da parcela de cerca de 6% do total de resíduos plásticos referentes aos plásticos no município de São Paulo, cerca de 41% se referiria a PEBD, 25% a PP, 16% a PEAD, 11% ao PVC, 5% ao PS e 2% a plásticos de engenharia.[33] Wehenpohl & Pfaff-Simoneit[34] realizaram uma pesquisa nos municípios da região próxima à Guaratinguetá, área de interesse para a estrutura de reciclagem em estudo, que incluiu a caracterização dos resíduos sólidos destes municípios; a composição, em peso, da amostragem conjunta dos municípios de Aparecida, Cachoeira Paulista, Cunha, Guaratinguetá, Piquete e Roseira indicou 53,5% de matéria orgânica, 21,9% de papel e papelão, 9,3% de plásticos, 3,4% de metais, 3,2% de vidros e 8,7% de outros materiais; os plásticos não foram separados por tipos.

2.3. Propostas de solução para o resíduo plástico

Nos países industrializados a questão dos resíduos plásticos recebe grande e merecida atenção, com projetos prevendo taxas e incentivos importantes; no Brasil o assunto ainda é entregue a legislações esporádicas, nem sempre bem fundamentadas, e a interesses de natureza puramente econômica ou de imagem institucional de algumas empresas; há ainda grande insensibilidade do Estado, que sobrecarrega recicladores com impostos até maiores que os atribuídos a transformadores de materiais virgens; por exemplo, cobra-se 12 % de IP sobre flocos e granulados de plásticos reciclados, enquanto todos os outros tipos de materiais reciclados são isentos, considera-se com isso que o material sofre dupla tributação, pois já foi tributado no primeiro uso; cobra-se ainda ICMS de 18 % sobre a compra de sucata plástica[35]; não só na Alemanha, mas em muitos outros países, a reciclagem de plásticos costuma ser subsidiada.[36]

A diferença de tratamento se reflete no porte dos recicladores, que no Brasil reciclam em média de 50 a 100 t/mês, enquanto que recicladores americanos, europeus e australianos processam sempre mais de 500 t/mês, e de uma sucata de muito melhor qualidade, que permite usos mais nobres, como garrafas de refrigerantes totalmente em PET reciclado, permitidas pela legislação dos EUA.[36]

No Japão há um instituto unicamente voltado para o gerenciamento do lixo plástico em nível nacional, que desenvolve projetos como o Projeto para o Desenvolvimento da Tecnologia para a Liquefação do Lixo Plástico, que visa a reciclagem química destes materiais.[19]

Grandes empresas que fabricam automóveis, como a BMW, Ford, Mercedes-Benz, Opel, Porsche e Volkswagen/Audi, estão associadas em projetos que visam a reciclagem de seus veículos ao fim de sua vida útil; esses projetos se fazem presentes no próprio desenvolvimento dos componentes dos

unesp

veículos novos, por exemplo, escolhendo uma variedade menor de tipos de plástico e optando pelos tipos mais adequados à reciclagem; esta preocupação reflete uma situação real e difícil, pois apenas no ano de 1991 aproximadamente 10% da frota em circulação, cerca de 14 milhões de automóveis, foram sucateados na Comunidade Européia (CE).[25]

A montadora Ford determinou que 25% de todas as partes de plástico ou borracha sejam de material reciclado.[18]

A Fiat brasileira adota os planos de reciclagem vigentes nas unidades européias, iniciando com a recuperação de pára-choques (de PP modificado com borracha EPDM), visando depois recuperar também as grades frontais e os painéis, que deverão deixar de serem feitos de vários tipos de plástico para serem feitos de um único tipo, provavelmente polipropileno, de modo a viabilizar sua recuperação.[37]

Uma pesquisa realizada pela Plastivida[38] constatou que a população brasileira tem o plástico em péssima consideração, embora o considere indispensável; verificou ainda que a maioria da população tem como preferência sua reciclagem como forma de resolver o problema ambiental que ele causa; reaproveitamento e diminuição de sua produção ou consumo são menos aceitos e incineração e deposição em aterros ou lixões têm uma muito alta rejeição.

A seguir são apresentadas as principais propostas para enfrentar o problema dos resíduos plásticos, que são sua redução na fonte, sua reutilização ou reuso, a utilização de plásticos biodegradáveis e a reciclagem, dividida em reciclagem mecânica, química e energética:

unesp

2.3.1. Redução

A redução da quantidade de resíduo gerado pela sociedade sem dúvida se apresenta como a opção mais sensata, embora haja limites em sua aplicação, pois em determinados casos uma redução nas embalagens irá gerar desperdícios e perdas dos produtos que são embalados, caso típico de muitos alimentos; pode haver um aumento no consumo de combustível em carros se os plásticos forem substituídos por metais, e no transporte de bebidas se as garrafas forem feitas de vidro, que é muito mais pesado; há economia de energia em casas com isolamento térmico de espumas plásticas e a saúde é beneficiada com artefatos descartáveis como seringas; uma infinidade de aparelhos eletro-eletrônicos, sem plásticos, ou não poderiam ser fabricados ou teriam um custo inacessível à grande maioria da população.[39]

Porém, exemplos positivos podem ser vistos no ramo de *fast-food*, em que muitas embalagens de alimentos têm sido substituídas por outras ambientalmente mais adequadas ou sendo até eliminadas.[25]

Com o contínuo desenvolvimento tecnológico dos equipamentos, processos e materiais plásticos, tem havido um grande avanço na eficiência das embalagens, que requerem cada vez menos material para atuarem com eficiência; um exemplo de ação nesse sentido é dado pela associação das firmas Exxon e Mitsui Petrochemical em um programa para desenvolver "a próxima geração" de polímeros de etileno, um processo de produção que gera material de melhor processamento e maior tenacidade, possibilitando a utilização de filmes mais finos.[25]

O uso de embalagens maiores, a venda de produtos concentrados ou desidratados e o emprego de plásticos duráveis e reutilizáveis também têm contribuído para a diminuição da quantidade de embalagens descartadas.[25]

unesp

Na Alemanha estão em ação programas que reduzem as embalagens ao mínimo possível, chegando-se a eliminar as embalagens de eletrodomésticos que saem das lojas e remédios comprados nas farmácias.[33]

Um exemplo interessante é o uso de embalagens que entram diretamente no processamento com os produtos que embalam, como é o caso de aditivos para produção de PS, embalados em filmes de PS que se dissolvem nos monômeros em que os aditivos são misturados, não havendo necessidade de retorno para reutilização ou descarte das embalagens.[25]

2.3.2. Reutilização ou reuso

Na Alemanha e outros países da Europa são bem sucedidos e praticados amplamente os projetos de uso de garrafas retornáveis em PET e mais recentemente policarbonato (PC); na Alemanha a legislação obriga o retorno para reutilização de 72% das garrafas de PET para bebidas carbonatadas.[40]

A organização Greenpeace defende o uso de embalagens reutilizáveis em substituição às do tipo *one way*, embora isso possa se dever à sua preferência pelo vidro (que também possui embalagens descartáveis).[41]

Também no Brasil se pesquisa o uso de garrafas de plástico para refrigerantes que possam ser reutilizadas.[42]

Ao se propor a reutilização de plásticos em contato com bebidas e alimentos deve-se levar em conta a grande capacidade dos plásticos em absorver contaminantes, que podem posteriormente migrar da embalagem e tornar impróprios para consumo os produtos nela contidos.[43,44]

Estudos como os de Komolprasert e Lawson[44] indicaram que o reuso de embalagens que em algum momento armazenaram materiais como gasolina, ácidos ou elementos tóxicos como pesticidas, entre outros produtos, constitui um risco real à saúde dos consumidores, e que isso justifica os métodos que

unesp

são utilizados para controlar a presença de contaminação, uma combinação de ampla inspeção visual e sofisticados detetores, removendo embalagens potencialmente contaminadas antes do processo de limpeza.

2.3.3. Biodegradabilidade

A organização Greenpeace lançou em 1997 sua marca em cartões de crédito biodegradáveis, fabricados em plástico fornecido pela firma Monsanto; este plástico é fabricado em resina à base de ácido poliidroxialcanóico, produzida por microorganismos a partir da ingestão de açúcar.[45]

A opção pela biodegradabilidade do plástico tem sido defendida persistentemente pela organização ambientalista, embora seja uma solução nem sempre viável na prática; estudos realizados pelo prof. William Rathje, arqueólogo americano especializado em estudar os detritos contemporâneos, acumulados em lixões e aterros sanitários, indicam que as condições existentes no interior destes locais de descarte de resíduos não permitem a decomposição de materiais até muito mais facilmente degradáveis que os plásticos biodegradáveis; ele cita a descoberta de jornais da década de 1940 em ótimo estado de conservação, uma espiga de milho de 1971 com sabugo e grãos apenas levemente escurecidos e cabeças de alface praticamente inteiras após 5 anos no aterro; o prof. Rathje critica ainda a atenção dedicada aos plásticos pelos ambientalistas, pois afirma que as embalagens plásticas representam cerca de 3% do volume do lixo descartado, um valor que, segundo ele, não tem praticamente se alterado desde a década de 1970, enquanto que o volume relacionado ao papel tem oscilado entre 40 e 50% do total dos resíduos.[45,46]

As primeiras gerações de plásticos degradáveis também não foram ambientalmente satisfatórias por deixarem resíduos, serem apenas parcialmente degradáveis ou por não degradar com a rapidez anunciada pelos fabricantes.[25]

unesp

Devido a esses e outros problemas o número de legislações propostas nos EUA para a adoção de plásticos biodegradáveis tem sido continuamente reduzido.[25]

Os desenvolvimentos mais recentes incluem plásticos solúveis em água ou totalmente degradáveis pela ação de microorganismos como fungos e bactérias; se propõe que esses materiais sejam utilizados onde exista a compostagem dos resíduos ou onde o ambiente seja sensível à contaminação, como é o caso de ambientes marinhos ou costeiros.[25]

2.3.4. Reciclagem

Reciclagem mecânica: a reciclagem mecânica, que engloba as reciclagens conhecidas como primária (processamento de aparas e outros rejeitos pré-consumo) e secundária (processamento de produtos pós-consumo), se caracteriza por conferir aos materiais uma forma adequada a novos usos, gerando desde simples grãos, obtidos de moagem e destinados a novas transformações, até produtos mais elaborados, como tecidos, embalagens, tubos e componentes de automóveis.[20]

Sempre que os materiais recicláveis estão disponíveis de maneira econômica, com recursos para a aquisição de equipamentos de tecnologia adequada e exista mercado para os produtos gerados, a reciclagem mecânica se apresenta como a opção preferencial no manejo dos resíduos sólidos domésticos ou industriais.

A reciclagem do plástico é mais sofisticada que a dos demais materiais devido ao grande número de variedades existentes, com propriedades químicas, físicas e mecânicas diferenciadas.[42]

Estima-se que os custos de se reciclar plásticos de resíduos pós-consumo possa variar de razoáveis US$ 100/t no caso de garrafas de PET e

HDPE a até US$ 1.500/t no caso de embalagens complexas, caso em que o mais aconselhável pode ser a incineração.[25]

As etapas a serem seguidas em uma planta de reciclagem mecânica dependerão do produto que se queira obter.

Um processo completo de reciclagem mecânica de resíduos pós-consumo destinado a produzir granulados para outras indústrias transformadoras envolve várias etapas, a seguir relacionadas:[20]

- Separação e classificação do material em mesas de triagem;
- Trituração dos plásticos em trituradores ou moinhos;
- Lavagem e secagem do material;
- Armazenagem em silos;
- Aglutinação (o plástico é fundido por aquecimento, usualmente por atrito ou resistências elétricas);
- Extrusão (é um processo no qual o material sai de forma contínua segundo um perfil determinado);
- Resfriamento;
- Transformação em granulados no granulador (basicamente corta o material que sai da extrusão em grânulos uniformes);
- Embalagem do produto.

Os materiais produzidos podem então ser combinados ou não com resinas virgens, cargas e aditivos para a transformação em novos artefatos.[20]

O processo para a produção dos tipos de reciclados conhecidos como madeira-plástica, embora possa prescindir da separação prévia dos plásticos segundo seus tipos, acaba requerendo essa separação para que haja um controle mínimo da qualidade do material produzido, pois existe uma possibilidade real de concentrações anômalas de plásticos com alta temperatura de fusão e misturas de plásticos que são incompatíveis entre si.

unesp

Polímeros difíceis de serem reciclados, como as borrachas que passam por vulcanização com enxofre, podem ser recuperados em um processo recentemente desenvolvido; ele consiste na moagem fina das borrachas em temperatura criogênica, e sua mistura com um composto químico que rompe a estrutura de ligações cruzadas do material, permitindo a obtenção de uma nova borracha com características semelhantes às do material original.[47]

A moagem em dimensões micrométricas de materiais a serem reciclados também é adotada na reciclagem de plásticos termofixos como baquelite, plásticos reforçados por fibra de vidro e poliuretanos rígidos; no caso específico de termofixos deve-se fazer a neutralização dos catalisadores antes de incorporá-los ao material virgem; no processo da firma Gauss, que atua no Brasil, os materiais são previamente reduzidos a dimensões menores que 150 mícrons.[48]

Considerando-se que a simples passagem de artefatos para material moído configura reciclagem mecânica, é interessante mencionar o uso deste tipo de material em agregados de concreto.[49,50]

O PVC, talvez o mais combatido dos plásticos perante as organizações ambientais, também possui processos em que é reciclado, como nos exemplos de garrafas de água transformadas em tubulações, em 1991, a um custo final de cerca de 35 Pfg/kg (cerca de US$ 0,18/kg em novembro de 1999) e esquadrias de vidraça produzidas de rejeitos de produção, e vendidos ao equivalente a DM 0,80 (cerca de US$ 0,42/kg) contra DM 1,30/kg (cerca de US$ 0,67/kg) para o material virgem; pisos vinílicos também podem ser obtidos pela reciclagem do PVC.[51]

A reciclagem mecânica do PVC tem se desenvolvido em todo o mundo, o que é esperado em função da importância econômica desse plástico; entretanto sofre restrições pela emanação de cloro, altamente corrosiva, que acompanha o processo, somando-se às acusações de que seria um processo que

liberaria dioxinas; as exigências de controle ambiental em seu processamento tendem a ser cada vez mais rigorosas e dispendiosas para seus produtores.[41]

À parte dessa discussão, o uso do PVC, mesmo sofrendo restrições em embalagens, tem tido o uso implementado em aplicações de longa duração, como em fios e cabos, janelas e tubos.[40]

Apesar de passar por enorme pressão dos grupos ecológicos, a abordagem mais racional e menos emotiva dos chamados ecobalanços têm levado a importantes reconsiderações quanto ao uso do PVC, por exemplo no uso de filmes deste material em embalagens de carne, e a utilização de material injetado em teclados da IBM, exatamente com o argumento de sua reciclabilidade; considera-se que parte das críticas ao PVC provem de concorrentes que fabricam outros tipos de plásticos, com interesses mais de ordem econômica que ecológica.[52]

Reciclagem química ou terciária: é um tipo de reciclagem que se caracteriza pela modificação química das cadeias poliméricas, que são normalmente quebradas para gerar hidrocarbonetos combustíveis, monômeros, que podem ser reconvertidos em polímeros, e outros tipos de produtos.

Embora grande parte da tecnologia relacionada a esse tipo de reciclagem seja muito recente, os princípios básicos envolvidos não são novos, pois o craqueamento (quebra das cadeias orgânicas) pelo processo conhecido como *pirólise* é um procedimento normal da indústria petroquímica para os derivados de petróleo, e processos de despolimerização dos tipos *hidrólise* e *glicólise* foram patenteados nas décadas de 1960 e 1970.[25]

Os principais processos de reciclagem química de plásticos são:[53]

Pirólise: é o processo mais difundido, e o único que consegue processar com maior facilidade certos tipos de resinas termofixas; envolve a quebra de

moléculas pelo uso controlado de calor na ausência de oxigênio, normalmente gerando hidrocarbonetos processáveis em refinarias;

Hidrogenação: trata-se de uma reação a altas temperaturas e pressão em presença de hidrogênio, gerando hidrocarbonetos de síntese e hidro-betume;

Gaseificação: processo de oxidação parcial gerando gases de síntese, que irão ser utilizados na produção de materiais de interesse econômico;

Quimólise: inclui diversos tipos de processos usados na recuperação de monômeros, que podem ser convertidos em novos plásticos.

Os plásticos obtidos a partir de monômeros recuperados por reciclagem química possuem as mesmas características de pureza e boas propriedades mecânicas que os plásticos virgens; um exemplo desse tipo é a reciclagem de plástico PET por metanólise pelas firmas Coca-Cola e Pepsi-Cola.[54]

Na Europa, em 1994, reciclou-se quimicamente cerca de 51.000 t de embalagens plásticas; em 1995 este número subiu para entre 70 e 80 mil t.[40]

Estava em construção (1996) na cidade de Niigata, no Japão, uma unidade para a conversão de lixo plástico pós-consumo em óleo pesado classe A, destinado a uso como combustível; a unidade produtora, operada pela firma Rekisei Koyu K.K., visa transformar cerca de 6 mil t anuais de lixo plástico em 2,7 milhões de litros de combustível.[19]

Pode ser considerado como reciclagem química o processo iniciado na Alemanha e aperfeiçoado no Japão que emprega resíduos plásticos como substituto vantajoso do coque metalúrgico na produção de aço.[55]

O plástico rígido é pulverizado e os filmes são floculados antes de serem injetados no alto forno; o material se transforma imediatamente em gás, que irá atuar como redutor no minério de óxido de ferro. Esse processo produz

unesp

menos gás carbônico que os processos tradicionais e não gera gases tóxicos, mas é sensível à presença de PVC na mistura, que gera gases que corroem o interior do alto forno; nesse processo, esse plástico precisa ser separado para outro tipo de recuperação. Considera-se que o sistema opere com eficiência energética maior que 80%, acima de outros processos de reciclagem em termos de conservação de energia.[55]

Reciclagem energética ou quaternária: de acordo com estudos realizados por cientistas da empresa Bayer, um quilo de lixo plástico contém cerca de 46.000 kJ de energia recuperável, o que é aproximadamente três vezes a energia contida no carvão de média qualidade, e comparável com as cerca de 42.700 kJ por quilo recuperáveis do óleo de aquecimento doméstico.[56]

Manfred Fehr [57] considera que parte significativa dos plásticos, papéis e papelões, bem como a totalidade da madeira que são descartados não poderão ser reciclados, sendo obrigatoriamente dirigidos a lixões ou aterros, ou podendo ser incinerados visando a obtenção de energia térmica; o autor conclui que a queima do lixo para gerar eletricidade não é competitiva, mas haveria interesse em utilizá-lo para gerar vapor em indústrias; seu estudo estima que uma opção global pela incineração como destino ao lixo poderia reduzir em 94% o descarte de resíduos no solo, embora aumentasse em 59% a carga de resíduos para a atmosfera quando comparado com a queima de óleo combustível para gerar vapor.

A porcentagem de destino dos resíduos plásticos referentes à reciclagem energética é menor que 10% do material coletado no Brasil, Portugal, Espanha e Grécia, 15 a 20% nos EUA, 15 a 25% na Noruega e Itália, 35 a 50% na Suécia, Bélgica, França, Holanda e Alemanha, 70 a 80% na Suíça, Dinamarca e Luxemburgo e 70% no Japão; a média na Europa Ocidental é de 30% .[33]

unesp

Em 1996 havia cerca de 360 plantas de incineração na Europa, todas com aproveitamento energético.[40]

Enquanto que nos EUA o lixo é incinerado sem separação prévia, pois contém pouco material orgânico, que tem baixo poder calorífico, no Brasil haveria a necessidade da separação prévia da fração orgânica, muito mais abundante.[33]

Embora o modelo de reciclagem energética por incineradores encontre dificuldade de ser implantado no Brasil, um sistema alternativo está em implementação em uma usina de reciclagem de características diferenciadas, surgida a partir de uma associação de empresas nacionais e estrangeiras; trata-se de um projeto de US$ 15 milhões, com capacidade de produção de 60.000 toneladas por ano de combustível alternativo, que é gerado a partir de material rejeitado por transformadoras de plástico e petroquímicas; esses resíduos seriam reduzidos a pequenas partículas e misturados a líquidos combustíveis, resultando em um combustível com interesse para fornos como os das cimenteiras.[58]

Embora haja grande polêmica em relação aos gases liberados na queima por incineradores, argumenta-se que os modernos filtros de carvão ativado permitem que os gases liberados sejam de boa qualidade; estudos do Governo Alemão constataram que a emissão de dioxinas e furanos resultantes da combustão se encontravam dentro de limites toleráveis.[33]

Um estudo realizado pela Associação Americana dos Engenheiros Mecânicos (AAME) verificou que a emissão de dioxinas pelas unidades de incineração não tem relação direta com a quantidade de PVC ou cloro que entra no incinerador; caso este trabalhe com uma boa tecnologia e metodologia de operação a dioxina é destruída antes de ser liberada.[59]

Um dos maiores impecilhos para esse processo é o investimento elevado envolvido, pois cada incinerador com geração de energia tem um

unesp

custo aproximado de US$ 150 milhões, com mais da metade desse valor em equipamentos de controle ambiental.[33]

2.4. A madeira

Denomina-se madeira o material que constitui as raízes, caules e ramos das árvores.[60]

Utilizada pelos homens desde tempos imemoriais, a madeira ainda representa um material de grande importância para a sociedade moderna, embora sofra cada vez mais restrições para sua obtenção, principalmente quando se trata das chamadas madeiras nobres, com propriedades e aparência especiais, e que normalmente são extraídas de matas nativas.

Seu grande mercado consumidor é muito bem estabelecido e ávido, ao ponto de ignorar leis ambientais; é uma opção interessante para dar destino a plásticos reciclados que seriam simplesmente descartados no meio ambiente, com todas as conseqüências indesejáveis mencionadas anteriormente.

2.4.1. Classificações e características gerais das madeiras

Dentre os vários tipos de vegetais existentes, são considerados como produtores de madeira as subdivisões das *Angiospermas* e das *Gimnospermas*; as primeiras incluem numerosas espécies nativas e as segundas abrangem as coníferas, conhecidas vulgarmente como *pinheiros* (a madeira se denomina *pinus*); estas últimas apresentam menor variedade de espécies diferentes, como o *Pinus Taeda* e o *Pinus Eliotti,* entre outras.[60]

Dentro da subdivisão das Angiospermas deve-se mencionar a classe das *Monocotiledôneas*, que inclui os bambus, não considerados como madeira no seu sentido mais estrito, mas que são leves, possuem boa resistência e têm sido muito utilizados, principalmente em construções rústicas.[60]

unesp

A *região cambial* ou *câmbio*, muito delgada, é responsável pelo crescimento lateral do caule, formando casca do lado externo e lenho do lado interno, inclusive os vasos condutores de seiva.[60]

O *lenho* engloba o *alburno* e o *cerne*, que em muitas espécies são facilmente distinguíveis pela cor; o alburno é mais externo, claro e mole que o cerne, que é a parte de maior interesse para a extração de madeira; o alburno é o principal responsável pela condução de nutrientes da árvore, e o cerne tem principalmente a função de dar resistência mecânica ao caule.[60]

Na região mais central do caule se encontra a *medula*, de diâmetro relativamente pequeno, e que tem como função principal armazenar substâncias nutrientes para a planta.[60]

As madeiras são materiais que possuem grande anisotropia em suas propriedades mecânicas, pela própria estrutura interna do material, possuindo significativa quantidade de fibras de celulose orientadas no sentido do comprimento do caule ou de seus ramos, o que confere valores de resistência tomados no sentido destas fibras muito mais elevados que os apresentados em outras direções.[60]

As propriedades apresentadas pelas madeiras podem variar pelo teor de umidade presente no material, a espécie e as condições climáticas em que se desenvolveu; por exemplo, uma mesma espécie pode apresentar maior resistência quando cresce em clima seco e frio do que quando cresce em clima quente e úmido (terá menos fibras e maior teor de umidade no segundo caso).[60]

2.4.2. Propriedades mecânicas das madeiras

As propriedades mecânicas da madeira, à semelhança dos plásticos, dependem diretamente da espécie considerada, podendo apresentar diferenças igualmente significativas; outro fator importante é o teor de umidade contido

na madeira, que pode ultrapassar 60% no caso de madeiras verdes (condição como foi cortada); quanto menor for o teor existente, maiores serão os valores de resistência e módulo elástico.[60,61]

Para espécies iguais e de mesmo teor de umidade, as propriedades podem oscilar de acordo com as condições de crescimento, que irão ser observadas em uma maior ou menor densidade do material, diretamente proporcional aos valores obtidos em resistência e módulo elástico, desde que não afetados por anomalias no crescimento das fibras e defeitos, como trincas de contração, entre outros.[60]

Entretanto, quando se consideram as propriedades mecânicas das madeiras, deve-se ter em conta sua grande anisotropia, que faz com que as resistências medidas paralelamente à direção das fibras cheguem a ser até quarenta vezes maiores do que quando medidas em direção normal à essas fibras.[61,62]

Considerando haverem tipos de madeira normalmente escolhidos para uso estrutural em edificações, como a *peroba rosa* e o *pinho do Paraná*, os valores de resistência mecânica a serem consideradas como adequados a usos tipicamente estruturais podem ser baseados nos valores apresentados por esses tipos de madeira; em estruturas leves e temporárias, por outro lado, podem ser considerados adequados os valores apresentados por espécies como o pínus.

A fluência em madeiras está relacionada à umidade ambiente, aumentando conforme esta aumenta; essa propriedade chega a produzir deformações equivalentes à deformação atribuída ao carregamento inicial, mas que tendem a se estabilizar depois de certo tempo.[64]

A TABELA 8 relaciona madeiras nativas e de reflorestamento a algumas de suas propriedades mecânicas principais.[61,62,63]

unesp

TABELA 8 - PROPRIEDADES DAS MADEIRAS

NOME COMERCIAL	ESPÉCIE	DENSIDADE (1)	RE.TR.PA.(2)	RE.TR.NO.(3)	RE.CO.PA.(4)	MÓDULO (5)
Angelim	*Vatairea heteroptera Ducke*	930*		4,7**	71,2*	17,868**
Angelim araroba	*Votaireopsis araroba*	688	69,2	3,1	50,5	12,876
Angelim ferro	*Hymenolobium spp*	1.170	117,8	3,7	79,5	20,827
Angelim pedra	*Hymenolobium petraeum*	694	75,5	3,5	59,8	12,912
Angelim pedra verdadeiro	*Dinizia excelsa*	1.170	104,9	4,8	76,7	16,694
Angico preto	*Anadenanthera macrocarpa (Benth.) Brenae*	1.050*		13,6**	86,9*	20,310**
Branquilho	*Termilalia spp*	803	87,9	3,2	48,1	13,481
Cafearana	*Andira spp*	677	79,7	3	59,1	14,098
Canafístula	*Cassia ferruginea*	871	84,9	6,2	52	14,613
Casca grossa	*Vochysia spp*	801	120,2	4,1	56	16,224
Castanheira	*Bertholletia excelsa H. B. K.*	750*			42,7*	
Castelo	*Gossypiospermum praecox*	759	99,5	7,5	54,8	11,105
Catiúba	*Qualea paraensis*	1.221	86,2	3,3	83,8	19,426
Cedro/Cedro doce	*Cedrella spp*	500	71,4	3	31,5	8,058
Cedro amargo	*Cedrella odorata*	504	58,1	3	39	9,839
Chanpagne	*Dipterys odorata*	1.090	133,5	2,9	93,2	23,002
Cupiúba	*Gouoia glabra Aubl.*	838	62,1	3,3	54,4	13,627
Eucalipto Alba	*Eucalyptus alba*	705	69,4	4,6	47,3	13,409
E. Camaldulensis	*Eucalyptus camaldulensis*	899	78,1	4,6	48	13,286
E. Citriodora	*Eucalyptus citriodora*	999	123,6	3,9	62	18,421
E. Cloesiana	*Eucalyptus cloesiana*	822	90,8	4	51,8	13,963
E. Dunnii	*Eucalyptus dunnii*	690	139,2	6,9	48,9	18,029
E. Grandis	*Eucalyptus grandis*	640	70,2	2,6	40,3	12,813
E. Maculata	*Eucalyptus maculata*	931	115,6	4,1	63,5	18,099
E. Maidene	*Eucalyptus maidene*	924	82,7	4,8	48,3	14,431
E. Microcorys	*Eucalyptus microcorys*	929	118,6	4,5	54,9	16,728
E. Paniculata	*Eucalyptus paniculata*	1.087	147,4	4,7	72,7	19,881
E. Propinqua	*Eucalyptus propinqua*	952	89,1	4,7	51,6	15,561
E. Punctata	*Eucalyptus punctata*	948	125,6	6	78,5	19,36
E. Saligna	*Eucalyptus saligna*	731	95,5	4	46,8	14,933
E. Tereticornis	*Eucalyptus tereticornis*	899	115,9	4,6	57,7	17,198
E. Triantha	*Eucalyptus triantha*	755	100,9	2,7	53,9	14,617
E. Umbra	*Eucalyptus umbra*	889	90,4	3	42,7	14,577
E. Urophyla	*Eucalyptus urophyla*	739	85,1	4,1	46	13,166
Faveiro	*Pterodon pubescens Benth.*	940*		9,4**	74,1*	16,142**
Freijó	*Cordia goeldiana Huber*	590*		4,2**	46,1*	14,632**
Garapa Roraima	*Apuleia leocarpa*	892	108	6,9	78,4	18,359
Grubixá	*Micropholis spp*	700*		7,3**	52,2*	12,416**
Guaiçara	*Letzelburgia spp*	825	115,6	4,2	71,4	14,624

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 unesp 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

TABELA 8 - PROPRIEDADES DAS MADEIRAS

NOME COMERCIAL	ESPÉCIE	DENSIDADE (1)	RE.TR.PA.(2)	RE.TR.NO.(3)	RE.CO.PA.(4)	MÓDULO (5)
Guarucaia	*Peltophorum vogelianum*	919	70,9	5,5	62,4	17,212
Imbuia	*Ocotea porosa (Nees ex. Mart.) Barroso*	650*		6,7**	44,1*	8,826**
Ipê	*Tabebuia serratifolia*	1.068	96,8	3,1	76	18,011
Ipê roxo/Ipê Una	*Tabebuia impertiginosa (Mart.) Standl.*	960*		9,8**	73,1	19,516**
Itaúba preta	*Mezilaurus itauba (Meissn.) Taub.*	960*		10,8**	68,4*	16,387**
Jatobá/Jatal	*Hymenaea spp*	1.074	157,5	3,2	93,3	23,607
Louro preto	*Ocotea spp*	684	111,9	3,3	56,5	14,185
Massaranduba/Parajú	*Manilkara spp*	1.143	138,5	5,4	82,9	22,733
Mandioqueira	*Qualea spp*	856	89,1	2,7	71,4	18,971
Oiticica amarela	*Clarisia racemosa*	756	82,5	3,9	69,9	14,719
Peroba rosa	*Aspidosperma polyneuron Muell. Arg.*	790*		8,1**	54,4*	11,739**
Pinho do Paraná	*Araucarea angustifolia (Bert.) O. Kunze*	580	93,1	1,6	40,9	15,225
Pinus caribea	*Pinus caribea var. caribea*	579	64,8	3,2	35,4	8,431
Pinus bahamensis	*Pinus caribea var. bahamensis*	537	52,7	2,4	32,6	7,11
Pinus hondurensis	*Pinus caribea var. hondurensis*	535	50,3	2,6	42,3	9,868
Pinus elliottii	*Pinus elliottii var. elliottii*	560	66	2,5	40,4	11,889
Pinus oocarpa	*Pinus oocarpa shiede*	538	60,9	2,5	43,6	10,904
Pinus taeda	*Pinus taeda L.*	645	82,8	2,8	44,4	13,304
Quarubarana	*Erisma uncinatum*	544	58,1	2,6	37,8	9,067
Sucupira	*Diplotropis spp*	1.106	123,4	3,4	95,2	21,724
Tatajuba	*Bagassa guianensis*	940	78,8	3,9	79,5	19,583
Tauari	*Couratari cf. oblongifolia Ducke*	660*			39,3*	

1- Densidade aparente [kg/m3]
2- Resistência à tração paralela às fibras [MPa]
3- Resistência à tração normal às fibras [MPa]
4- Resistência à compressão paralela às fibras [MPa]
5- Módulo elástico longit. em compressão [GPa]
Os valores são médias para umidade de 12%
* Umidade da madeira de 15%
** Madeira verde

2.4.3. Usos e mercados

A indústria da madeira supera em muito a indústria de plásticos, com valores de produção anuais em torno de 2,6 bilhões de toneladas, dos quais 1,8 bilhão de toneladas são empregados em aplicações estruturais.[65]

Embora ainda haja oferta de madeira nativa, as restrições legais para sua extração e a necessidade de fornecimento regular para industrialização levaram ao desenvolvimento de extensas áreas plantadas com espécies de rápido desenvolvimento, as chamadas *madeiras de reflorestamento*, termo usualmente empregado para o pínus e o eucalipto. Os produtos de madeira, embora sejam muito variados em suas aplicações finais, podem ser classificados em um número relativamente pequeno de elementos primários, que serão a base dos produtos acabados; a Tabela 9, vista a seguir, apresenta estes produtos, incluindo materiais que combinam madeira e resinas poliméricas, que têm hoje importância comparável com a madeira maciça, principalmente na forma de chapas.

Os produtos desta tabela são empregados basicamente pela indústria de móveis e pela construção civil .[66]

unesp

TABELA 9 - Classificação dos produtos sólidos de madeira.[66]

CATEGORIA	PRODUTOS	SUBPRODUTOS
Roliços		
Estacas		
Mourões		
Escoras		
Serrados		
Dormentes	Molduras	
Pranchas	Aplainados	→ Sarrafeado paralelo
Tábuas	Painéis sólidos	→ Sarrafeado cônico
Ripas	Tacos	
Caibros	*Parquet*	
Sarrafos		
Laminados		
Faqueado	Componentes	→ Compensado laminado (Decorativo, Concreto, Industrial, Naval e uso geral)
Desenrolado	Chapas de compensado	→ Compensado com miolo (Sarrafeado, Celular e Composto)
	Revestimentos	→ LVL
Cavacos e resíduos		
Chips	Chapas de aglomerado	→ Chapas de Aglomerados
Flakes		→ Chapas Finas de Aglomerados
Cascas		→ Chapas de Partículas Largas
Serragem		→ Chapas de Partículas com Cimento
Refugos		→ OSB
	Chapas de fibra	→ Chapas Duras (LM, HM, MDF, Padrão e Temperadas)
		→ Chapas Leves (Comuns e Impregnadas com Betume)

OSB (*oriented strand board*) é a denominação para chapas aglomeradas em que as partículas são orientadas; LM, HM e MDF (*medium density fiberboard*) são denominações para chapas duras obtidas pela prensagem das fibras da madeira, correspondendo respectivamente aos produtos de baixa, alta e média densidade.[60,66]

unesp

As aplicações mais comuns atribuídas aos materiais derivados da madeira, segundo seus principais tipos, são:[66]

Madeira serrada: Tampos de mesa, frontal e lateral de balcões, assento e estrutura de cadeiras, estruturas de camas, molduras de pés de mesa, estrutura de sofás, enchimento de portas, laterais de gavetas, embalagem, carretéis para cabo elétrico, pisos, portas residenciais, estrutura de telhados, pés de *racks*, estrados, painéis colados, acabamento de móveis;

Compensado: fundos de gaveta, armários, roupeiros, tampos de mesa, laterais de móveis, braços de sofá, fundos de armários, prateleiras, pisos, portas residenciais;

Aglomerado: Tampos de mesa, laterais de portas e de armários, *racks*, divisórias, laterais de estantes e secundariamente aplicações na construção civil;

MDF: molduras especiais, rodapés, molduras para portas, pisos finos, caixas de som, embalagens especiais, divisórias, componentes frontais, internos e laterais de móveis, fundos de gaveta, estantes, tampos de mesa, *racks*;

Chapa de fibra dura: fundos de gavetas, de armários e de *racks*, tampos de móveis, móveis infantis e pranchetas de mão.

O volume "Fichas de características das madeiras brasileiras", do IPT[61], relaciona diversas aplicações das madeiras, incluindo as não estruturais, para espécies de madeiras nativas; esses usos incluem pontes, postes, mourões, esteios, dormentes, vigas, caibros, ripas, esquadrias, carroçaria, tanoaria, forros, instrumentos musicais, paredes, caixotaria e engradados, marcenaria,

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

chapas aglomeradas, chapas compensadas, fôrmas para concreto, moldes para fundição, indústria de celulose, lenha, pisos, cabos de vassoura e ferramentas, entalhe e escultura, lápis, miolo de portas e painéis, saltos para calçados e tamancos, armações de móveis e folhas faqueadas.

A TABELA 10 indica os preços de alguns produtos de madeira, fator que deve ser considerado, já que a adequação de propriedades é apenas um dos aspectos no desenvolvimento comercial de um produto:

TABELA 10: Produtos sólidos de madeira: preços médios praticados no Brasil - 1998 (em US$/m^3).[66]

Produto	Preço
Serrado de pínus	150
Serrado de Folhosas (jatobá)	490
Serrado de Folhosas (mogno) revestido	705
Compensado de mogno	1.240
Compensado de virola	383

3. AVALIAÇÃO DA MADEIRA-PLÁSTICA

3.1. Introdução

Madeira-plástica não é um termo científico, mas uma denominação de interesse principalmente comercial que, conforme se observa no mercado, se refere ao produto cuja composição principal é plástico reciclado e se destina a usos tradicionais da madeira, podendo ter ou não uma separação dos tipos de plásticos previamente e recebendo ou não limpeza no processamento; pode ser fabricados tanto em moldagem por prensagem, injeção ou extrusão.

O tipo de madeira-plástica em estudo possui características próprias de composição e processamento, descritos adiante; outros produtos similares podem ser relacionados:

O produto denominado IMAWOOD, desenvolvido pelo Instituto de Macromoléculas da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), é obtido a partir de resíduos pós-consumo de poliolefinas, com proporção estimada em 75% de PEBD e 25% de PEAD. A avaliação de suas propriedades mecânicas indicou que o material apenas pode ser comparável às madeiras quando em condições de tensão perpendicular às fibras (em madeiras) e flexão por impacto e cisalhamento. As resistência à tração e compressão, ambas com valores equivalentes a 1,67 MPa, muito baixos, são inferiores às apresentadas pelas madeiras, acreditando-se, entretanto, que podem ser melhoradas com o uso de cargas minerais.[22]

Um processo que foi empregado no Brasil pela firma Reciplast, criada em 1990 por empresários da construção civil e desativada em 1995, tinha origem na firma belga *Advanced Recycling Technology* (ART), ainda é utilizado em outros países, gerando o plástico reciclado que é conhecido com o nome de SYNTAL.[17]

unesp

A Reciplast tinha capacidade de transformar 650 toneladas/mês, em dois conjuntos de extrusoras operando a 60% da capacidade e, enquanto estava em atividade, produzia principalmente pallets para transporte de carga, que embora custassem cerca de 2,5 vezes mais que os *pallets* de madeira, eram garantidos por três anos contra uma durabilidade média de seis meses prevista para os tradicionais; este material foi empregado também no piso e arquibancadas do circo permanente da SPAL Ltda. (firma franqueada da Coca-Cola), no Centro Cultural São Paulo.[17]

Este processo não prevê a lavagem dos plásticos, aceitando até 15% de impurezas, e não necessita de separação prévia dos tipos, com os plásticos rígidos sendo assimilados em meio a uma matriz de plásticos flexíveis, densificados e a seguir fundidos por atrito a 260°C em um cilindro-rosca tipo cocléia (peça com pás helicoidais); a forma final podia ser de pranchas como as de madeira, entre outros formatos; os valores de resistência divulgados, de cerca de 10 MPa para tração e 25,9 MPa para compressão são similares aos valores da mistura proposta pelo fabricante do equipamento que produz a madeira-plástica em Guaratinguetá.[17]

A firma americana *Sanders Enterprises Inc.* produz um material moldado obtido de plástico reciclado de PEAD e PEBD, que é denominado RECY WALL®, obtido com 30 a 50% de resíduos pós-consumo e o restante de resíduos industriais; sua planta industrial possui capacidade de processar 3.250 toneladas ao ano.[67]

Outro produto dessa categoria recebe o nome comercial DURAWOOD® e é composto por mais de 90% de PEAD reciclado e descontaminado de garrafas usadas de leite, comuns nos EUA, resultando em um produto com 99% de pureza e densidade 0,719 g/cm^3; esse material se apresenta em diversas tonalidades, obtidas pela adição de pigmentos resistentes à radiação e recebe estabilizantes para a preservação de propriedades físicas; embora tenha um maior controle das propriedades que

seus similares, não recomenda usos estruturais por ter menor rigidez e maior elasticidade que as madeiras.[68]

3.1.1. O processo de fabricação

Misturas poliméricas podem ser feitas de modo a simplificar ou mesmo eliminar a seleção prévia dos tipos de plástico, mas seu processamento exige a análise da compatibilidade entre os diversos tipos e a temperatura de processamento, que tem que levar em conta as temperaturas de fusão, que são diferentes para cada tipo; a escolha de uma temperatura única pode ser uma tarefa complexa mesmo em misturas de composição bem controlada [69] ; a situação se agrava no caso de misturas de reciclados pós-consumo.

Deve-se considerar que a presença de impurezas na mistura e a degradação que pode ocorrer após seguidas extrusões ou exposição a ataque químico (principalmente com oxidação) e luz solar, tende a diminuir a resistência à tração, modificar a viscosidade do fundido, alterar a cor e afetar a flamabilidade, entre outros efeitos; esta degradação pode reduzir ou aumentar o peso molecular , criar ligações insaturadas por ação química ou térmica e desenvolvimento de estruturas cíclicas devido às reações de cadeias laterais.[70]

Os efeitos podem ser diferentes conforme o material; o polietileno tende a degradar desenvolvendo ligações cruzadas entre as cadeias e reticulações, com aumento no índice de fluidez, enquanto o polipropileno tende a sofrer quebra de suas cadeias principais, com a diminuição do índice de fluidez e perda nas propriedades mecânicas.[70,71]

O estudo realizado por Alcântara et al.[70] indicou que uma mistura de poliolefinas submetida a repetidas extrusões, em que predominava PEAD; conforme se aumenta o número de extrusões havia tendência de queda na resistência à tração, embora não muito significativa, aumento no alongamento na ruptura e diminuição no índice de fluidez e módulo de elasticidade; essa

unesp

degradação pode ser atenuada pelo uso de estabilizantes específicos para o tipo de agente causador.[71]

A madeira-plástica estudada nessa pesquisa é obtida pela reciclagem de uma mistura de resíduos plásticos, com separação prévia segundo os tipos para que se preparem formulações adequadas, embora aceite trabalhar sem essa condição; é um processo que admite altas proporções de impurezas, o que permite que se dispense a limpeza dos resíduos.

O sistema de reciclagem instalado na fazenda Esperança, em Guaratinguetá, da Obra Social Nossa Senhora da Glória, foi desenvolvido pela firma Zeller GmbH, a confecção dos equipamentos foi feita pela firma REAl GmbH., em Mainberheim, na Alemanha; o conjunto de equipamentos foi doado pelo governo alemão à instituição de Guaratinguetá pelo seu importante trabalho na recuperação de pessoas com dependência de drogas.

Nesse processo, os resíduos plásticos a serem processados são separados em filmes e plásticos rígidos, os filmes são picotados e vão direto a um aglutinador, que aquece o material por atrito e o transforma em flocos; os materiais rígidos passam por uma moagem inicial em um destroçador (*schredder*) e os fragmentos que saem, através de uma esteira, têm os metais magnéticos, particularmente os de natureza ferrosa, retirados por um eletroímã; recebem então uma moagem final em um moinho de martelo.

Os flocos de filmes e os fragmentos de plásticos rígidos são armazenados em silos separados; material tipo PET é moído em separado e conservado em tambores.

A etapa final de processamento envolve a passagem por um misturador, onde grãos e/ou flocos são dosados e homogeneizados (flocos de filmes e grãos de plástico rígido normalmente se destinam a materiais diferentes); o plástico tipo PET recebe uma dosagem controlada pois possui temperatura de fusão muito superior e não se integra à matriz.

unesp

Do misturador o material se dirige a uma máquina de processamento, onde é fundido e homogeneizado (FIGURA 10), com o material recebendo seu formato final em um conjunto de moldes alongados dispostos em um mecanismo giratório semelhante a um revólver, que movimenta-os em torno de um eixo (FIGURA 11); cada molde é imerso em água assim que é preenchido com material fundido; todo o conjunto permanece em um compartimento fechado, o que evita a emissão de gases para o ambiente externo, em particular gases de ácido clorídrico, que costumam emanar quando há alguma parcela de PVC (que era normalmente originado de garrafas de água mineral) na mistura; com a imersão o material sofre resfriamento, se enrijece e contrai o suficiente para ser ejetado com um dispositivo de ar comprimido.

unesp

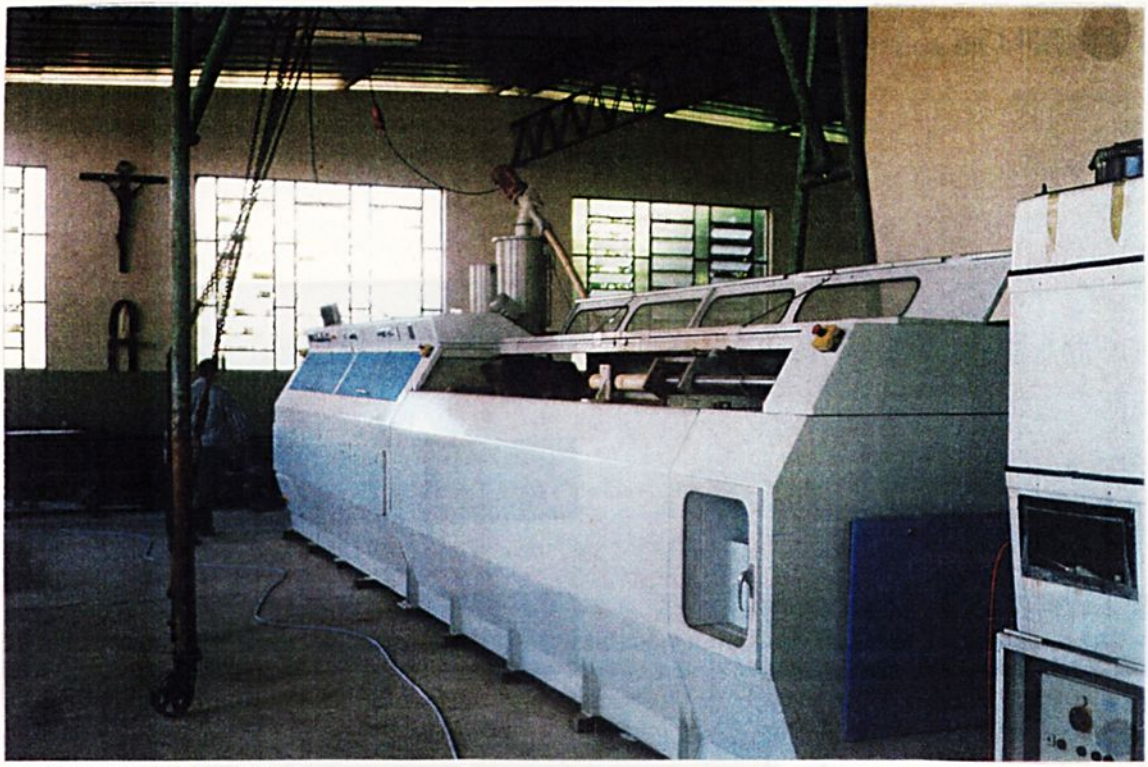


FIGURA 10 - Visão externa da extrusora.



FIGURA 11 - Visão do sistema giratório onde são colocados os moldes; à direita, acima, se observa o mecanismo que expulsa a peça acabada do molde.

A seqüência de equipamentos do processo pode ser observada na FIGURA 12:

:

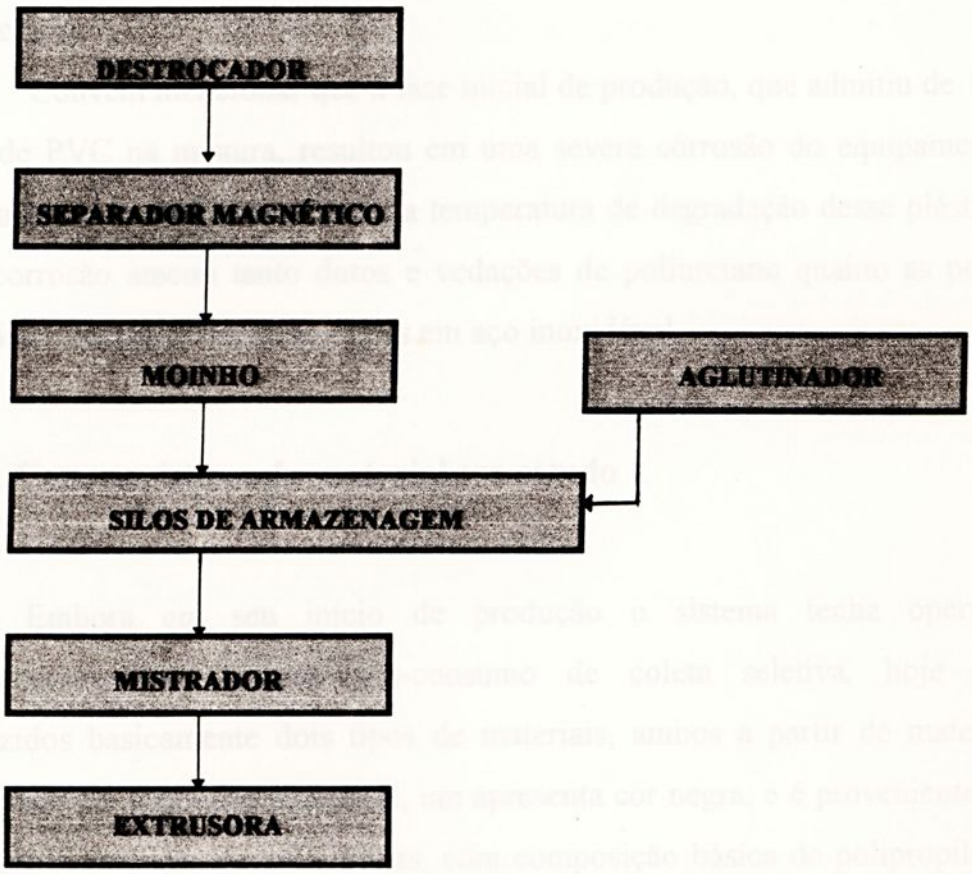


FIGURA 12 - Fluxograma do sistema de produção da madeira-plástica da Obra Social Nossa Senhora da Glória.

O produto assim obtido permanece em repouso até sua estabilização dimensional; pelo fato da peça usualmente possuir uma espessura relativamente elevada para plásticos (que têm alta variação dimensional em função da temperatura), a superfície externa endurece antes do interior; quando o material se contrai, o volume interno não pode ser totalmente preenchido, gerando cavidades além das ocasionadas pela presença de gases e vapores que entram no molde.

As peças produzidas possuem formato alongado, de comprimento fixo (cerca de três metros); a seção variável conforme o molde, podendo ser retangular, triangular, circular, etc., desde que a dimensão mínima corresponda a cerca de quatro centímetros, para que o molde seja convenientemente preenchido.

Convém mencionar que a fase inicial de produção, que admitiu de 10 a 20% de PVC na mistura, resultou em uma severa corrosão do equipamento, agravada por se trabalhar acima da temperatura de degradação desse plástico; essa corrosão atacou tanto dutos e vedações de poliuretano quanto as peças metálicas (inclusive moldes), feitas em aço inoxidável.

3.1.2. Características do material em estudo

Embora em seu início de produção o sistema tenha operado basicamente com resíduos pós-consumo de coleta seletiva, hoje são produzidos basicamente dois tipos de materiais, ambos a partir de material descartado em produção industrial; um apresenta cor negra, e é proveniente da reciclagem de peças de automóveis, com composição básica de polipropileno (PP) modificado com borracha EPDM e combinado com o plástico ABS; o outro, de tonalidade marrom, com alta concentração de alumínio, é proveniente da reciclagem de copos de iogurte, de poliestireno (PS); o alumínio se origina das folhas estampadas usadas para fechar o alimento no recipiente.

A formulação original indicada pelo fabricante prevê uma mistura básica de PEAD e PEBD, em uma relação variando de 4:6 a 6:4, essa mistura básica deve perfazer um mínimo de 50% do total, podendo chegar a 100%; PVC pode ser adicionado em até 20% do total; outros materiais que não irão se fundir à mistura mas que podem fazer parte da formulação incluem alumínio (até 20%), cobre (até 20%), madeira (até 10%), papel (até 10%),

unesp

ferro (até 1% se as partículas forem menores que 2 mm) e outros plásticos (até 20%); os valores de propriedades mecânicas atribuídas às diferentes composições possíveis estão entre cerca de 15 a 25 MPa para resistência à flexão, cerca de 11 MPa para resistência à tração e de 0,5 a 0,9 GPa para o módulo elástico, o fabricante recomenda temperatura de extrusão entre 160 e 180°C, embora o equipamento possa trabalhar até 400°C.[72]

Antes do início da produção a formulação alemã foi adaptada às condicões locais de processamento e os materiais resultantes foram testados no Centro Técnico Aeroespacial (CTA) de São José dos Campos[73], havendo comparação com amostras alemãs e madeiras, ensaiando-se peças cilíndricas de 40 mm de diâmetro (tal qual saídas da extrusora) por 80 mm de comprimento; os valores médios obtidos foram:

TABELA 11 - Resultados dos ensaios realizados no CTA.[73]

AMOSTRAS	Resistência à Tração [MPa]	Resistência à Compressão [MPa]	Resistência ao Cisalhamento [MPa]
Plástico nacional	5,7	21,27	6,94
Plástico alemão	6,19	21,92	6,86
Eucalipto	36,16	35,02	15,69
Peroba	62,99	57,28	33,03

A formulação utilizada nesses ensaios continha 40% de poliestireno, 20% de PEAD, 20% de PEBD e 20% de PET; os materiais eram então recolhidos de um programa de coleta seletiva realizado na região de Guaratinguetá.

Posteriormente foram realizados ensaios na Universidade de Darmstadt, Alemanha, ainda com material produzido de resíduos pós-consumo; estes ensaios foram feitos a título de trabalho de graduação de aluno bolsista da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá[74], apresentando os resultados visualizados na TABELA 12.

unesp

TABELA 12 - Resultados dos ensaios realizados na Universidade de Darmstadt, Alemanha.[74]

Propriedade	Norma utilizada	Média	Desvio Padrão
Resistência à Flexão	DIN 53 452	9,28 MPa	1,47 MPa
Resistência ao Impacto	DIN 53 453	2,00 mJ/mm2	0,49 mJ/mm2
Resistência à Tração	DIN 53 455	0,45 MPa	0,28 MPa

O baixo valor obtido para a resistência à tração nesses ensaios se deve à diminuta seção do corpo-de-prova, 2,1 x 6 mm, que possibilitava o seccionamento por impurezas como papéis e plásticos não-fundidos.[74]

3.1.3. Aplicações com interesse comercial

Para uma melhor compreensão do interesse comercial da madeira-plástica, é interessante saber o ambiente específico no qual a reciclagem de plásticos se insere.

Plásticos provenientes de resíduos podem ser comercializados das seguintes formas:[20]

plástico misturado: o plástico é apenas separado de outros resíduos;

plástico separado: quando é separado segundo o tipo de plástico;

plástico triturado: material é triturado na granulometria adequada, já separado segundo o tipo;

plástico aglutinado: quando o plástico triturado é lavado, seco e adensado em um aglutinador;

plástico granulado ou peletizado: o material limpo é fundido em extrusora, saindo como um fio espesso, que é resfriado e cortado em pedaços de 2 a 3 mm;

artefatos acabados: quando está no formato final para uso pelo consumidor;

madeira-plástica: quando é produzido em peças relativamente espessas, destinadas a serem manipuladas e empregadas como madeira.

unesp

Quanto mais elaborado o material, maior é o preço que pode ser obtido na venda.[20]

O uso dos processos de produção da madeira-plástica se justifica nos casos em que os resíduos plásticos não são suficientemente limpos ou quando cada tipo não possui quantidade suficiente ou mercado comprador que justifique sua reciclagem em separado.

A reciclagem de filmes plásticos, normalmente contaminados com restos orgânicos é um caso em que a reciclagem em separado pode não ser interessante.

O potencial comercial da madeira-plástica no Brasil esbarra nas condições de preço muito baixas praticadas no setor de madeira, que ainda encontra facilidade de trabalhar na informalidade e obter matéria prima barata pela extração irregular de madeiras nativas.

Uma utilização de interesse, a de *pallets* industriais, encontra problemas de qualidade quando os plásticos estão muito degradados ou são pouco compatíveis, mas possui mercado para uma produção em escala industrial. Outros usos indicados para a madeira-plástica incluem: [20, 72]

Construção civil: isolamento de fundações, pilares para fundações em terrenos arenosos e lamosos, estrutura de telhados, balaustradas de balcões, móveis para interiores e jardim, pontaletes, escoras, formas de concreto, tábuas e sarrafos;

Horticultura: cercas e paliçadas, envolvimento de canteiros, muros, pérgulas, caixas de flores, bandejas de plantas, treliças, caixas de compostagem e pisos;

Agricultura e criação: criação de gado, construção de estufas, cercas eletrificadas, aparatos e separações de estábulos e celeiros, manjedouras, suportes para videiras e drenagem;

Construção de estradas e paisagismo: calçamento, guias de calçadas, cabeços de cais, isolamento, cobertura de bocas de lobo, abrigos de passageiros de ônibus, redutores de velocidade, construção de *playgrounds*,

unesp

construção de estacionamentos, compartimento em estacionamentos de vários andares, postes de telefone e postes de iluminação;

Aterros e barragens: proteção de aterros, proteção de encostas, quebra-ondas, barreiras marinhas, guarnição de eclusas, proteção em bate-estacas e tablados para banhistas;

Proteção ambiental: Indústria de deposição do lixo, isolamento e redesenvolvimento de depósitos de lixo e esgotos;

Outros: piscinas, locais de acampamento, áreas tropicais, indústria química (por exemplo em pavimentos) e áreas potencialmente explosivas.

3.2. Procedimentos Experimentais

3.2.1 Os materiais

O material empregado nos testes se originou da produção normal do sistema de reciclagem pertencente à Obra Social Nossa Senhora da Glória.

A atual produção de madeira-plástica na Fazenda Esperança gera dois tipos distintos de material:

O tipo de maior produção é obtido da reciclagem de sucata de automóveis, fornecida pela empresa General Motors, de São José dos Campos, e é composto principalmente a partir de pára-choques e painéis do termoplástico polipropileno (PP), modificado pela adição de borracha EPDM; uma certa quantidade de plástico ABS, também proveniente de partes de carros é adicionada na mistura; o produto final possui cor negra e apresenta razoável quantidade de grãos de outros plásticos, em geral PET, mais duros e não fundidos, que ficam dispersos aleatoriamente na matriz de polipropileno; é normal a ocorrência de bolhas ou vazios, alguns com até 4 cm de comprimento, na parte interna das peças.

unesp

O segundo tipo de material, que é obtido da reciclagem de sucata industrial da firma Leite Paulista, de Guaratinguetá; os copos de iogurte são triturados e misturados a outros grãos de plástico rígido, sobretudo PET, gerando um produto de cor marrom claro, levemente arroxeado, com grânulos de PET e alumínio dispersos na matriz de poliestireno; há menor ocorrência de bolhas ou vazios neste material em relação ao anterior.

Foram selecionadas quatro amostras do material de base polipropileno e quatro amostras do material de base poliestireno, sendo que todas as peças eram prismas alongados, com seção aproximada de 7 x 9 cm e 3 metros de comprimento, das quais se obtiveram os corpos-de-prova para os ensaios. As peças foram cortadas transversalmente com serra hidráulica e longitudinalmente com serra circular, em baixa rotação, de modo a prevenir aquecimento excessivo; o acabamento final dos corpos-de-prova foi realizado em máquinas fresadoras.

3.2.2. Metodologia

Determinação da densidade aparente:

A densidade aparente do material foi obtida a partir dos corpos-de-prova elaborados para o ensaio de compressão específico para plásticos, possuindo dimensões 12,7 x 12,7 x 25,4 mm.

O peso de cada amostra foi determinado em uma balança semi-analítica Tecnal, com precisão de 0,001 g; simultaneamente foram tomadas as medidas de volume pelo deslocamento de líquido em proveta graduada e pela medida das dimensões externas das amostras com o uso de paquímetro.

A densidade aparente foi obtida pela razão entre o peso e o volume determinados.

As determinações foram realizadas no Laboratório de Química da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

unesp

Ensaios de tração: os ensaios em tração foram feitos com o emprego de duas normas distintas, visando-se comparações diretas do material reciclado com plásticos e madeiras.

Nos ensaios pela norma ASTM D 638-96, específica para plásticos, utilizou-se o padrão de corpo-de-prova do tipo III, recomendado para amostras com espessura acima de 7 mm; conforme determinado na norma, o material foi usinado até a espessura máxima admissível, de 14 mm; os ensaios foram realizados no Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Química de Lorena, em equipamento para ensaios mecânicos 810 *Material Test System* (MTS).

Nos ensaios realizados segundo a norma ASTM foram empregados quatro corpos-de-prova de poliestireno e cinco corpos-de-prova de polipropileno retirados das amostras conforme a FIGURA 13; determinou-se a resistência à tração, o módulo elástico e o alongamento na ruptura; o ensaio foi realizado à velocidade constante de 5,0 mm/min., com tomada de dados a cada 0,2 segundos.

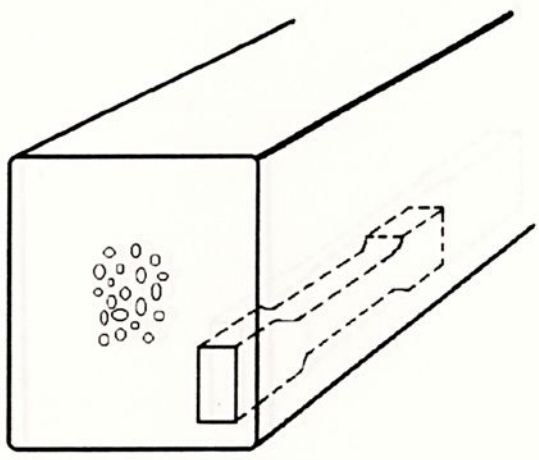


FIGURA 13 - Região de extração do corpo-de-prova de tração no padrão da norma ASTM D 638.

Tanto o material de base poliestireno como o material de base polipropileno não apresentaram região de comportamento linear, calculando-se o módulo por uma reta secante à curva tensão x deformação, que inicia na interseção da curva com o eixo da deformação e termina no ponto da curva em que a deformação aumenta sem que haja aumento na tensão, conforme indicado nessa norma.

Os ensaios visando a comparação direta com madeiras utilizaram o padrão recomendado na norma NBR 7190: 1997, utilizando-se três corpos-de-prova de poliestireno e quatro corpos-de-prova de polipropileno e foram retirados das amostras conforme ilustrado na FIGURA 14; determinando-se a resistência à tração, os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeiras da USP, em São Carlos, utilizando aparelho para ensaios mecânicos marca Ansler, de fabricação suíça, com capacidade para cargas de até cerca de 245.000 N; a temperatura ambiente durante o ensaio foi de 26°C, com umidade do ar de 67%.

Os ensaios segundo a norma NBR foram feitos com aumento constante de tensão, à razão de 10 MPa/min.

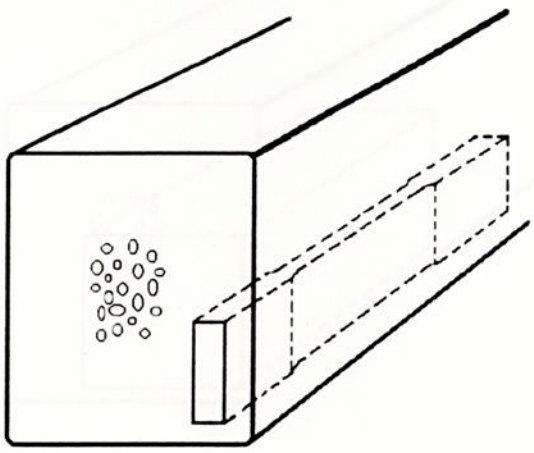


FIGURA 14 - Região de extração do corpo-de-prova de tração no padrão da norma NBR 7190.

Ensaios de compressão: de maneira semelhante aos ensaios de tração, os ensaios de compressão foram realizados segundo duas normas, a norma NBR 7190: 1997, específica para madeiras, no Laboratório de Madeiras da USP (LAMEN), e segundo a norma ASTM D 695-96, específica para plásticos, com os ensaios sendo realizados no Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Química de Lorena.

Os ensaios segundo a norma NBR 7190 foram feitos com quatro corpos-de-prova de base poliestireno (um para cada amostra) e oito corpos-de-prova de base polipropileno (dois para cada amostra). Os corpos-de-prova foram elaborados nas dimensões 100mm x 50mm x 50mm, padrão recomendado para compressão normal às fibras, escolhido por se considerar que o material apresentava comportamento semelhante à madeira nesse tipo de ensaio; os corpos-de-prova foram retirados da região próxima das arestas das amostras originais, conforme pode ser observado na FIGURA 15:

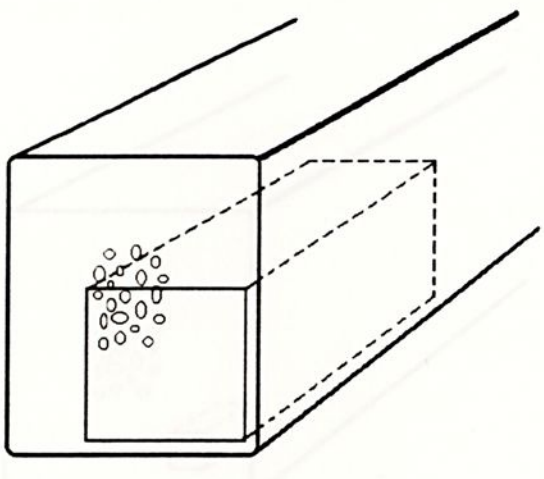


FIGURA 15 - Região de extração do corpo-de-prova de compressão no padrão da norma NBR 7190.

Os ensaios foram realizados em um equipamento de ensaios mecânicos de marca Ansler, de fabricação suíça, com capacidade de carga de cerca de 245.000 N.

Aplicou-se um aumento constante de tensão, à taxa de 10 MPa / min., determinando-se a resistência à compressão; a temperatura ambiente durante o teste foi de 26° C e a umidade do ar de 67%.

Para os ensaios segundo a norma ASTM D695 foram confeccionados quatro corpos- de-prova de base poliestireno e cinco corpos-de-prova de base polipropileno, com forma de prisma retangular de dimensões 25,4 mm x12,7 mm x 12,7 mm, procurando-se extrair o material da região mais compacta das amostras, conforme indicado na FIGURA 16; para os cálculos de tensão empregou-se a menor área da seção perpendicular à direção do deslocamento, que se deu à velocidade constante de 1,3 mm/minuto, com medições a cada 0,5 segundos; os testes foram realizados no equipamento para ensaios mecânicos 810 *Material Test System* (MTS).

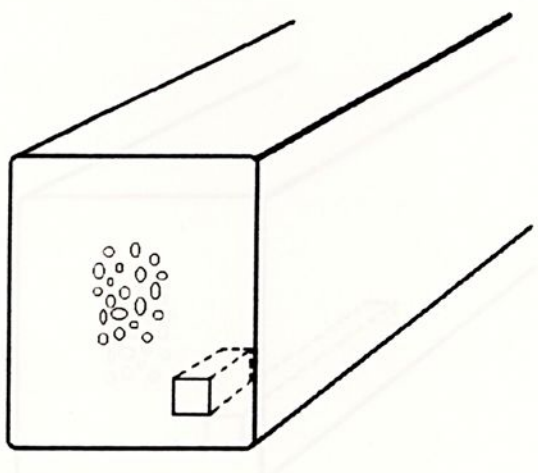


FIGURA 16 - Região de extração do corpo-de-prova de compressão no padrão da norma ASTM D 695.

unesp

Nesses ensaios obteve-se a resistência à compressão e o módulo elástico compressivo; no caso do módulo, embora os materiais apresentem uma região de comportamento linear, foi necessária a correção do ponto de referência inicial do gráfico de tensão *versus* deformação devido à curvatura pela acomodação do material, procedimento que é previsto na norma.

Ensaios de flexão: os ensaios para a determinação de resistência à flexão e módulo elástico foram realizados apenas segundo a norma ASTM D 790-96 a, no equipamento para ensaios mecânicos 810 *Material Test System* (MTS), do Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Química de Lorena.

Os corpos-de-prova testados foram elaborados em forma de prisma retangular, de dimensões 191mm de comprimento, 13mm de largura e 9,6mm de espessura.

Foram testadas quatro amostras de base poliestireno e cinco amostras de base polipropileno; as amostras foram cortadas paralelamente ao comprimento das peças originais, na região mais densa e homogênea, situada próximo às bordas, como observado na FIGURA 17:

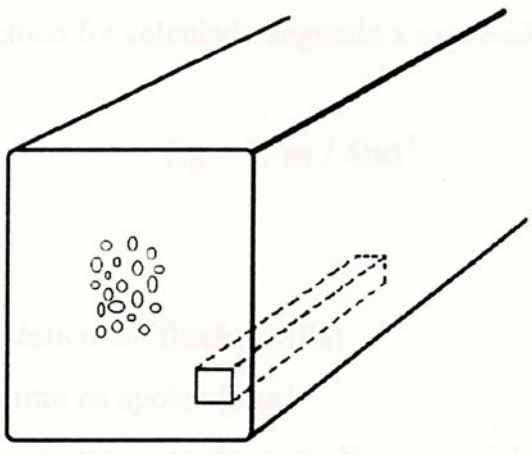


FIGURA 17 - Região de extração do corpo-de-prova de flexão.

O padrão escolhido foi o do Método de Teste I, Procedimento A, de três pontos, com dois apoios cilíndricos de 8mm de diâmetro, distanciados 150mm entre si e um cilindro de igual diâmetro na peça que aplica o carregamento, em um ponto centralizado entre os apoios.

A velocidade de deslocamento do aplicador da carga contra a amostra foi constante, de 56,8mm/min, com as leituras sendo registradas a intervalos de 0,1 s.

A tensão foi calculada segundo a expressão:

$$S = 3PL/2bd^2$$

Sendo:

S - Tensão máxima externa [MPa]

P - Carga [N]

L - Distância entre os apoios [mm]

b - Largura do corpo-de-prova no ponto de aplicação da carga [mm]

d - Espessura do corpo-de-prova no ponto de aplicação da carga [mm]

O módulo elástico foi calculado segundo a expressão:

$$E_F = L^3m / 4bd^3$$

Sendo:

E_F - Módulo elástico em flexão [MPa]

L - Distância entre os apoios [mm]

m - Inclinação da tangente da parte linear inicial da curva carga x deflexão [N/mm]

b - Largura do corpo-de-prova no ponto de aplicação da carga [mm]

d - Espessura do corpo-de-prova no ponto de aplicação da carga [mm]

unesp

O material de base poliestireno apresentou região de linearidade em flexão, o que não aconteceu com o material de base polipropileno, calculando-se nesse caso a inclinação da curva carga x deflexão por uma reta secante, conforme previsto na norma, iniciando na interseção da curva com o eixo da deflexão, e terminando no ponto da curva em que a deflexão aumenta sem aumento na carga aplicada; esse último ponto foi arbitrado de maneira semelhante ao procedimento seguido na indicação da norma ASTM para ensaios de tração.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios realizados resultaram nos seguintes valores:

4.1. Densidade aparente

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 1,061 g/cm^3 pela geometria e 1,065 g/cm^3 por deslocamento de líquido.

Desvio Padrão: 0,0010 g/cm^3 pela geometria e 0,032 g/cm^3 por deslocamento de líquido.

Coeficiente de Dispersão: 0,94% pela geometria e 2,975% por deslocamento de líquido

MATERIAL DE BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 1,028 g/cm^3 pela geometria e 1,040 g/cm^3 por deslocamento de líquido.

Desvio Padrão: 0,0193 g/cm^3 pela geometria e 0,0137 g/cm^3 por deslocamento de líquido.

Coeficiente de Dispersão: 1,88% pela geometria e 1,32% por deslocamento de líquido.

4.2. Propriedades Mecânicas

4.2.1. Ensaios de Tração Padrão NBR 7190 (madeiras)

Resistência à Tração:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 6,83 MPa

Desvio Padrão: 0,540 MPa

Coeficiente de dispersão: 7,90%

unesp

MATERIAL BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 7,96 MPa

Desvio Padrão: 1,177 MPa

Coeficiente de dispersão: 14,78%

Os valores de resistência à tração segundo a norma NBR 7190 estão corrigidos em treze pontos percentuais para mais devido a um desvio de regulagem do equipamento de ensaio verificado após os testes.

4.2.2. Ensaios de Compressão Padrão NBR 7190 (madeiras)

Resistência à Compressão:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 12,015 MPa

Desvio Padrão: 1,265 MPa

Coeficiente de dispersão: 10,53%

MATERIAL DE BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 13,65 MPa

Desvio Padrão: 1,765 MPa

Coeficiente de Dispersão: 12,93%

4.2.3. Ensaios de Tração Padrão ASTM D 638 (plásticos)

Resistência à tração:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 10,82 MPa

Desvio Padrão: 0,976 MPa

Coeficiente de Dispersão: 9,02%

MATERIAL DE BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 13,17 MPa

Desvio Padrão: 0,8955 MPa

Coeficiente de Dispersão: 6,80%

Módulo Elástico:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 0,477 GPa

Desvio Padrão: 0,0425 GPa

Coeficiente de Dispersão: 8,93%

MATERIAL DE BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 0,474 GPa

Desvio Padrão: 0,0177 GPa

Coeficiente de Dispersão: 3,74%

Alongamento na Ruptura:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 0,0226 mm/mm ou 2,26%

Desvio Padrão: 0,002605 mm/mm

Coeficiente de Dispersão: 11,53%

MATERIAL DE BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 0,0287 mm/mm ou 2,87%

Desvio Padrão: 0,002495 mm/mm

Coeficiente de Dispersão: 8,69%

4.2.4. Ensaios de Compressão Padrão ASTM D 695 (plásticos)

Resistência à compressão:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 19,87 MPa

Desvio Padrão: 1,471 MPa

Coeficiente de Dispersão: 7,40%

MATERIAL DE BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 27,75 MPa

Desvio Padrão: 1,438 MPa

Coeficiente de Dispersão: 5,18%

Módulo Elástico:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 1,028 GPa

Desvio Padrão: 0,0646 GPa

Coeficiente de Dispersão: 6,28%%

MATERIAL DE BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 1,170 GPa

Desvio Padrão: 0,0987 GPa

Coeficiente de Dispersão: 8,36%

unesp

4.2.5. Ensaios de Flexão Padrão ASTM D 790 (plásticos)

Resistência à Flexão:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 13,22 MPa

Desvio Padrão: 0,74 MPa

Coeficiente de Dispersão: 5,57%

MATERIAL DE BASE POLIPROPILENO MODIFICADO

Média: 20,82 MPa

Desvio Padrão: 1,34 MPa

Coeficiente de Dispersão: 6,42%

Módulo Elástico:

MATERIAL DE BASE POLIESTIRENO

Média: 1,292 GPa

Desvio Padrão: 0,209 GPa

Coeficiente de Dispersão: 16,14%

MATERIAL DE BASE POLIPROPLENO MODIFICADO

Média: 1,049 GPa

Desvio Padrão: 0,142 GPa

Coeficiente de Dispersão: 13,49%

unesp

A observação dos corpos-de-prova rompidos indica, no caso da flexão e da tração, que os materiais dispersos na matriz, como os grãos de PET (FIGURA 18 e FIGURA 19), alumínio (FIGURA 20) e PVC decomposto (grãos amarelados e quebradiços, como visto na FIGURA 21) estão associados ao desenvolvimento inicial da fratura, mesmo onde há uma grande incidência de vazios; no caso dos grãos de PET, sua forma achatada atua como um forte concentrador de tensões, o que explica sua constante presença nas seções rompidas; nos ensaios de compressão há uma tendência ao rompimento segundo as superfícies de fluxo na matriz do material e onde há maior concentração de vazios, por bolhas ou porosidade, que ocorrem normalmente na parte central das peças (FIGURA 22 e FIGURA 23).

unesp

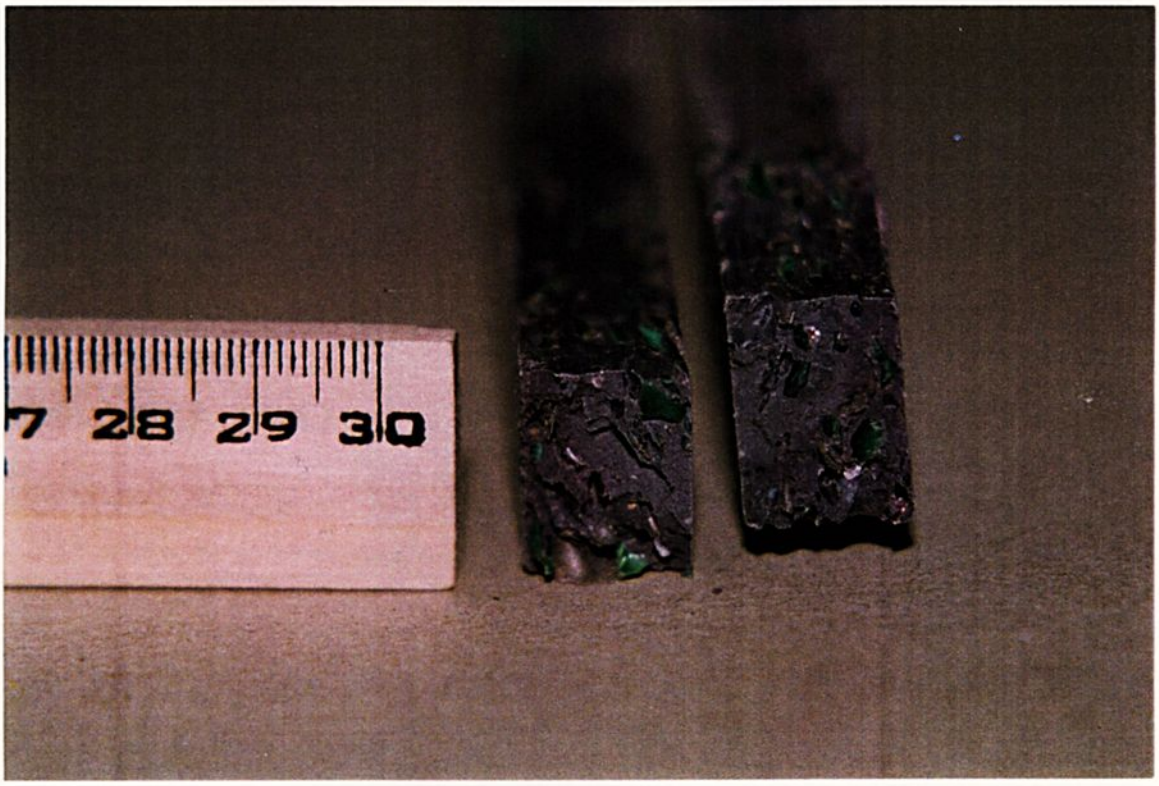


FIGURA 18 - Seção rompida em tração no padrão da ASTM D 638 para material de base poliestireno, com grão de PET favorecendo a fratura.

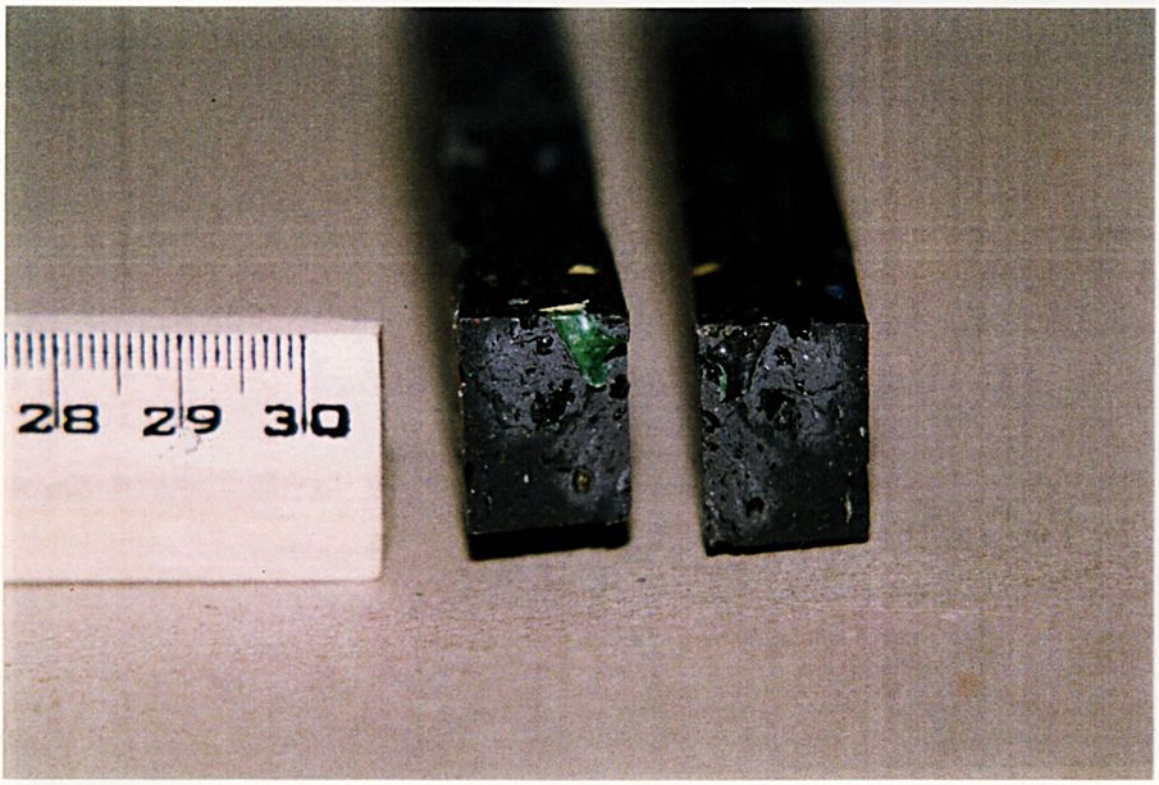


FIGURA 19 - Seção rompida em tração no padrão ASTM D 638 para material de base polipropileno, com grão de PET favorecendo a fratura.

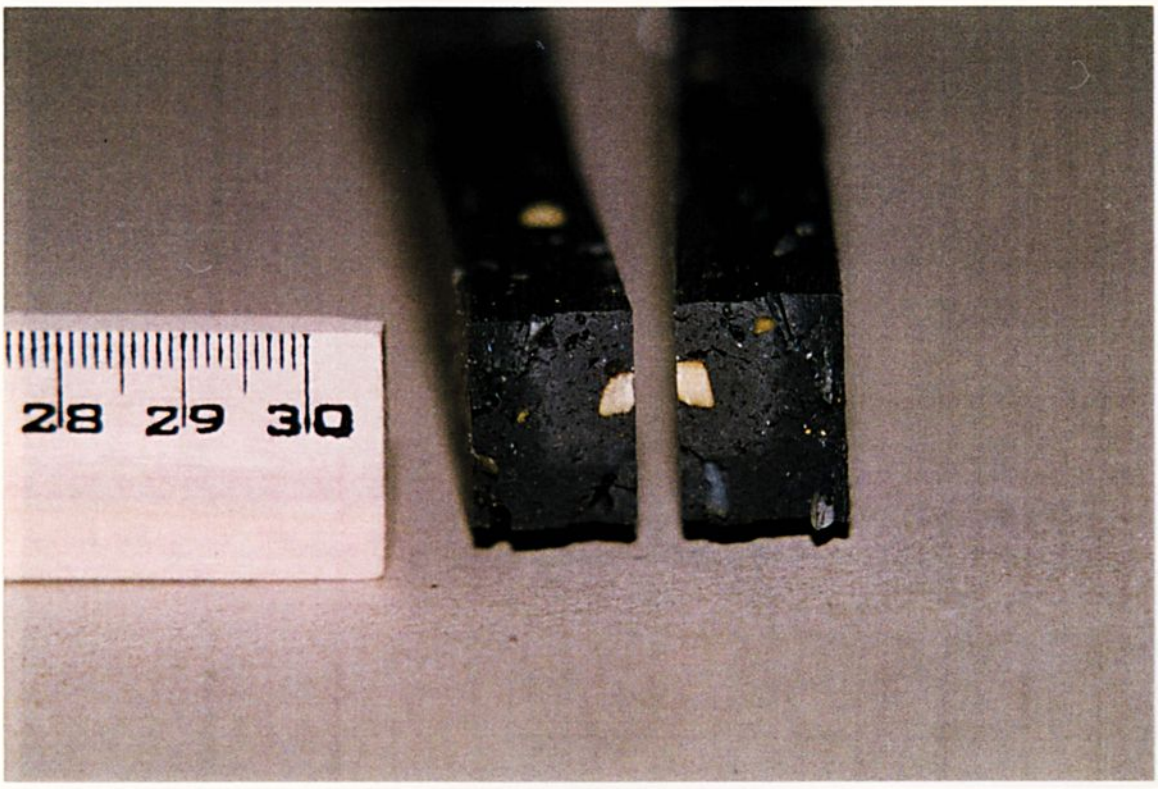


FIGURA 20 - Seção rompida em tração no padrão ASTM D 638 para material de base polipropileno, em grão de PVC decomposto.

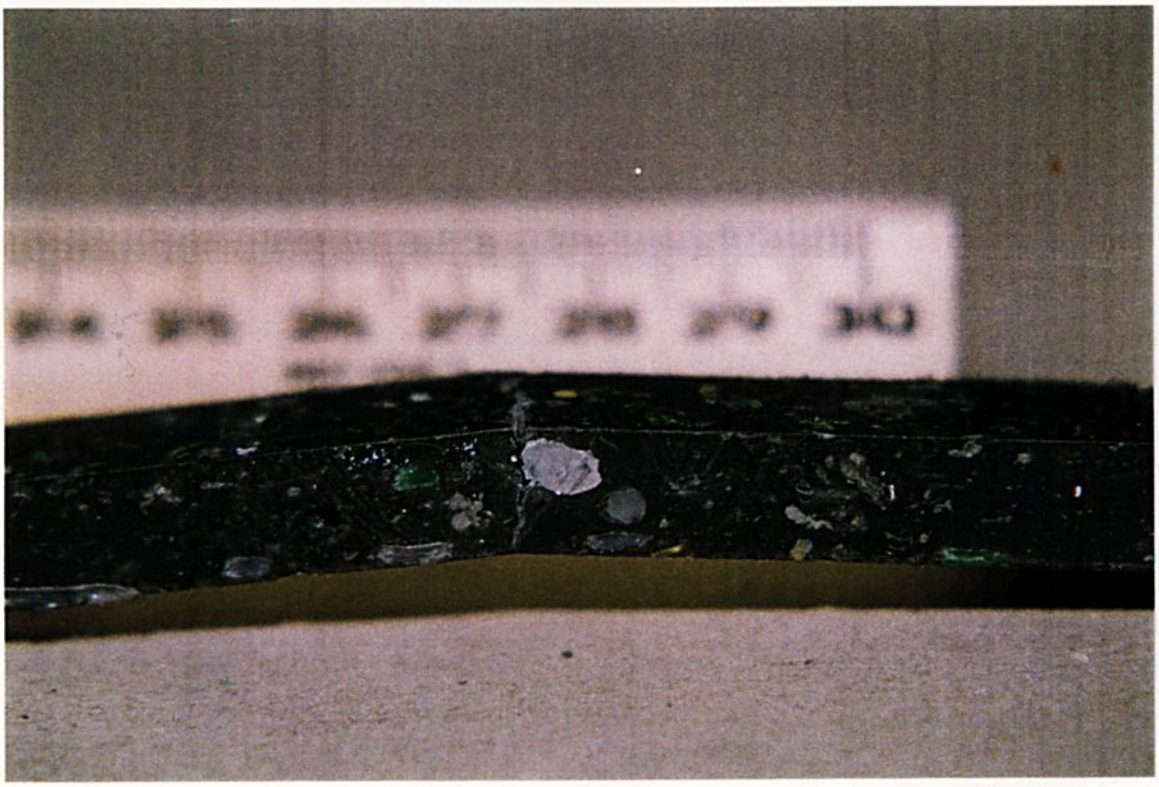


FIGURA 21 - Visão lateral de corpo-de-prova de flexão rompido em contato com grão de alumínio.

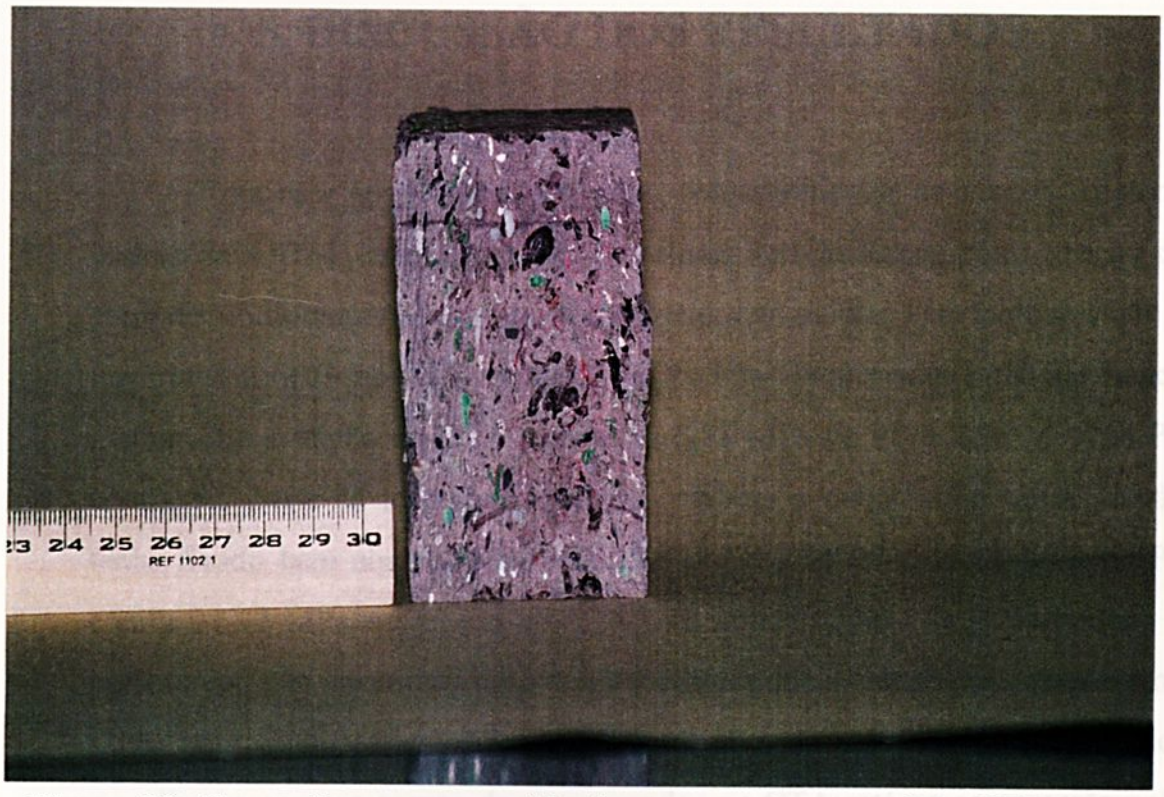


Figura 22: Corpo-de-prova rompido de compressão no padrão NBR 7190 de material de base poliestireno.



FIGURA 23 - Corpo-de-prova rompido de compressão no padrão NBR 7190 de material de base polipropileno.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos, considerando-se os ensaios feitos no padrão da ASTM, verifica-se que os valores de resistência, com exceção da compressão do material de base poliestireno, tem médias bem melhores que o material ensaiado no CTA; a tração no padrão para madeira foi um pouco melhor que a tração no CTA (média de 6,83 MPa no PS e 7,96 MPa no PP contra 5,7 MPa da formulação antiga), embora a compressão nesse padrão tenha ficado bem abaixo (média de 12,015 MPa no PS e 13,65 MPa no PP contra 21,27 MPa no ensaio do CTA); as composições de polipropileno e poliestireno não devem ser tidas como melhores que a composição ensaiada no CTA pela significativa diferença no padrão de ensaio; como a maior semelhança com os corpos-de-prova usados no CTA está na compressão pelo padrão para madeira, o resultado apresentado por esse beneficiaria a formulação empregada anteriormente; as peças produzidas com menor seção transversal, como é o caso dos tarugos testados no CTA, têm menor porosidade e menor ocorrência de bolhas; a diferença nesse ensaio deve ser devida a esse fator, e não devido a uma composição melhor.

O resultado da resistência à flexão obtido na Alemanha (média de 9,28 MPa) está sensivelmente abaixo dos resultados obtidos para o material de base poliestireno (média de 13,22 MPa) e abaixo da metade da média do material de base de polipropileno (20,82 MPa), o que indica uma melhor qualidade das formulações posteriores; não houve ensaios de compressão na Alemanha para comparação e os ensaios de tração foram claramente afetados pelo padrão do corpo-de-prova, não representando dados válidos para a resistência, que deve ser muito maior.

Os valores das resistências e dos módulos elásticos apresentados nos ensaios realizados segundo as normas da ASTM, quando comparados com valores relativos aos plásticos virgens, indicam um decréscimo significativo

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

nas propriedades originais, que em parte pode ser explicada pela presença de grânulos não fundidos de plásticos como o PET atuando como iniciadores de falha, o que pode ser observado em várias seções de rompimento dos corpos-de-prova; outra explicação para esse decréscimo é uma possível degradação térmica do material durante o processamento, que será tanto maior quanto maior for a temperatura e o tempo de permanência no estado fundido; embora a adição de EPDM ao polipropileno reduza um pouco a resistência e o módulo elástico do material, a carga mineral presente nas peças de polipropileno atua de maneira a compensar esse efeito.

O alongamento na ruptura do poliestireno reciclado, com média de 2,26%, se manteve dentro da faixa do material virgem (1,2 a 2,5%), mas o alongamento do polipropileno é cerca de um centésimo do alongamento da resina virgem (100 a 600%); como a degradação do polipropileno aumentaria sua dutilidade, essa diferença deve ser devida à presença de carga mineral e, talvez, alguma influência da mistura com outros plásticos.

Como as características do material gerado pelo processo da madeira-plástica não indicam seu uso em aplicações típicas dos plásticos, os resultados obtidos pelos ensaios segundo as normas da ASTM visam a verificação das perdas de propriedades devido a misturas incompatíveis ou degradação do material; como verificou-se tal fato, providências e verificações podem ser indicadas para solucionar o problema.

Os dados obtidos nos ensaios padronizados para madeiras, como pode ser observado, tiveram valores demasiado inferiores aos obtidos segundo os parâmetros para plásticos, o que levou a realização de alguns testes complementares para verificar a causa das diferenças.

Como relatado, os valores dos ensaios de tração no padrão para madeira foram corrigidos, pois se verificou uma faixa de carregamento não aferida; entretanto, outras diferenças permaneceram; ensaiando-se ambos os tipos de corpos-de-prova de compressão nos diferentes equipamentos

unesp

verificou-se que os valores no padrão para madeira e no padrão para plástico se mantinham nos mesmos intervalos, diferentes entre si, o que, considerando terem as mesmas proporções relativas entre os lados, deve se dever ao fato dos espécimes ensaiados segundo a norma da ASTM terem sido extraídos de uma região maciça e homogênea, enquanto os espécimes maiores referentes aos ensaios no padrão para madeira inevitavelmente incluíam uma região mais porosa e frágil, do centro da amostra.

O mesmo não podia ser afirmado para as diferenças nos ensaios de tração, pois a região de extração não era significantemente diferente, embora ao repetir o procedimento usado para compressão se verificasse que os corpos-de-prova no padrão para plástico forneceram valores de resistência superiores aos do padrão para madeira em todos os casos; esse fato pode ser explicado como devido ao efeito de uma maior relação entre superfície e volume ter favorecido um comportamento mais dútil no padrão de madeira, enquanto o padrão para plástico se comporta de maneira mais rígida e frágil.

Uma menor resistência e maior dutilidade como função de uma maior velocidade de deformação, que aconteceu no teste pelo padrão da ASTM, embora plausível, não se verificou claramente ao se variar as velocidades de ensaio; pode ter, entretanto, alguma influência na diferença residual de 19% para o poliestireno e de 18% para o polipropileno que não é explicada pela geometria do corpo-de-prova.

Uma diferença residual na regulagem relativa entre os equipamentos e o modo diferenciado de carregamento entre os métodos pode também contribuir como uma diferença entre os resultados dos ensaios.

Os resultados obtidos no padrão para madeira, quando comparados com as propriedades apresentadas pelos diferentes tipos de madeira, apresentam valores equivalentes aos apresentados em relação à direção normal às fibras, mas muito inferiores, mesmo se comparado à madeiras fracas como o pinus, quando se refere à direção paralela às fibras.

unesp

Os resultados obtidos não recomendam a aplicação da madeira-plástica em usos estruturais das madeiras nas quais as próprias madeiras escolhidas são as de maior resistência.

O efeito da fluência é desconhecido para esses materiais em condições de carregamento típicas para madeiras, e pode afetar de maneira imprevista aplicações de longo prazo, caso em que se deve ponderar os riscos envolvidos.

5.1. Propostas de uso para a madeira-plástica

Entre as aplicações propostas, as que se enquadram como típicas de madeiras de boa resistência, como estruturas de telhado, balaustradas de balcões, abrigos de passageiros, postes de telefone e iluminação e certos componentes de *playgrounds* devem ser evitadas; condições de carregamento cíclico e carregamento estático de longa duração, mesmo em valores de tensão bem abaixo dos valores de resistência determinados devem ser implementados com cautela, pois o material deverá apresentar maior risco de falha que o similar de madeira.

Em aplicações que podem levar o material a ter contato com fogo, como é o caso de mourões, sujeitos a queimadas, e pisos industriais, que podem se inflamar em algum acidente isolado, deve-se ter em conta que os materiais derivados de plásticos comuns, como a madeira-plástica, são mais sensíveis ao fogo que as madeiras naturais, mesmo quando são tratados (pois tenderão a derreter), e se inflamam com certa facilidade quando sem tratamento; este fato pode ser um impecilho para muitos usos em construção civil, como o uso de maneira exposta em paredes e forros.

O uso em fundações, embora possa não atender às exigências quanto à estabilidade dimensional em carregamento de longa duração, tem vantagem sobre a madeira em relação à resistência contra degradação biológica em

unesp

ambientes úmidos, como é o caso também dos uso em aterros e barragens, esgotos, horticultura e algumas aplicações em agricultura e criação animal.

Nas aplicações em que o material é exposto ao intemperismo, mesmo no caso de plásticos não tratados com protetores contra irradiação solar e oxidação, a madeira-plástica terá vantagem em relação aos tipos comuns de madeira, já que mesmo madeiras nobres só mantém um bom aspecto se tratadas; como pode ser observado, em um país tropical como o Brasil, a ocorrência de períodos com muita chuva, associados à intensa atividade de fungos, bactérias e insetos, tornam a madeira plástica interessante em usos externos como bancos de jardim e cercas.

Redutores de velocidade, guias de calçadas, calçamentos, tampos de bocas-de-lobo, base de sinalização do tipo "olho-de-gato" em rodovias e usos semelhantes são interessantes e podem ser implementados se houver condições competitivas de preço ou uma legislação favorável.

A questão do preço é importante quando se tem por objetivo competir com madeiras comuns e artefatos de cimento, que são produzidos a baixo custo; o fato de não haver incentivos públicos para a reciclagem e os custos elevados envolvidos em equipamentos, transporte, salários e encargos, impostos e outras despesas típicas de uma estrutura industrial tornam muito difícil a competição com estruturas mais ou menos informais, como é comum nos setores que trabalham com os produtos mencionados, que podem prescindir de tecnologia moderna e usar mão-de-obra de baixa qualificação.

O custo ambiental de se negligenciar o problema é certo, e acabará por fim sendo pago no futuro, caso a sociedade espere que a solução do problema seja feita sem seu apoio; plantas de reciclagem de plásticos usualmente demandam subsídios, mesmo nos EUA, baluarte das leis de mercado, sob pena de perderem-se investimentos e voltarem os resíduos.

unesp

5.2. Sugestões para o processo de fabricação

Considerando as diferenças existentes entre os valores de resistência e módulo da madeira-plástica e os plásticos que compõe sua matriz, algumas medidas podem melhorar essas características:

- a adição de estabilizantes e antioxidantes para proteção contra a degradação térmica durante o processamento;
- a adição de plastificantes e agentes lubrificantes, que podem permitir uma redução na temperatura de fusão da mistura e ainda assim ter um correto preenchimento do molde, com prevenção da degradação térmica do material; sua adição também pode permitir a produção de peças mais delgadas, o que pode ampliar significativamente os campos de aplicação possíveis;
- a retirada de elementos que fragilizam o material, como os grão de PET e PVC, o que tornará os produtos mais homogêneos e menos suscetíveis a falha em uso;
- uma condição menos severa de contração por resfriamento do material no molde pode reduzir a ocorrência de vazios internos; como o sistema não permite, por exemplo, que se controle a temperatura da água de resfriamento, a manufatura dos moldes de maneira a minimizar o choque térmico (usando revestimentos, por exemplo) pode ser uma opção, que também permitiria reduzir a temperatura do material injetado;
- a adaptação de um sistema de desgaseificação do material fundido poderia também reduzir a incidência de vazios por gases de elementos voláteis e ar capturado com os grãos;
- a corrosão generalizada do equipamento por gases oriundos da decomposição do PVC são um alerta para sua não utilização nesse tipo de processo, ou pelo menos não em temperaturas acima de 200°C.



6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do estudo de plásticos, madeiras, resíduos e reciclagem de plásticos, com ênfase no estudo da chamada madeira-plástica, em particular a produzida pela Obra Social Nossa Senhora da Glória, levaram a concluir que:

- A madeira-plástica no atual estágio de desenvolvimento não é um substituto completo da madeira, mas tem usos em que leva vantagem, e pode melhorar seu desempenho.
- O sistema de produção da madeira-plástica pode ser uma alternativa viável de reciclagem de plásticos, mas a alegada redução de etapas esbarra nas dificuldades de misturar plásticos sem limpeza e obter um mínimo de qualidade do produto.
- Nenhum tipo de solução isolada pode resolver a questão dos resíduos plásticos, mas combinadas podem-se conseguir bons resultados.
- O resíduo plástico é importante em relação ao total dos resíduos sólidos e não deve diminuir em volume nos próximos anos e talvez décadas.
- A solução para o problema desses resíduos dificilmente prescindirá da ação do poder público, por meio de leis e incentivos, como a destinação de recursos subsidiando produtos de reciclagem.

unesp

7. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros apresenta-se como importante a realização de testes que verifiquem a estabilidade do material em aplicações de longa duração, como testes de resistência ao intemperismo e testes de fluência, em comparações diretas com madeiras e concreto.

Considera-se importante a realização de ensaios em escala real e em condições normais de uso, pois ensaios laboratoriais permitem apenas uma avaliação inicial, que deve ser aprimorada para um melhor conhecimento do material.

Outros ensaios podem se mostrar importantes para aplicações específicas, como a determinação do coeficiente de atrito e comparações de desgaste para uso em piso, por exemplo.

Ensaios que verifiquem as propriedades em uma ampla faixa de temperaturas e novos ensaios, que avaliem eventuais mudanças no processo podem levar a conhecimentos úteis para futuros aperfeiçoamentos.

unesp

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MANO, E. B. *Introdução a polímeros.* 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1985. 111p.

2. GUEDES, B., FILKAUSKAS, M.E. *O plástico.* 1.ed. São Paulo: Érica, 1986. 156 p.

3. VALVERDE, J. PVC reage ao Greenpeace contra o perigo das dioxinas. *Plást. Mod.*, v. 275, p.3-7, 1997.

4. CALLISTER Jr., W. D. *Materials science and engineering:* An introduction. New York: John Wiley & Sons, 1997. 852 p.

5. NUNES, E. C. D., BABETTO, A. S., AGNELLI, J. A. M. Correlação entre o comportamento termooxidativo do polipropileno (PP) e do polietileno de baixa densidade (PEBD) e o tipo de tratamento superficial do negro de fumo. *Polím.: Ciênc. e tecnol.*, ano 7, n.2, p.66-8, 1997.

6. ROSATO, D. V. *Blow molding handbook: technology, performance, markets and economics.* Munique: Carl Hanser Verlag, 1989. 1010p.

7. GALLO, J. B., AGNELLI, J. A. M. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. *Polím.: Ciênc. e tecnol.*, ano 8, n.1, p.23-37, 1998.

8. CRAWFORD, R. J. *Plastics Engineering.* 2.ed. Londres: Pergamon Press, 1990.

FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

9. HERZBERG, W. R. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. 786 p.

10. SEYMOUR, B. S. Influence of long-term environmental factors on properties. In: ASM INTERNATIONAL. *Engineering materials handbook*: Engineering plastics. ASM INTERNATIONAL, 1995. v.2, p.423-32.

11. SIQUEIRA, D. F., BRUNS, R. E., NUNES, S. P. Compatibilização e otimização de blendas poliméricas. *Polím.: Ciênc. e tecnol.*, ano 3, n.2, 1993, p.15-9.

12. CORREA, C. A. et al. Um desafio chamado ISO 14000. *Polím.: Ciên. e tecnol.*, ano 6, n.3, p.11-7, 1996.

13. DESEMPENHO das *commodities* termoplásticas - 1995-1997. *Plást. Mod.*, v.283, p.12, 1998.

14. SINO RETO, M. A. Plástico dobra de volume. *Plást. Mod.*, v.291, p.22-32, 1998.

15. CORONADO, J. Obras públicas e civis elevam demanda. *Plást. Mod.*, v.282, p.8-20, 1997.

16. COSTA, S. M. Fênix ecológica. *Plást. em Rev.*, v.392, p.28, 1995.

17. COSTA, V. R. Plásticos: a caminho de reciclagem. *Ciência Hoje*, v.18, n.107, p.8-15, 1995.

18. RIJO FURTADO, M. Aplicações novas prometem dobrar o uso de reciclados. *Plást. Mod.*, v.266, p.8-20, 1996.

19. LIXO plástico vira petróleo. *Anuar. Bras. do Plást.*, p.19-20, 1996.

20. INTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT) - CEMPRE *Lixo Municipal: Manual de gerenciamento integrado.* São Paulo, 189p., 1995.

21. AGNELLI, J. A. M. et al. Reciclagem de polímeros: situação brasileira. *Polím.: Ciênc. e tecnol.*, ano 6, n.4, 1996, p.9-18.

22. MANO, E. B. et al. Plastic wood from urban waste recycled plastics as a substitute for lumber. *Polím.: Ciên. e tecn.*, ano 4, n.5, p.19-24, 1994.

23. LOVE, G. Recycling packaging materials. *BioCycle,* v.36, n.6, p.64-6, 1995.

24. RECOVERING from the reunification party. *Europ. Plast. News,* set.1992, sp. iss., p.4-6.

25. NIR, M. M., MILTZ, J., RAM, A. Update on plastics and the environment: progress and trends. *Plast.Engineer.*, v.49, i.3, p.197-209, 1993.

26. DENISON, R. A. Environmental life-cycle comparisons of recycling, landfilling, and incineration: a review of recent studies. *Annu. Rev. Energy Environ.*, v.21, p.191-237, 1996.

unesp

27. FARREL, M. Municipal and county programs: recycling coordinators evaluate trends. *BioCycle,* v.38, n.7, p.38-45, 1997.

28. ULBANERE, R. C. Análise ambiental de usinas de reciclagem de resíduos sólidos. *Rev. Eng. Ciênc. Aplic.,* v.3, p.57-74, 1996.

29. DESTINO final do lixo terá manual. *San. Amb.,* v.31, p.9, 1995.

30. VILHENA, A. T., HEMAIS, C. A. Recuperação de rejeitos plásticos no Brasil: alguns aspectos econômicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 3, Rio de Janeiro. 1995. p.1179-81.

31. CAMPOS, H. K. T. et al. Gerenciamento de resíduos: BH desenvolve um sistema diferenciado. *San. Amb.*, ano 6, v.35, p.31-9, 1995.

32. FARIA, J. L. Meio ambiente e resíduos sólidos: avanços e limites na cidade de Viena e lições para São Paulo; entrevista com Jacques Demajorovic. *RAE Light* mar./abr. 1994, p.35-40.

33. CORONADO, J. Incineração dos resíduos plásticos pode gerar energia. *Plást. Mod.*, v.268, p.26-33, 1996.

34. WEHWNPOHL, G., PFAFF-SIMONEIT, W. Conceito integrado de resíduos sólidos para a região de Guaratinguetá / Brasil: análise e conceito. 1.ed. Guaratinguetá:Brochura, 1993. 136p.

35. ABREMPLAST: aparas e arestas. *Plást. em Rev.,* v.397, p.37-9, 1995.

36. COSTA, S. M. A virtude está no meio. *Plást. em Rev.,* v.428, p.18, 1998.

37. EM Betim como em Turim: Projeto Fiat Autorecycling busca escala industrial para recuperação de autopeças. *Plást. em Rev.*, v.391, p.28, 1995.

38. A IMAGEM desfocada: levantamento desvenda perfil perturbador para o setor plástico. *Plást. em Rev.*, v.410, p4-6, 1996.

39. COLLINS, J. A. Plastics and the environment - solving the problem of use and abuse. *Environm. Engineer.*, v.5, i.2, p.25-7 e 31, 1992.

40. COSTA, S. M. Soluções sob medida. *Plást. em Rev.*, v.407, p.17-21, 1996.

41. BRASIL, capital Bonn: como o Greenpeace se posiciona em relação ao plástico no país. *Plást. em Rev.*, v.406, p12-4, 1996.

42. RECICLAGEM: vida longa para os plásticos. *Polím.: Ciênc. e tecnol.*, ano 2, n.4, p.10-1, 1992.

43. KOMOLPRASERT, V., LAWSON, A. R. Considerations for reuse of poly(ethylene terephthalate) bottles in food packaging: migration study. *J. Agric. Food Chem.*, v.45, n.2, p.444-8, 1997.

44. SADLER, G et al. Evaluating organic compound migration in poly(ethylene terephthalate): a simple test with implications for polymer recycling. *Food Addit.and Contamin.*, v.13, n.8, p.979-89, 1996.

45. COSTA, S. M. Verdinhas de plástico: Greenpeace caça fundos lançando cartão de crédito biodegradável. *Plást. em Rev.*, v.418, p.16-7, 1997.

unesp

46. PhD questiona biodegradabilidade. *Plást. Mod.*, v.278, p.36-8, 1997.

47. BORRACHA: reciclagem revoluciona mercado. *Plást. Mod.*, v.267, p.6, 1996.

48. TERMOFIXOS: reforço ecologicamente correto. *Plást. em Rev.*, v.397, p.40, 1995.

49. REBEIZ, K. S., FOWLER, D. W., PAUL, D. R. Recycling plastics in polymer concrete for construction applications. *J. of Mat. in Civil Engineer.*, v.5, n.2, p.237-48, 1993.

50. AL-MANASEER, A. A., DALAL, T. R. Concrete containing plastic aggregates. *Concr. Intern.*, v.19, i.8, p.47-52, 1997.

51. PVC und Umwelt. *Europ. Plast. News*, sp.iss., jul./ag. 1991, p.34-5.

52. PVC: dia da caça. *Plást. em Rev.*, v.397, p.32-3, 1995.

53. SASSE, F., EMIG, G. Chemical recycling of polymer materials. *Chem. Eng. Technol.*, v.21 i.10, p.777-89, 1998.

54. COKE & Pepsi close PET recycling loop. *Europ. Plast. News*, jan./fev. 1991, p.14.

55. WAKIMOTO, K. et al. Recycling of waste plastics in a blast furnace system. *NKK Techn. Review*, v.78, p.59-65, 1998.

56. COOKE, F. New machinery meets recycling demands. *Europ. Plast. News*, Jun. 1992, p.26-7.

57. FEHR, M. O lixo domiciliar nas matrizes energética e ambiental nacionais: um estudo teórico especulativo. *San. Amb.*, v.39, p.24-28, 1996.

58. ALTA voltagem: a reciclagem para fins energéticos ganha status de *ecobusiness* com a Resicontrol. *Plást. em Rev.*, v.395, p.20, 1995.

59. PINGO nos iis: Plastivida promove seu primeiro debate público. *Plást. em Rev.*, v.405, p.16, 1996.

60. GONÇALVES, M. T. T. *Características e propriedades da madeira*. Guaratinguetá: DMT/ FEG/UNESP. 1998, 34p. (Apostila do Curso de Características e Propriedades da Madeira).

61. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS *Fichas de características das madeiras brasileiras*. São Paulo, 417p., 1988.

62. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de madeira*: NBR 7190. Rio de janeiro, 1997, 107P.

63. SANTOS, E. *Nossas madeiras*. São Paulo: Itatiaia, 1987.

64. CALIL JR., C., BALLARIN, A. W., MARTINELLI, E. Fluência em peças fletidas de madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 5, 1995, Belo Horizonte. *Anais do 5º IBRAMEM*. p.131-142.

65. PETRUCCI, L. J. T. *Painéis de plástico reciclado para utilização na construção civil.* Campos dos Goytacazes, 1998. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense.

66. ROQUE, C. A. L., VALENÇA, A. C. V. Painéis de madeira aglomerada. *BNDES Setorial,* v.8, p.153-70, 1998.

67. RIGGLE, D. New look in recycled plastic. *Biocycle*, v.35, n.9, p39-40, 1994.

68. Technical data: Durawood® plastic lumber [on-line]. EAGLEBROOK [cited 1998-03-22] Available from World Wide Web: <URL: http://www.recycledesign.com/durawood.html>

69. PACHECO, E. B. A. V., MANO, E. B. Avaliação tecnológica preliminar de misturas de poliolefinas. *Polím.: Ciênc. e tecnol.,* ano 6, n.1, p.22-7, 1996.

70. ALCÂNTARA, R. L., CARVALHO, L. H., RAMOS, S. M. L. S. Propriedades mecânicas de resíduos plásticos urbanos da Região Nordeste. I- Influência das condições de processamento. *Polím.: Ciên. e tecnol.,* ano 5, n.3, p.42-7, 1995.

71. ALCÂNTARA, R. L., CARVALHO, L. H., RAMOS, S. M. L. S. Propriedades mecânicas de resíduos plásticos urbanos da Região Nordeste. II- Influência da incorporação de estabilizantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 3, Rio de Janeiro. 1995. p.1191-4.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

72. REAL GmbH. *Realit: the formula for recycling mixed plastic products.* Mainberhein: REAL GmbH. 14 p.

73. CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL - DIVISÃO DE MATERIAIS. Ensaios mecânicos em barras de material plástico reciclado. Rel. 04-LEM/96, 5p., 1996.

74. CORRÊA, A. T. *Mechanische Tests mit extrudiertem Material aus Hausmül.* Darmstadt, 1997. 51p. (Trabalho de graduação apresentado à Fachbereich Kunststofftechnik da Fachhochschule Darmstadt, para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico).

75. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for tensile properties of plastics:* ASTM D 695. 1996.

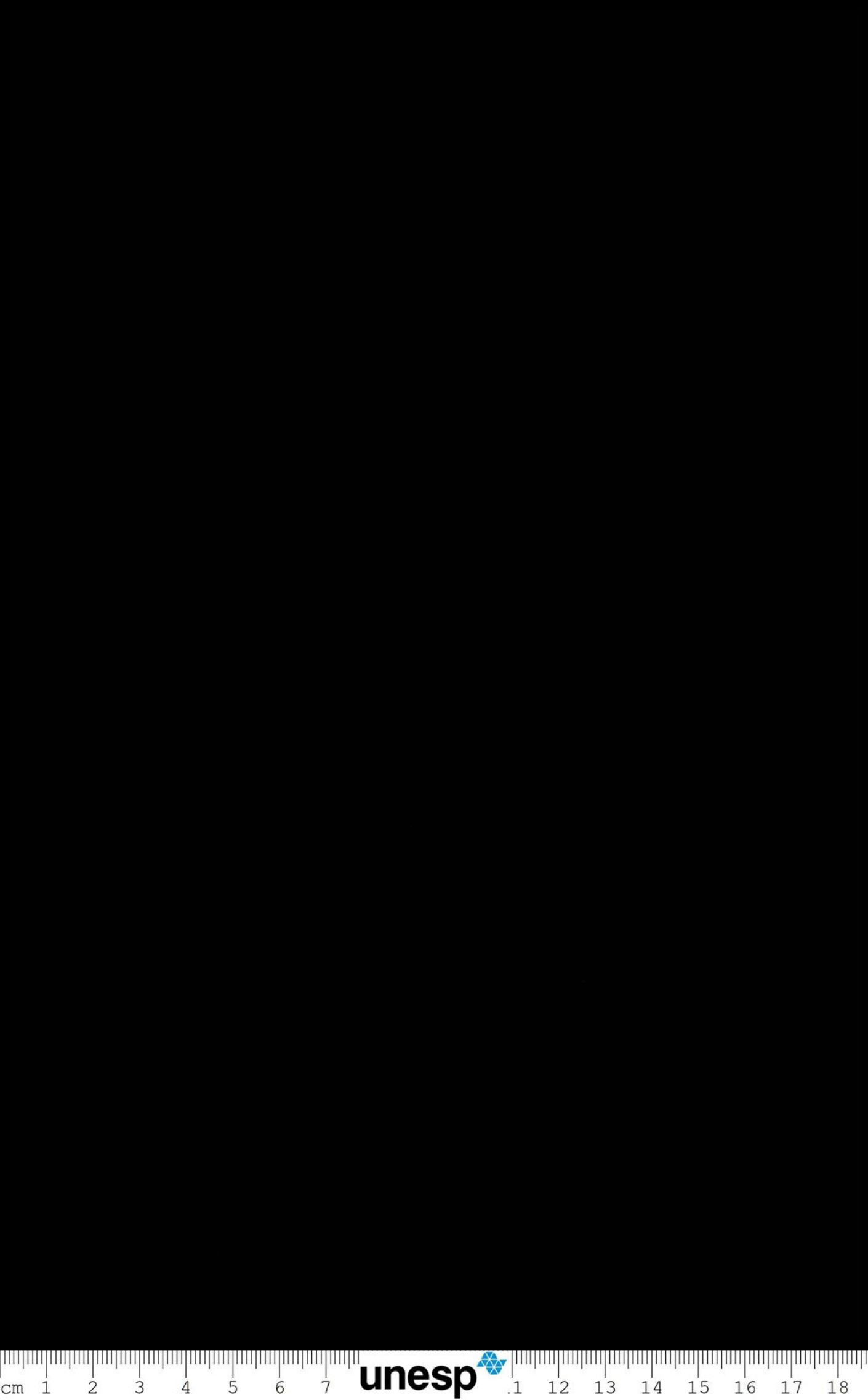
76. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for compressive properties of rigid plastics:* ASTM D 695. 1996.

77. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials:* ASTM D 790. 1996.

Autorizo a reprodução desse trabalho

Guaratinguetá, 22 de dezembro de 1999.

HANS CRISTIAN BOROWSKI


cm 1 2 3 4 5 6 7
unesp
11 12 13 14 15 16 17 18