



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**T E S E**

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE PROCESSO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS  
PEAD/PINUS E PEAD/ALGAROBEIRA**

**J U À R E S J O S É G O M E S**

CAMPINA GRANDE – PB

Outubro - 2008

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE PROCESSO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS  
PEAD/PINUS E PEAD/ALGAROBEIRA**

**J UÀRES JOSÉ GOMES**

Tese de doutorado submetida e apresentada a Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Processos

Área de Concentração: **Engenharia de Materiais**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Laura Hecker de Carvalho

Orientadora

Prof<sup>o</sup>. José Wallace Barbosa do Nascimento

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil.

Outubro de 2008

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE PROCESSO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS PEAD/PINUS  
E PEAD/ALGAROBEIRA**

**J UÀRES JOSÉ GOMES**

Tese defendida e aprovada em 24/10/2008, pela banca  
examinadora constituída pelos professores:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Laura Hecker de Carvalho  
(UFCG - Orientadora)

---

Prof. Dr. José Roberto M. D`Almeida  
(Examinador externo/PUC – RJ)

---

Prof. Dr. Antônio Faria Leal  
(Examinador externo/UFCG)

---

Prof. Eduardo Luis Canedo  
(Examinador externo/UFCG)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Suédina Maria de Lima Silva  
(Examinador interno/UFCG)

Campina Grande-PB

Outubro – 2008

**Dedicatória**

**A todos aqueles  
que, de uma maneira ou de outra,  
tem contribuído para transformar as ciências  
em efetivos instrumentos de buscas  
de soluções para os reais problemas  
vividos pelos povos.**

**A grande companheira  
Valdilene Gomes da Silva e ao meu filho Raul  
pela paciência, incentivo e  
compreensão durante as minhas ausências.**

## **Agradecimentos**

A todos aqueles que batalham para fazer da ciência um instrumento da paz;

A professora Dr<sup>a</sup>. Laura Hecker de Carvalho pela orientação, pela paciência, pelos ensinamentos, pela dedicação, pela amizade e pela capacidade de motivar as pessoas em direção ao gosto pelo saber – ALÉM DE PROFESSORA UMA GRANDE EDUCADORA;

A colega Dr<sup>a</sup>. Tânia Lúcia Leal que nos momentos de maiores dificuldades esteve sempre firme me ajudando a superar essas dificuldades trazendo motivação e apoio. UMA COLEGA LEAL E TANTO;

Ao Professor Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento pelas orientações, sugestões, pelas críticas incentivadoras e pelo apoio;

Aos colegas do Doutorado em Engenharia de Processos pelo que juntos conseguimos fazer durante os difíceis dias de estudos e trabalhos;

A todos os professores do Programa de Doutorado em Engenharia de Processos pelos ensinamentos que nos passaram durante as aulas das disciplinas;

Ao professor Paulo Régis chefe do Laboratório de Análise Estrutural e Tecnologia dos Materiais (LAETEMA) do Departamento de



Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio dado para a realização dos trabalhos;

Aos Laboratoristas do LAETEMA-UFPE, Ezequiel Muniz de Siqueira, excelente técnico e exímio símbolo de trabalho, João Maria Cazuza da Rocha e Rinaldo Catunda de Oliveira;

As servidoras do Departamento de Engenharia Civil, Maria Gomes Carneiro, Rosiclé de Siqueira Holanda, Vera Maciel, Carolina Maria de Oliveira pelo auxílio e apoio;

Aos Professores da UFRPE que me deram força para vencer os obstáculos;

A Secretaria do Doutorado em Engenharia de Processos Maria de Fátima David Souza pelo apoio;

A todos os amigos e companheiros do Laboratório de Engenharia dos Materiais da UFCG, alunos de graduação e pós-graduação pela amizade e companheirismo;

A Coordenação de Doutorado de Engenharia de Processos, na pessoa da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Odélsia Leonor Sanches de Alsina e posteriormente do Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva, pelo profissionalismo e dedicação aos alunos;

Aos servidores técnico-administrativo da UFCG, Sr. Fernando, grande amigo, Sr. Marcos (in memórian), e Sr. Ananias, dedicado servidor, pelo apoio durante a realização das pesquisas;

A todos aqueles que de certa forma contribuíram para o desenvolvimento dessa tese e pesquisas.

## **Mensagem**

**O objetivo do conhecimento  
não é descobrir os segredos do mundo  
numa palavra mestra  
mas sim dialogar  
com os mistérios do mundo  
(Morin)**

# SUMÁRIO

JUÀRES JOSÉ GOMES.....	1
JUÀRES JOSÉ GOMES.....	i
JUÀRES JOSÉ GOMES.....	ii
RESUMO.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
CAPÍTULO I.....	5
INTRODUÇÃO.....	5
OBJETIVO GERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
CAPÍTULO II.....	10
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL.....	10
2.1 Considerações Gerais.....	11
2.2 Compósitos poliméricos.....	11
2.3 Processos de fabricação de compósitos.....	13
2.3.1 Extrusão e Injeção.....	13
2.3.2 Moldagem por compressão.....	15
2.4 Interface matriz-reforço.....	15
2.5 Compósitos plástico/madeira.....	16
2.5.1 Matriz polimérica.....	17
2.5.1.1 Polietileno de alta densidade (PEAD).....	17
2.5.2 Reforço.....	19
2.5.2.1 Madeira.....	20
2.5.2.2 Estrutura da Madeira.....	21
O câmbio é uma camada muito fina, situada entre a casca interior e o borne ou alburno. Produz para dentro os vasos lenhosos (responsáveis pelo transporte da seiva bruta) e para fora os vasos liberianos (responsáveis pelo transporte da seiva elaborada).....	23
2.5.2.3 Composição da madeira.....	24
2.5.2.4 Umidade da madeira.....	26
2.6 Geração dos resíduos industriais de madeira.....	27
CAPÍTULO III.....	30
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA.....	30
3.1 Pinus.....	30
3.2 Algarobeira.....	32
3.3 Compósitos polímero/pó de madeira.....	34
CAPÍTULO IV.....	38
MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1 - Materiais.....	39
4.1.1 – Matriz.....	39
4.1.2 – Reforços Vegetais.....	39
4.2 Métodos.....	41
4.2.4 - Determinação da granulometria do pó de madeira.....	44
4.2.5 - Teor de umidade do pó de madeira.....	45
4.2.6 - Densidade do pó de madeira.....	46
4.2.7 - Processamento das composições.....	46
4.2.8 - Confecção dos corpos-de-prova.....	48

4.2.9 - Propriedades Mecânicas .....	49
CAPÍTULO V.....	54
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.4 - Determinação da granulometria do pó de madeira (Pinus e Algarobeira).....	57
5.5 - Determinação do teor de umidade e densidade aparente do pó de madeira .....	59
5.6 – Propriedades mecânicas.....	61
5.9 - Sorção de Água.....	77
CAPÍTULO VI.....	83
CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
ANEXOS.....	95
Anexo A - Determinação dos Percentuais e separação do Cerne ou durâmen, Alburno ou branco e Casca da Algarobeira.....	96
Anexo B - Cubagem das toras – Estimativa do volume total da madeira bruta (não trabalhada) para transformação em pó. ....	97
Anexo C - Determinação dos percentuais de casca, alburno ou branco cerne ou durâmen da tora da Algarobeira - Prosopis juliflora.....	97

## RESUMO

Este trabalho investiga a viabilidade de uso de pós de madeira da Algarobeira (madeira dura, não comercializada) na preparação de compósitos plástico/madeira e compara as propriedades destes compósitos às de sistemas afins manufaturados com pó de Pinus (madeira mole, comercializada). Foram avaliados os seguintes efeitos nas propriedades mecânicas: a) concentrações variadas do resíduo incorporado a matriz; b) temperatura de fusão, velocidade de rotor, tempo de processamento; c) influência do pó de madeira da algarobeira conforme a posição longitudinal (Pé, meio e topo) e transversal (casca, alburno ou branco e cerne ou durâmen) de onde o pó foi retirado. O PEAD e os compósitos foram processados em reômetro de Torque e moldados por compressão e injeção. Investigou-se ainda a sorção de água do PEAD puro e dos compósitos PEAD/Pinus e PEAD/Algarobeira. Verificou-se que condições de processamento mais severas, (tempos, temperaturas e velocidade do rotor) levaram a uma redução das propriedades mecânicas, embora não significativa, para ambos os compósitos, atribuída a uma leve degradação da matriz. Melhor resultado foi obtido pelo compósito PEAD/Pinus processado a 150°C, 50 rpm por 10 minutos. A resistência à tração e o módulo de elasticidade do compósito PEAD/algarobeira foram pouco inferiores que os do compósito PEAD/Pinus. Os compósitos moldados por compressão apresentaram também propriedades inferiores aos obtidos por injeção, devido à presença de defeito e peças não homogêneas em razão da pouca dispersão, má compactação e moldagem ineficiente. Verificou-se ainda que a sorção de água nos compósitos foi rápida nos estágios iniciais, tendendo ao equilíbrio em tempos mais longos de exposição (acima de 980 horas), devido ao pó de madeira ser bastante higroscópico e os mais densos apresentaram menor sorção de água. Este estudo indica que as fibras atuaram como carga inerte, e que poderá promover uma economia de material polimérico utilizado na confecção de compósitos e que se pode utilizar o pó de madeira misturado devido a não significativa diferença na suas propriedades mecânicas em relação a sua posição na tora.

Palavras-Chave: PEAD, Compósitos, pó de madeira.

## ABSTRACT

This work investigates the feasibility of using post mesquite the wood (hard wood, not marketed) in the preparation of composite plastic/wood, and compares the properties of these composite systems related to manufactured with powder of pine (soft wood, marketing). We assessed the following effects on mechanical properties: a) concentration changes in the matrix residue incorporated b) melting temperature, rotor speed, processing time, c) influence of the dust of wood mesquite as the longitudinal (eg, means and top) and transverse (bark, and sapwood or white and durâmen) from where the powder was removed. The pure HDPE and the composites were PEAD/Pine to compression and injection molded and PEAD/Mesquite composites were injection molded. It also investigated the water sorption of composites and pure HDPE, HDPE/Pine, HDPE/Mesquite. It was found that more severe processing conditions (time, temperature and speed of the rotor) led to a reduction of mechanical properties, although not significant, for both composites, attributed to a slight degradation of the matrix. Best result was obtained by the composite HDPE/Pine processed to 150 oC, 50 rpm for 10 minutes. The tensile strength and modulus of elasticity of the composite HDPE/Mesquite were slightly lower than that of the composite HDPE/Pine. The compression molded composites also showed properties inferior to those obtained by injection, because of defective parts and not homogeneous because of poor dispersion, poor compression molding and inefficient. It was found that the sorption of water in the composite was rapid in the early stages, tending to equilibrium in times longer exposure (up to 980 hours) due to the dust timber is very hygroscopic, ie more dense showed lower sorption of water. This study indicates that the fibers act as inert cargo, which could promote an economy of material used for polymer composites, which can use the mixed powder of wood due to no significant difference in their mechanical properties in relation to its position in log.

Keywords: HDPE, composites, powder of wood.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação esquemática da estrutura do PEAD.....	18
Figura 2.2	Aspectos macroscópicos da madeira em uma secção transversal do tronco de uma árvore.....	22
Figura 2.3	Etapas da industrialização e resíduos de madeira.....	28
Figura 2.4	Maneiras de valorização do resíduo de madeira.....	29
Figura 3.1	Árvores Pinus elliottii.....	31
Figura 3.2	Árvore algarobeira.....	33
Figura 4.1	Pós utilizados nas confecções dos compósitos.....	41
Figura 4.2	Forrageira utilizada para a produção do pó de madeira da algarobeira. (a) - antes da restauração e contaminada; (b) - Depois da restauração e descontaminada.	44
Figura 4.3	(a) - Cavaco armazenado em reservatório, (b) - isolado para evitar contaminação.....	44
Figura 4.4	Equipamento tipo RO-TAP, testing sieve shaker, com um conjunto de 6 peneiras (100, 120, 170, 200, 325 e 400) mesh, utilizado para a determinação da granulometria do pó de madeira.....	45
Figura 4.5	(a) Taragem da cápsula, (b) Determinação do volume da cápsula para determinação da densidade aparente do pó da madeira .....	46
Figura 4.6	(a) Misturador do Reômetro de Torque System 90 da Haake Buchler utilizado para processamento das composições e (b) Processador de dados	47
Figura 4.7	Corpos de prova obtidos por compressão: a - (PEAD com 20% de pó da madeira Algarobeira); b – (PEAD com 20% de pó da madeira Pinus);; c – (PEAD).....	48
Figura 4.8	Corpos de prova obtidos por injeção: a (PEAD com 20% de pó da madeira Algaroba); b – (PEAD com 20% de pó da madeira Pinus); c – (PEAD).....	49
Figura 4.9	a - (Máquina de ensaio de tração - Lloyd LR-10KN), b – (Corpo de prova rompido após ser submetido a ensaio de tração).....	50
Figura 4.10	(a) CPs de PEAD e (b) CPs de PEAD/pó de madeira, imersos em água.....	51
Figura 5.1	Seção transversal da tora de algarobeira (Prosopis juliflora (Sw)DC) .....	55
Figura 5.2	Histograma da distribuição das partículas de Pinus taeda e elliottii misturados.....	57
Figura 5.3	Histograma da distribuição de partículas de pó das partes da tora da algarobeira e da mistura.....	58



Figura 5.4	Resistência a tração do compósito PEAD/madeira Pinus como função das condições de processamento e teor de pó de madeira.....	61
Figura 5.5	Módulo de elasticidade do compósito PEAD/madeira Pinus como função das condições de processamento e teor de madeira.....	62
Figura 5.6	Alongamento do compósito PEAD/madeira Pinus como função das condições de processamento e teor de madeira...	63
Figura 5.7	Propriedades do compósito PEAD/pó da madeira algarobeira como função das posições do material obtido na tora: a) Resistência à tração e b) Módulo de elasticidade.....	64
Figura 5.8	a – Microfotografia eletrônica de lenho de tensão de folhosa ( <i>Populus</i> sp) observa-se a camada gelatinosa (gl) interna solta, característica do lenho de tensão em folhosas. (Fonte CORE et all, 1979). b - Microfotografia eletrônica de lenho de compressão de conífera ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> ), observa-se a ausência da camada S3 e a presença de grandes fendas ou cavidades na camada S2. O aspecto arredondado e os espaços intercelulares (is) que são típicos deste lenho anormal. (Fonte CORE et all, 1979).....	67
Figura 5.9	Propriedades do compósito PEAD/pó da madeira Pinus, processados a 50rpm, moldados por injeção e compressão: a) Resistência à tração e b) Módulo de elasticidade e c) Alongamento.....	68
Figura 5.10	Corpos de prova moldados por: (a) compressão; (b) injeção..	69
Figura 5.11	MEV da região de ruptura por tração de corpo de prova moldado por compressão, (a) 50x e (b) 2000x.....	69
Figura 5.12	MEV da região de ruptura por tração de corpo de prova moldado por compressão a 150°C: (a) 50x e (b) 1500x.....	70
Figura 5.13	MEV da região de ruptura por tração de corpo de prova moldado por compressão, (a) 2700x, (b) 1200x e (c) 300x.....	71
Figura 5.14	Torques do PEAD/PURO em função do tempo e para diferentes temperaturas de processamento	72
Figura 5.15	Torques do compósito PEAD/Pinus em função do tempo e diferentes velocidades do rotor.	73
Figura 5.16	Torques do compósito PEAD/Algarobeira em função tempo com diferentes velocidades do rotor e temperaturas de processamento.	74
Figura 5.17	(a) PEADPURO/150°C/5min, (b)PEADPURO/220 °C/30min.	75
Figura 5.18	Sorção d'água no PEAD e nos compósitos PEAD/Pinus e PEAD/Algaroba.....	77
Figura 5.19	Histograma dos Coeficientes de difusão de água nos sistemas estudados.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Destino comercial do tronco de árvore.....	23
Tabela 3.1	Algumas propriedades básicas da madeira provenientes de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> de acordo com a NBR7190:1997.....	32
Tabela 4.1	Propriedades de controle do polietileno de alta densidade.....	39
Tabela 4.2	Propriedades típicas do polietileno de alta densidade utilizado.....	39
Tabela 5.1	Produção de pó da algarobeira.....	56
Tabela 5.2	Resultados da avaliação da distribuição granulométrica para a fibra lignocelulósica <i>Pinus eliotti</i> e <i>Pinus taeda</i> misturados...	57
Tabela 5.3	Resultados da avaliação da distribuição granulométrica para a fibra lignocelulósica <i>Prosopis juliflora</i> (Algarobeira).....	58
Tabela 5.4	Teor de umidade e densidade aparente da algarobeira ( <i>Prosopis juliflora</i> ) e <i>Pinus taeda</i> e <i>elliottii</i> .....	59
Tabela 5.5	Propriedades mecânicas dos compósitos PEAD/ <i>Pinus</i> e PEAD/algarobeira processados numa velocidade de rotor de 50rpm.....	65
Tabela 5.6	Composição Média de Madeiras de Coníferas e Folhosas	66
Tabela 5.7	Valores correspondentes do torque na estabilização	74
Tabela 5.8	Propriedades mecânicas após a absorção d'água nos compósito PEAD/ <i>Pinus</i> e PEAD/Algarobeira.....	78

## SIMBOLOGIA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMe	Alburno do Meio
APé	Alburno do pé
ASTM	American Standards for Testing and Materials
ATo	Alburno topo
CMe	Casca meio
CPé	Casca Pé
CTo	Casca topo
DMe	Durâmen meio
DPé	Durâmen pé
DTo	Durâmen topo
$M_{\infty}$	Sorção no tempo infinito
PMALAPé	Pó de madeira da algarobeira alburno pé
PMALCPé	Pó de madeira da algarobeira casca pé
PMALDPé	Pó de madeira da algarobeira durâmen pé
PMPinus	Pó de madeira pinus

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de preservação ambiental tem levado à adoção de tecnologias que utilizam os recursos naturais de maneira mais econômica e não agressiva ao meio ambiente. Ao mesmo tempo, buscam-se soluções para diminuição ou mesmo eliminação de resíduos industriais.

No setor madeireiro a grande quantidade de resíduos tais como: fragmentos, cavaco, serragem, pó da lixa, etc., sempre tem sido motivo de grandes preocupações. Além de serem materiais inflamáveis, apresentam baixa densidade exigindo um maior espaço no local de estocagem, e na maioria das vezes são descartados ou incinerados agredindo o ambiente.

A preocupação com este desperdício é grande, principalmente quando se leva em consideração a dimensão da exploração dos recursos madeireiros e o potencial de destruição das florestas nativas, contribuindo com problemas de ordem global, como o aumento do efeito estufa ou o desaparecimento da biodiversidade (Teixeira, 2005).

O uso de resíduos de madeira e de outros materiais vegetais para a fabricação de novos produtos vem crescendo, impulsionando pesquisas e abrindo mercado. O interesse por pesquisas sobre o desenvolvimento e uso de materiais alternativos vem sendo incentivado por instituições de todo o país, em decorrência direta de crescente escassez de madeira de qualidade (Chielle, 2003).

Vários aspectos econômicos têm levado ao desenvolvimento de tecnologias alternativas para a utilização do que é considerado como “resíduo” de madeira, como forma de aproveitar melhor a matéria-prima na transformação da madeira.

O desenvolvimento de novos materiais compósitos combinando matrizes termoplásticas e madeira (WPC - wood plastic composites) está em franca evolução (Chiou et al, 2006). Isto porque os resíduos de madeira e o plástico, por exemplo, podem ser combinados usando a tecnologia da mistura por aquecimento e fusão. Os resíduos de madeira têm a função de aumentar a

rigidez da matriz polimérica, facilitar a usinagem do produto, além de terem custo inferior ao da resina (Schut, 1999).

A tecnologia dos chamados wood-plastic composites (WPC's) envolve conceitos de compatibilidade e processabilidade e apresenta grandes desafios tecnológicos para a formulação e estabilização da mistura devido à baixa estabilidade térmica da celulose, o principal componente da madeira. Muitos dos avanços tecnológicos em WPC's dependem de uma análise criteriosa das características físicas de seus componentes e das condições de processamento do sistema.

Esses produtos têm encontrado grande aceitação no mercado em aplicações tais como perfis para construção civil e como componentes automobilísticos, graças à sua leveza, versatilidade e baixo custo, quando comparados com a madeira *in natura* ou outros compósitos poliméricos reforçados com cargas minerais (Correa et al 2003). Historicamente, as resinas termofixas foram as primeiras a serem usadas como matriz para compósitos de madeira. Esses tipos de produtos ainda são produzidos em grandes quantidades e o uso de termoplásticos para a criação de compósitos tem conduzido a uma nova geração de materiais. Os termoplásticos mais freqüentemente empregados são polipropileno (PP), polietileno (PE), polícloreto de vinila (PVC), bem como poliestireno (PS), politereftalato de etileno (PET) e copolímero estireno butadieno acrilonitrila (ABS).

Grande número de atividades industriais gera resíduos de madeira, alguns dos quais são reaproveitados internamente ao longo da cadeia de produção. Entretanto, nas etapas finais desta cadeia, existem grandes dificuldades no reaproveitamento dos resíduos provenientes das serrarias, tanto pela dispersão geográfica, que onera o transporte, como pelo baixo valor comercial dos mesmos. Por este motivo, grande parte do resíduo é normalmente utilizada como material combustível, gerando a emissão de carbono para a atmosfera. Dados de Gonçalves (2007), obtidos em um estudo em dez serrarias localizadas no Estado de São Paulo, dão uma dimensão do nível de geração de resíduos na indústria madeireira: a eficiência das empresas pesquisadas no aproveitamento da madeira bruta variou entre um mínimo de 36% e um máximo de 68%, ou seja, a geração de resíduos de

madeira, tais como serragem e cavacos, podem até mesmo superar o volume de madeira efetivamente aproveitado.

O Plano Diretor da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente - ABIMCI fixa, dentre outras metas, o reaproveitamento dos resíduos e a retenção de carbono. Nahuz (2004) comenta que a escassez de florestas produtivas e de matérias primas, em termos mundiais, tem dificultado grandes expansões de produtos originários da madeira. Isto se verifica no Brasil, com a redução na disponibilidade de matéria prima mais utilizada, por exemplo, árvore do tipo Pinus, em virtude da incapacidade de produção florestal acompanhar a expansão do consumo, notadamente pela exportação de produtos de maior valor agregado. Desta maneira, qualquer crescimento de produção à base de madeira deverá, nos próximos anos, ser baseada principalmente no aperfeiçoamento dos processos de industrialização desta matéria prima, com crescentes níveis de tecnologia, produtividade, finalidade de produto e agregação de valor.

De acordo com Stark (1999) e Stark & Rowlands (2003), resíduos de madeira na forma de pó são largamente utilizados em misturas com termoplásticos e, para estes fins, madeiras de crescimento rápido tais como o *pinus*, são muito utilizadas.

Outra madeira que apresenta grande capacidade de dispersão e regeneração é a Algarobeira (*Prosopis Juliflora*). Segundo Braga (1976) apud Martins et al (2004) plantas exóticas como a espécie Algarobeira que são produtoras de madeira pesada e compacta, servindo tanto para a fabricação de móveis como para estacas e carvão e, por terem um alto poder calorífico, são ideais para serem usadas como lenha. Este vegetal exótico adaptou-se tão bem às condições climáticas do Brasil (especialmente da região nordeste), que hoje pode ser considerado como uma “praga vegetal invasora” já que, quando em concorrência com outras plantas, tem-se apresentado tão dominante que, ocasionalmente, tem prejudicado a recuperação da mata nativa. Portanto, considerados os apelos ambientais e as boas características mecânicas das fibras lignocelulósicas, a proposta da utilização desta madeira na produção de compósitos poliméricos pode ser considerada como uma alternativa interessante e com grandes probabilidades de sucesso podendo ser uma alternativa econômica para região nordeste.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma alternativa de reaproveitamento dos resíduos de madeira da algarobeira na produção de compósitos poliméricos.

## **OBJETIVO GERAL**

O principal objetivo deste trabalho é investigar a influencia de variáveis de processo e a viabilidade de uso de pós de madeira da Algarobeira (madeira dura, não comercializada) na preparação de compósitos plástico/madeira e comparar as propriedades destes compósitos às de sistemas afins manufaturados com pó de Pinus (madeira mole, comercializada). O polietileno de alta densidade (PEAD) será a matriz utilizada neste estudo.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para alcançar o objetivo geral estabelecido determinamos 5 objetivos específicos para esse estudo que são:

- 1a) Avaliar variáveis de processamento tais como: temperatura de fusão, velocidade de rotor e tempo de processamento, nas propriedades mecânicas e moldar compósitos polímero/pó de madeira por compressão e por injeção;
- b) Comparar as propriedades mecânicas dos compósitos moldados por compressão e injeção;
- 2c) Produzir compósitos sem nenhum tratamento prévio dos resíduos e com diferentes teores e tipos de pós de madeira;
- d) Investigar a sorção de água dos compósitos PEAD/Pinus e de PEAD/algarobeira e a sua influência nas características mecânicas destes compósitos.

e) Verificar a influência da posição longitudinal (pé, meio, topo) e transversal (cerne ou durâmen, alburno ou branco, casca) de onde o pó de madeira foi retirado, nas propriedades mecânicas dos compósitos.



## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

Nesta revisão bibliográfica, faz-se uma reunião da literatura existente, apresentando-se considerações sobre a importância dos materiais compósitos como forma de buscar novos materiais que minimizem os problemas ambientais utilizando-se materiais naturais e renováveis e sobre a grande quantidade de resíduos que, na maioria das vezes não possui destino apropriado para seu descarte, sem que haja prejuízo ao meio ambiente, e do uso desses resíduos na forma de compósitos. Defini-se compósitos; expõe-se sobre as formas de sua fabricação e moldagem; a importância da natureza da região interfacial e dos atributos favoráveis tanto do plástico como da madeira quando utilizados em compósitos. Faz-se referência as características da matriz; o polietileno de alta densidade, PEAD; sua estrutura química e a sua aplicação prática; se defini reforço e se faz uma abordagem sobre as características estruturais da madeira, sua constituição química, a influência da umidade como elemento dificultador da interação fibra/matriz que afetam as suas propriedades mecânicas e sobre a grande produção de resíduos industriais colocando-se o pó de madeira entre eles. Reporta-se a política de incentivos para empreendimentos florestais nas regiões sul e sudeste do país, como elemento que atrai investimentos de empresas interessadas em suprimento sustentável de matéria prima e a crescente utilização de *Pinus* na indústria madeireira brasileira. Apresenta-se a algarobeira como uma planta arbórea que tem sido bastante difundida no nordeste brasileiro e como uma promissora alternativa econômica, haja vista sua adaptação em diversas regiões semi-áridas do mundo e por ser ela, uma espécie de uso múltiplo, produtora de lenha, madeira, forragem e outros produtos.

Finalmente são citadas algumas pesquisas apresentadas por diversos autores relativas à: difusão de umidade em compósitos, Marcovich et al. (1999); o uso de materiais reciclados para a produção de compósitos plástico/madeira, ou WPC (wood-plastic composites); Yamaji & Bonduelle (2004), as boas qualidades da farinha ou pó de resíduos de madeira e de papel usados como carga em resinas termoplásticas, English et al. (1996); sobre a

determinação das propriedades físicas e mecânicas de painéis produzidos pela mistura, em várias proporções, de partículas de madeira e plástico, comparando a influência do tipo de adesivo e o efeito do tipo de resina termoplástica, Milagres et al (2006) e estudo sobre o efeito da composição de diferentes misturas de polietileno de alta densidade (HDPE) virgem, HDPE reciclado e serragem de *Pinus* nas propriedades físico-mecânicas de placas confeccionadas pelo processo de compressão, Hillig et al. (2006).

## **2.1 Considerações Gerais**

A busca por novos materiais visando minimizar os problemas ambientais, tão discutidos nos últimos tempos, tem levado ao desenvolvimento de compósitos utilizando materiais de origem natural e renovável (Wambua et al., 2003).

As atividades agroindustriais implantadas em várias regiões do Brasil geram grandes quantidades de resíduos que, na maioria das vezes não possuem destino apropriado para seu descarte, sem que haja prejuízo ao meio ambiente. Esses resíduos podem ser aproveitados na forma de compósitos plásticos (WPC) e serem utilizados em segmentos industriais diversos como, por exemplo, na construção civil e na indústria automobilística.

A madeira e seus resíduos são materiais natural e renovável, apresenta um bom conjunto de características físicas e mecânicas e podem ser utilizados e/ou reaproveitados em diversas aplicações na construção civil. Quando comparada a outros materiais estruturais, a madeira apresenta vantagens ecológicas relevantes, principalmente por não ser tóxica ou abrasiva e pelo baixo consumo de energia na produção e processamento. O aproveitamento do pó de madeira na produção de compósitos poliméricos evita a queima destes resíduos e, por conseguinte, o agravamento da poluição ambiental.

## **2.2 Compósitos poliméricos**

Segundo Agnelli (2000), compósitos poliméricos são materiais conjugados formados por pelo menos duas fases ou dois componentes, sendo

geralmente uma fase polimérica denominada *matriz polimérica* e uma outra fase de *reforço* ou *carga*, normalmente na forma de fibras. Para a formação do material compósito ou do material conjugado é necessário que haja interação química e/ou física entre a matriz polimérica e o reforço fibroso, proporcionando a transferência de esforços mecânicos da matriz polimérica para o reforço.

Os materiais compósitos podem ser divididos em três classes de acordo com o tipo de reforço: a) materiais compósitos cujo reforço principal é unidimensional (fibras); b) aqueles cujo reforço principal é bidimensional (plaquetas); c) aqueles cuja fase descontínua é tridimensional (esferas) (Maine & shepherd, 1974, apud Pinto, 2004). Os mais comuns são os fibrosos (fibras envolvidas por uma matriz) e os particulados (partículas envolvidas por uma matriz) (Gupta, 2007).

As propriedades dos compósitos são principalmente controladas pelas propriedades de seus materiais constituintes, pelo teor, geometria e distribuição do reforço e pela interação entre as fases. Componentes na forma de fibras, de plaquetas ou de partículas esféricas podem ser incorporados proporcionando diferentes estruturas ao compósito (Hage, 1989). Existem pelo menos quatro fatores principais que devem afetar as propriedades de um compósito, que são: as características do reforço ou carga, as características da matriz, a formulação e as condições de processamento.

As características da carga são: a constituição química e mineralógica, tamanho e forma. A constituição química e mineralógica tem efeito na afinidade carga/matriz e na sua eficiência como agente nucleante em matrizes semicristalinas (Pinto, 2004).

As principais características do polímero são: a sua estrutura química, massa molar e estereo-regularidade que exercem grande influência na morfologia cristalina, no grau de cristalinidade e na adesão polímero/carga no composto final (Alter, 1995).

Os fatores de formulação mais importantes e capazes de influenciar as propriedades dos compósitos são: o teor de reforço/carga e a sua afinidade com a matriz.

As condições de processamento afetam a dispersão do reforço e a integridade do polímero e influenciam também a morfologia cristalina e o grau

de cristalinidade do compósito final, podendo causar ou não degradação da matriz polimérica.

### **2.3 Processos de fabricação de compósitos**

Há várias técnicas disponíveis para a manufatura de compósitos poliméricos. Muitas destas utilizam, com pouca ou nenhuma alteração, o mesmo tipo de processamento adotado na manufatura de produtos termoplásticos (ex. extrusão e moldagem por injeção). No entanto, para alguns tipos de produtos, notadamente aqueles reforçados por fibras longas e/ou contínuas, técnicas específicas de processamento foram desenvolvidas e/ou adaptadas para satisfazer uma necessidade particular do sistema ou do mercado.

Em geral, polímeros termofixos são utilizados na obtenção de compósitos reforçados por fibras longas e/ou contínuas. Isto porque, estas matrizes são pré-polímeros de baixa viscosidade que facilitam a impregnação dos reforços e curam durante o processamento. Dentre os processos de fabricação de compósitos de matriz termofixa reforçados por fibras longas destacam-se: a moldagem por compressão, a moldagem manual e por spray (hand lay-up e spray-up) e a moldagem rotacional. Técnicas específicas de fabricação como a pultrusão e a bobinagem ou enrolamento de fios, permitem a obtenção de compósitos reforçados por fibras longas e contínuas.

Como dito anteriormente, em compósitos de matriz termoplástica, os métodos de processamento mais usuais são o da extrusão e o da moldagem por injeção. Estas foram às técnicas utilizadas no processamento e na confecção dos compósitos investigados nesta tese, acrescida da moldagem por compressão e, por isto, serão as únicas técnicas descritas.

#### **2.3.1 Extrusão e Injeção**

Nos processos de extrusão e injeção de compósitos reforçados por pó de madeira, os equipamentos e as técnicas são as mesmas empregadas na indústria de plásticos, com pequenas modificações na preparação da matéria-prima. Estes produtos que vêm sendo denominados de “madeira plástica” têm

valorizado o aproveitamento de resíduos de madeira, como o pó da madeira industrializada, que, processados com polímeros termoplásticos, possibilitam uma diversidade de recursos para melhorar as características dos materiais utilizados em móveis e componentes para construção civil (Dardene, 2003 apud Razera, 2006).

A madeira e o termoplástico são combinados usando a tecnologia da mistura por aquecimento e fusão. A produção do compósito termoplástico, normalmente, envolve o processo de extrusão. As matérias-primas (termoplástico e madeira) são misturadas em uma extrusora, passam por uma matriz filamentar e são granuladas, Youngquist (1992), apud Yamaji, (2004). Apesar do uso de fibras de madeira e polímeros estar aumentando, um problema constante acompanha estas pesquisas: a higroscopia da madeira. A capacidade que a madeira ou sua farinha tem de absorver umidade causa sérios problemas durante o processamento já que a umidade presente nas fibras precisa ser retirada durante o processo de mistura com plástico. Quando esse procedimento não é observado, defeitos como espaços vazios (bolhas) e lacunas, além de marcas de queimadura (scorching) superficiais, causadas pela liberação de vapor, aparecem nas peças (Dardene, 2003 apud Razera, 2006).

Existem extrusoras de dupla rosca contra-rotatórias, especificamente projetadas para a manufatura de compósitos termoplásticos com fibras de madeira tendo umidade entre 1% e 8%. Estas extrusoras são dotadas de sistema de remoção de umidade à vácuo (Dardene, 2003 apud Razera, 2006) durante o processamento. O aparelho permite que a fusão do polímero, mistura com a farinha de madeira e a remoção da umidade seja realizada simultaneamente na própria extrusora. Neste tipo de compósito, para minimizar a degradação das fibras de madeira, deve-se evitar o uso de temperaturas superiores a 200°C. Esta mesma temperatura é limite no processo de injeção deste tipo de compósito que pode conter até 80% de pó ou farinha de madeira industrializada (Dardene, 2003 apud Razera, 2006).

### **2.3.2 Moldagem por compressão**

A técnica de moldagem por compressão aplica-se a polímeros termoplásticos ou termorrígidos. No entanto, a maioria das aplicações atuais destina-se a polímeros termorrígidos.

Neste método o material (a resina e os reforços) é colocado dentro do molde, que é subsequentemente fechado e mantido sob alta pressão. Algumas vezes o molde é aquecido para iniciar a reação de cura da resina.

Esta técnica garante alto volume de produção e compósitos com boa qualidade superficial, além de permitir a utilização de reforços com geometrias diferentes. Os fatores que influenciam a moldagem por compressão são: a taxa de aquecimento do molde, a taxa de compressão, o tempo de gel da resina e o tempo para a desmoldagem. Algumas resinas emitem gases durante a cura, podendo ocasionar vazios no produto final. Outro problema é o fluxo da resina dentro do molde, que depende da viscosidade da resina, podendo influenciar na orientação do reforço (Silva, 2003 apud Pinto, 2004).

### **2.4 Interface matriz-reforço**

É sabido que o comportamento de sistemas multicomponentes tais como materiais compósitos e blendas poliméricas dependem não somente da composição, morfologia e propriedades dos constituintes, sua disposição e dispersão na matriz, mas também da natureza da região interfacial (Manson, 1985).

A adesão entre reforço/carga-matriz é um dos principais fatores que caracterizam o comportamento físico e mecânico de um compósito (Theocaris, 1985). A adesão inadequada entre as fases poderá provocar o início de falhas interfaciais, comprometendo o desempenho do compósito.

Em compósitos com matrizes poliméricas a falha deveria ocorrer na matriz. Na prática, a adesão nunca é perfeita e o processo de ruptura seguidamente é gerado na interface. Portanto, na maioria dos casos, a falha do polímero reforçado ocorre por cisalhamento na região interfacial. A falha ocorre em função de debilidade das ligações atômicas e intermoleculares entre a

superfície da matriz e a superfície do reforço. Um dos fatores que favorece a interação interfacial é o fenômeno de contração polimérica que a matriz sofre durante a sua solidificação ou cura. Para que ocorra uma melhor distribuição de tensões sobre a superfície do reforço, durante o fenômeno de contração é preciso que ocorra um molhamento perfeito de reforço pela resina (Cavalcanti, 2006).

## 2.5 Compósitos plástico/madeira

Polímeros reforçados com fibras lignocelulósicas fazem parte de uma classe de materiais que combina os atributos favoráveis tanto da madeira quanto dos plásticos. A rigor, a própria madeira pode ser considerada um material conjugado, pois sua microestrutura consiste basicamente de fibras de celulose em meio a uma matriz de lignina (Selke, 2004).

Segundo Alves (2003), madeiras plásticas (*Wood-Plastic Composites* - WPC's), com teores de até 80% de farinha de madeira no produto final podem ser manufaturadas. Estes produtos apresentam características híbridas, alta estabilidade dimensional e resistências mecânica e biológica.

As formulações de compósitos plástico-madeira ficam restritas a determinados tipos de plásticos onde a temperatura de processamento é relativamente baixa, como o polietileno (PE) e o polipropileno (PP). Além disso, esses polímeros apresentam baixo custo e têm boas propriedades mecânicas para peças não estruturais.

O processamento de compósitos plástico-madeira geralmente envolve a extrusão dos componentes a uma determinada temperatura de fusão seguida por uma operação de injeção para dar a forma aos objetos (Saheb e Jog, 1999).

A vantagem do compósito plástico-madeira é sua capacidade de ser processada como o plástico. O material pode ser injetado para produzir peças ou ser extrusado e/ou calandrado para ser transformado em lâminas e ou moldados como os plásticos (Koenig & Sypkens, 2002).

As características e propriedades de compósitos poliméricos, incluindo os compósitos plástico-madeira, são fortemente influenciadas pelo método e condições de processamento já que estas podem afetar positiva ou

negativamente o estado de dispersão da carga, provocar alterações na relação L/D (comprimento/diâmetro) do reforço ou mesmo causar alterações estruturais (degradação) na matriz e/ou no reforço Saheb & Jog (1999), Koenig & Sypkens (2002). Alguns pontos básicos importantes a serem observados no processamento de compósitos plástico-madeira são:

1. escolha de matrizes que permitam o processamento em temperaturas relativamente baixas, de preferência inferiores a 200°C, de modo a evitar a degradação termo-oxidativa da farinha de madeira;
2. uso de equipamento e/ou condições de processo que permitam a remoção/saída de gases já que materiais lignocelulósicos são higroscópicos e perdem esta umidade na forma de vapor durante o processo de extrusão;
3. uso de condições adequadas de processamento (tempo, temperatura, taxa de cisalhamento) de forma a garantir que o reforço esteja bem disperso e distribuído na matriz polimérica. Em geral, para este tipo de produto, o uso de extrusora dupla-rosca é mais apropriado na medida em que fornece mistura dispersiva mais eficiente e com menor cisalhamento.

### **2.5.1 Matriz polimérica**

Em compósitos poliméricos, a matriz, além de ser responsável pelo aspecto externo do compósito e pela proteção do reforço contra ataques químicos e físicos, tem como função dispersar e envolver o reforço e, principalmente, transferir a carga aplicada ao reforço (Cavalcanti, 2006).

#### **2.5.1.1 Polietileno de alta densidade (PEAD)**

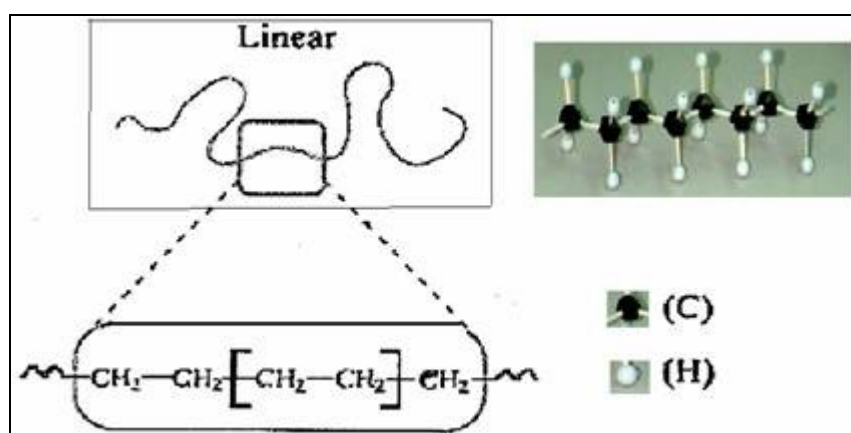
O polietileno é um termoplástico da classe das poliolefinas, obtido a partir da polimerização do eteno. Polietilenos de alta, média e baixa densidade são comercializados no mercado nacional. As poliolefinas representam cerca de 60% da demanda mundial de plásticos (65% no Brasil) e os polietilenos representam 40% (43% no Brasil) deste total. O mercado brasileiro de



polietileno cresce em ritmo duas vezes superior ao do produto interno bruto. Entre os anos de 1999 e 2000, as vendas de polietileno aumentaram em mais de 150.000 toneladas, ou seja, cerca de 10% da produção nacional.

O PEAD foi introduzido comercialmente na década de 50, e é o quarto termoplástico mais vendido no mundo e é a segunda resina mais reciclada no mundo (Brady, 1996). A maior aplicação do polietileno de alta densidade (PEAD) é no setor de embalagens. Em função da globalização, o mercado brasileiro de polietileno ganhou novo perfil em volume e qualidade, gerando maior oferta e tipos (*grades*) de melhor desempenho e produtividade para a indústria de transformação (Reto, 2000). O polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE) é um material termoplástico e altamente cristalino (acima de 90%), pois apresenta um baixo teor de ramificações. Esse polímero contém menos que uma cadeia lateral por 200 átomos de carbono da cadeia principal e sua estrutura está ilustrada na Figura 2.1. A temperatura de fusão cristalina do polietileno de alta densidade é aproximadamente 132 °C e sua densidade está entre 0,95 e 0,97 g/cm<sup>3</sup>. O peso molecular numérico médio fica na faixa de 50.000 a 250.000, (Billmeyer, 1984).

A estrutura do polietileno de alta densidade (PEAD) é a mais simples dentre os hidrocarbonetos poliméricos. Sua estrutura planar obedece a conformação zig-zag, sendo constituído pela repetição do monômero  $-(CH_2)_n-$  e finalizado com grupos  $CH_3$ . O comprimento das ligações de carbono é cerca de  $1,54 \times 10^{-7} \mu m$ , e o ângulo de ligação entre os mesmos é de  $109,5^\circ$  (Wasilkoski, 2002).



(Fonte: Polímero: Ciência e Tecnologia-2003)

Figura 2. 1 – Representação esquemática da estrutura do PEAD.

A maior cristalinidade do PEAD é consequência da elevada linearidade e regularidade das suas cadeias o que proporciona maior a orientação, alinhamento e o empacotamento das cadeias e, por conseguinte, forças intermoleculares (Van der Waals) mais intensas, fazendo com que a sua fusão ocorra em temperatura mais alta, se comparado com o PEBD ou PET (Neves, 1999).

As resinas de polietileno de alta densidade oferecem durabilidade, rigidez e resistência para aplicações de moldagem por sopro, produtos extrudados, filmes e itens moldados por injeção. O polietileno de alta densidade apresenta um conjunto interessante de propriedades que incluem: leveza (densidade variando de 0,962 - 0,968), inércia química; boa resistência ao intemperismo, ao impacto e à abrasão e excelente resistência dielétrica. O PEAD apresenta resistência à tração (25-45 MPa), módulo elástico (1,25-1,55 GPa) e deformação (5-8%) moderados, além de ser atóxico, auto-lubrificante e antiaderente (Boletim técnico Polialden, 1998).

As principais aplicações do polietileno de alta densidade são: Baldes e bacias, bandejas, banheiras infantis, brinquedos, conta-gotas para bebidas, jarros para água, potes de alimentos e utilidades domésticas em geral (Pauleski et al, 2007).

### **2.5.2 Reforço**

O reforço contribui para a resistência mecânica do material. Os reforços tradicionalmente empregados em compostos e compósitos poliméricos, particularmente os de origem mineral, vêm sendo substituídos por fibras naturais e, dentre estas, o resíduo da madeira.

Os reforços tipicamente usados nos plásticos, como a fibra de vidro e outros minerais, são materiais mais resistentes, rígidos, caros e pesados do que as farinhas de madeira. Estas, apesar de suas deficiências, também podem ser utilizadas como reforço em plásticos onde, tanto o plástico quanto a madeira podem ser obtidos a partir de reciclados (English, 2002).

Youngquist (1995), Joseph et al. (1996), Mattoso (1999), Joseph et al. (2002) e Colom et al. (2003) citam que as vantagens na utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos são a melhoria do

desempenho mecânico de plásticos convencionais, a diminuição do impacto ambiental, a reciclabilidade e o menor custo. Estas mesmas vantagens podem ser obtidas com a incorporação de farinha de madeira em matrizes termoplásticas (Schut, 1999). De acordo com Stark (1999), Stark e Rowlands (2003) o pó ou farinha de madeira é a forma mais comum encontrada nas misturas com termoplásticos.

### **2.5.2.1 Madeira**

Dentre os materiais de origem biológica, a madeira é sem dúvida o mais conhecido e utilizado. O lenho de uma árvore contém grande quantidade de substâncias que são utilizadas como matérias primas em quase todos os campos da tecnologia.

É a indústria da madeira quem fornece a matéria-prima sólida para produtos tais como tábuas, vigas, caibros e ripas, fibras para a indústria de papel e celulose, ou mesmo matéria-prima para carvão vegetal. Muitos produtos com origem na madeira podem ser recuperados para reuso ou mesmo reciclados: por exemplo, a indústria de papel recicla as fibras de celulose em novos produtos; ou mesmo os resíduos de madeira provenientes de tábuas ou outros produtos podem ser moídos e utilizados como material auxiliar na indústria metalúrgica e de fundição, na geração de energia e podem ser utilizados ainda na preparação de novos materiais (compósitos).

A madeira é uma estrutura polimérica bastante complexa, constituída basicamente de lignina e carboidratos como a celulose e a hemicelulose, substâncias que formam a estrutura visível da madeira.

Vários fatores naturais exercem influências importantes e fundamentais sobre as qualidades da madeira. É importante, portanto, o conhecimento desses fatores que deverão ser levados em consideração durante os ensaios, coleta, análise de dados e utilização prática da madeira nos seus mais variados aspectos. (Klock et al, 2005) Dentre estes podemos citar os seguintes:

- Espécie botânica - é necessário fazer a perfeita identificação botânica ou micrográfica, da espécie a ser qualificada do ponto de vista de suas características tecnológicas, pois a estrutura anatômica e a constituição

do tecido lenhoso são os primeiros responsáveis pelo comportamento físico-mecânico da madeira e variam de espécie para espécie;

- Localização da peça na tora - tem-se observado que são notáveis as alterações do tecido lenhoso e a massa específica aparente nas diferentes regiões do lenho. Regiões diferentes de uma mesma tora apresentam, também, comportamentos diferentes.
- Presença de defeitos - a presença de defeitos (nós, fendas, fibras torcidas, etc) dependendo de sua distribuição, dimensões e principalmente sua localização, provoca alteração no comportamento físico-mecânico da peça ou corpo-de-prova.
- O teor de umidade da madeira – isto porque a quantidade de água retida em uma tora de madeira tem forte influência sobre o seu comportamento físico e mecânico. É fundamental, portanto, o conhecimento detalhado dessa propriedade.

#### **2.5.2.2 Estrutura da Madeira**

A estrutura atômica da madeira afeta profundamente as propriedades de: resistência mecânica, aparência, resistência à penetração pelas águas e agentes químicos, degradabilidade e durabilidade, qualidade das fibras e reatividade química (Durbak et al., 1998 apud Rodolfo, 2005).

A madeira pode ser dividida em dois principais grupos quanto à sua origem: coníferas ou gimnospermas (plantas de sementes descobertas), denominadas em inglês sob o termo de *softwood* e folhosas ou angiospermas (plantas de sementes cobertas ou protegidas pelas flores), denominadas em inglês sob o termo de *hardwood*. Esses termos, apesar da aparente correlação com a “dureza” da madeira, não possuem qualquer relação direta com esta propriedade e podem mesmo causar alguma confusão, uma vez que muitas coníferas, tais como alguns tipos de pinho, fornecem madeira de maior dureza comparativamente a espécies folhosas (Miller, 1999).

Dando-se um corte transversal num tronco (parte da árvore que faz a ligação entre as raízes e as folhas) ou qualquer ramo, vamos encontrar diferenciadas entre si, as camadas (visualizando-se de fora para dentro) ilustradas na Figura 2.2. Elas são: a casca exterior (morta), casca interior (viva), câmbio e borne (também chamado de alburno ou branco); cerne ou durâmen.

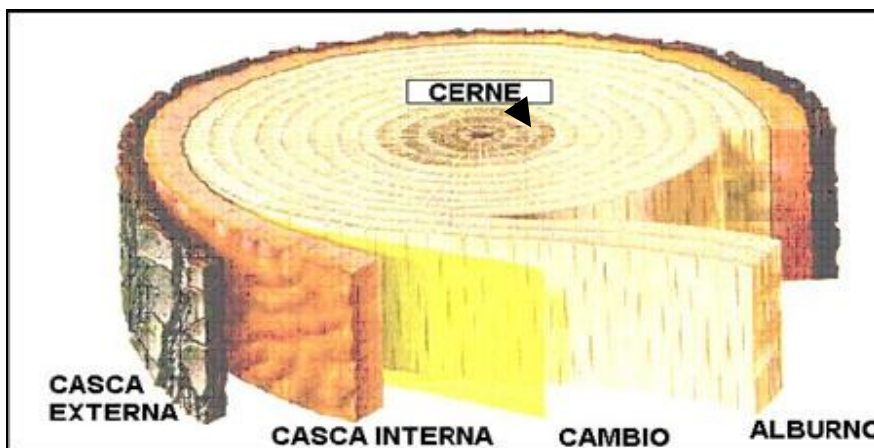


Figura 2.2 - Aspectos macroscópicos da madeira em uma secção transversal do tronco de uma árvore. (Klock et al, 2005).

A casca é a parte que se situa mais externamente no tronco. Avaliando-a como material de construção e relacionado-a com as outras camadas, verifica-se que esta apresenta pouca importância. A sua função é, essencialmente, a de proteger o líber (sinônimo de floema, que juntamente com o xilema, são vasos condutores contínuos da água, dos sais e dos nutrientes, desde as extremidades das raízes mais profundas às folhas mais elevadas da copa). Em algumas espécies, porém, a casca tem a capacidade de formar um produto denominado de cortiça, graças à existência do tecido suberoso. Estas espécies, em vista disso, apresentam maiores destaques em termos de utilização e, conseqüentemente, maior valorização. Exemplos destas espécies são o Angico Rajado e a Corticeira.

O câmbio é uma camada muito fina, situada entre a casca interior e o borne ou albarno. Produz para dentro os vasos lenhosos (responsáveis pelo transporte da seiva bruta) e para fora os vasos liberianos (responsáveis pelo transporte da seiva elaborada).

O borne, albarno ou branco, está situado entre o câmbio e o cerne ou durâmen. É constituído de células que conduzem a seiva bruta e, em geral, apresenta coloração mais clara, esbranquiçada, e resistência inferior à da parte mais central, mais interna (o cerne ou durâmen). Possui mais importância para a vida da árvore e menos importância como madeira. Alguns autores caracterizam como defeito, o tronco que apresenta a camada de borne ou albarno com espessura considerável. Todos os anos formam-se duas camadas de borne, uma mais larga e outra mais estreita, correspondendo, respectivamente, aos crescimentos da primavera e do outono. Por se apresentar com células vivas, esta camada permite que os agentes destruidores, causadores de apodrecimento, ataquem a madeira com muito mais facilidade.

O cerne ou durâmen é a parte de maior aproveitamento nas construções. É a porção morta, mais escura e mais dura de um tronco. Ao contrário de borne ou albarno, cujas células conduzem a seiva bruta, esta camada tem os vasos obliterados por tilas que impossibilitam o fluxo do líquido. É este entupimento que torna possível o endurecimento da madeira nessa região. Daí as suas características de resistência e dureza (Miller, 1999).

A presença de todos estes detalhes estruturais na constituição de uma árvore faz com que a madeira seja um material de amplas possibilidades de uso, variando de madeiras leves e extremamente macias como a balsa até madeiras densas e muito duras como a peroba (Rodolfo, 2005).

A Tabela 2.1 apresenta o destino comercial das camadas do tronco das árvores.

Tabela 2.1 – Destino comercial do tronco de árvore

Camadas	Destino comercial
CASCA	Adubo - paisagismo – lenha. Usualmente descartada como resíduo.

ALBURNO	São as partes mais importantes do tronco, do ponto de vista comercial e industrial, para os ramos de móveis, objetos e utensílios, construção civil, lenha e outros fins, embora em muitos casos o alburno é considerado defeito quando se encontra presente em alguma peça da madeira. Grande parte dos resíduos é gerada a partir do processamento mecânico destas partes.
CERNE (ou durâmen)	

Fonte: Adaptado de Teixeira (2005)

### 2.5.2.3 Composição da madeira

A composição química da madeira varia fortemente em função da espécie, da localização geográfica e de outros diversos fatores. De forma genérica, Durbark et al (1998) dão como composição elementar média da madeira seca, ignorando minerais e elementos como nitrogênio e enxofre (presentes em quantidades inferiores a 0,2%), 50% carbono, 44% de oxigênio e 6% de hidrogênio.

A lignina consiste de um polímero orgânico amorfo e insolúvel de composição química baseada em polímero fenólico, que dá à parede celular, em geral a parede secundária, rigidez e impermeabilidade à água. Os precursores da lignina são três álcoois aromáticos: cumaril, coniferil e sinaptil, (Cruz, 2002). A lignina corresponde entre 23 a 30% (Coníferas) ou 16 a 25% (espécies folhosas) em massa da madeira seca, encontrando-se a maior parte nas paredes das células. É a lignina quem promove a estrutura da madeira da forma que conhecemos, diferenciando-a de outras estruturas vegetais fibrosas de menor teor desta substância, uma vez que cumpre o papel da matriz polimérica, unindo as fibras de celulose e fornecendo coesão à microestrutura.

Os carboidratos por sua vez, são o principal componente das paredes da célula, correspondendo entre 65 a 75% em massa da madeira seca. A hidrólise total destes carboidratos gera açúcares simples como a glicose e xilose. Pequenas quantidades de galactose, arabinose outros açúcares também podem se fazer presentes.

A celulose é o polissacarídeo mais abundante na natureza. Sua cadeia se constitui de unidades de glicose unidas através de ligações 1-β, 4-

glicosídicas, resultando num polímero de elevada massa molar. As celuloses são altamente polares devido aos grupos hidroxila e às ligações carbono-oxigênio-carbono presentes em sua estrutura. Por este motivo a celulose é mais compatível com compostos polares, ácidos e básicos, do que com polímeros apolares. As moléculas de celulose são orientadas aleatoriamente e as macromoléculas polares formam ligações intra e intermoleculares.

As ligações intramoleculares são as que conferem rigidez às cadeias poliméricas, enquanto que as intermoleculares são responsáveis pela origem de um sistema ordenado de formação da fibra vegetal. Ou seja, as moléculas de células se alinham formando as microfibrilas, as quais formam as fibrilas que, por sua vez, se ordenam para formar as paredes celulares da fibra. São estas propriedades semelhantes às dos cristais, que conferem ao material uma alta resistência à tração (Cruz, 2002).

A quantidade de extrativos na madeira varia entre 5 e 30% em massa da madeira seca, e não possui papel estrutural na madeira. Trata-se de uma grande variedade de substâncias químicas de natureza orgânica tais como taninos, polifenóis, ceras, óleos essenciais, resinas, amidos ou como intermediários químicos, muitos dos quais possuem função metabólica como reservas de energia ou mesmo parte do sistema de defesa da árvore contra ataque microbiológico. O teor e composição dos extrativos dependem fortemente da espécie da madeira, das condições de crescimento, da idade da árvore e da época do ano em que se realizou o abate da mesma.

As cinzas e outras substâncias minerais encontram-se presentes na madeira seca em quantidades pequenas que variam entre 0,2 a 1% em massa. Os principais elementos químicos presentes nas cinzas são o cálcio e o potássio, com quantidades menores de magnésio, sódio, manganês, ferro, fósforo, cobre, zinco e silício.

A madeira pode ser considerada uma espécie de compósito polimérico natural. Fibras de reforço de celulose encontram-se unidas e dispersas em uma matriz polimérica de lignina, e forte adesão entre as diversas fases presentes na microestrutura da madeira garantindo à mesma elevada resistência mecânica, tal como é conseguido incorporando-se fibras de reforço a uma matriz polimérica.



#### 2.5.2.4 Umidade da madeira

O uso de fibras vegetais e do pó de madeira como reforço em polímeros, tem sido crescente. Isto porque estes materiais são leves, resistentes, de baixo custo, abundantes em todo o mundo e constituírem fonte renovável de matéria-prima. No entanto, um dos problemas, dentre outros, que se acha associado à característica dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, grão e pó, é o teor de água presente, que em geral dificulta a interação fibra/matriz afetando as suas propriedades mecânicas podendo acelerar o envelhecimento.

A madeira, enquanto constituinte de uma árvore viva, apresenta elevados teores da umidade, tipicamente entre 30% até 200% (Simpson e Tenwolde, 1999 apud Rodolfo, 2005). Esta umidade é retirada tanto através dos mais variados processos de secagem quanto de condicionamento de madeira dita “verde” até chegar-se ao que se denomina madeira “seca”. Os teores típicos da umidade da madeira seca ao ar variam entre 13 e 18% em peso, uma vez que esse teor de umidade depende fortemente do ponto de equilíbrio alcançado com a umidade relativa do ar ambiente de secagem ou mesmo de uso da madeira, (Simpson & Tenwolde, 1999)

A retração é particularmente afetada de maneira diferente dependendo da direção considerada. A retração é praticamente desprezível na direção longitudinal da madeira 0,1 a 2% em média, atingindo 4 a 10% na direção tangencial e 3 a 6% na direção radial, totalizando entre 9 a 16% no volume. Desta forma, é esperado algum grau de empenamento caso seja realizada a secagem da madeira cortada ainda no estado “verde”. Apesar da água livre na estrutura da madeira não causar retração, quando de sua evaporação durante o processo de secagem, a chamada água de impregnação, presente nas estruturas celulares devido à natureza hidrofílica dos constituintes da madeira, causa distorções na mesma (Matuama et al, 2001).

O uso de resíduos de madeira na indústria de polímeros apresenta uma série de desafios. O maior deles está associado ao teor de umidade encontrado em fibras lignocelulósicas comerciais que se situa entre 8 e 12%, considerado excessivamente elevado para a incorporação em matrizes termoplásticas.

Matuama & Mengeloglu, (2002) avaliaram a possibilidade desta umidade presente nas fibras lignocelulósicas ser utilizada como agente promotor de

expansão em compósitos de PVC, porém a situação é bastante específica. No geral, a presença de umidade na fibra lignocelulósica traz uma série de dificuldades no processamento do compósito, terminando por provocar uma série de defeitos no produto final. Sombatsompop & Chaocancaikul, (2004) confirmaram esta última observação.

É com o fornecimento de fibras lignocelulósicas previamente secas, contendo no máximo 2% de umidade (garantida por um processo de secagem industrial intensivo) e tratadas superficialmente com ceras e outros lubrificantes que se assegura um material ideal para o processamento de compósito.

No Brasil, até o momento, não são fornecidas fibras lignocelulósicas previamente secas até teores tão baixos de umidade, ficando os tipos disponíveis restritos a teores de umidade tipicamente acima de 7%. Enquanto que nos EUA e Europa encontram-se disponíveis no mercado resíduos de madeira provenientes de espécies coníferas e folhosas, no Brasil são fornecidos no momento somente resíduos de coníferas (Pinus, Eucalipto e Araucária), moídos e selecionados através de peneiramento e parcialmente secos em processos simples. Desta maneira, fica evidenciada a necessidade e relevância do desenvolvimento de uma tecnologia nacional para o tratamento de resíduos industrializados de madeira, visando sua incorporação a matrizes poliméricas.

## **2.6 Geração dos resíduos industriais de madeira**

Os resíduos de madeira são classificados como resíduos lignocelulósicos, ou seja, contêm majoritariamente lignina e celulose, têm origem tanto em atividades industriais quanto atividades rurais.

Inicialmente o resíduo de madeira pode ser considerado como bastante heterogêneo devido às muitas variedades apresentadas, às diversas granulometrias da serragem e às diversas condições de armazenamento, que alteram suas características físicas, e à dispersão geográfica que dificulta seu transporte.

Se no volume do resíduo não houver outros materiais, principalmente produtos químicos tais como conservantes, fungicidas, inseticidas, vernizes,

tintas, dentre outros, que possam emitir gases ou vapores tóxicos durante processos de reciclagem ou de queima, representam uma grande vantagem no seu uso como reforço/carga. Livre destes materiais contaminantes o resíduo pode ser considerado como banal e não inerte, pois é biodegradável, classificado pela NBR 10004 (ABNT, 1987) como classe 2, com possibilidades de ser reaproveitado em processos de reciclagem por processos diferentes dos processos industriais iniciais e de ser transformado em produtos de uso similar ou diferente ao da madeira serrada inicial (Teixeira, 2005).

Os resíduos industriais de madeira são oriundos do processamento mecânico das toras de madeira sólida. Durante o corte e descasque, processamentos de desdobro, desengrosso, serragem e acabamento, há a geração de vários tipos de sobras sólidas peculiares a cada etapa citada. São assim vistos como resíduo, pois, segundo a revista *referência*, resíduo de madeira é considerado a “sobra após uma ação ou processo produtivo e passam a ser descartados e acumulados no meio ambiente” (Referência, 2003). De forma a sistematizar estes processamentos da madeira sólida, Gonçalves e Ruffino (1989) estabelecem etapas produtivas junto com os resíduos gerados por cada etapa respectiva, como visto na Figura 2.3 a discriminação de cada tipo:



Fonte: Gonçalves & Ruffino (1989)

Figura 2.3 - Etapas da industrialização e resíduos de madeira.

Comumente, estes resíduos são dispostos em silos expostos ao tempo ou em terrenos nas cercanias do setor produtivo. Este tipo de armazenamento pode levar à degradação do resíduo pelo encharcamento por água de chuva ou apodrecimento por agentes biológicos (Teixeira, 2005).

Segundo QUIRINO (2007) o resíduo de madeira pode ter dois destinos:

- **Eliminação:** Ação de se desfazer de um resíduo sem tirar nenhum proveito, como por exemplo, a incineração sem recuperação de energia.
- **Valorização:** está ligada a alguma ação de desenvolvimento de processo tecnológico, podendo ocorrer através de diversas maneiras, como reciclagem, reutilização, regeneração.

Há duas maneiras de valorizar o resíduo de madeira, segundo Quirino (2007), que são a valorização energética, quando o destino do resíduo é o aproveitamento da biomassa como fonte de energia, e a valorização da matéria, quando a biomassa do resíduo é aproveitada como matéria prima para fabricação de outros materiais.

Essas maneiras são mostradas na Figura 2.4 onde é destacado o WPC (wood plastic composites), material compósito constituído de serragem de madeira e resinas plásticas com grande potencial de aproveitamento dos resíduos para a produção de diversos tipos de produtos como: produtos para as indústrias de construção civil, indústria de transportes, moveleira, artigos esportivos entre outros.



Fonte: Quirino (2007)

Figura 2.4 – Maneiras de valorização do resíduo de madeira.

## CAPÍTULO III

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA

As primeiras pesquisas com compósitos plástico-madeira foram na década de 50 onde as indústrias automotivas começaram adicionar pó de madeira ao polipropileno (PP) na fabricação de algumas partes internas dos carros. No final da década de 80 o compósito plástico-madeira começou a ser usado na fabricação de decks (Koenig & Sypkens, 2002).

Compósitos plástico-madeira já estão sendo utilizados na fabricação de uma série de produtos. As aplicações vão desde brinquedos até construções marinhas Youngquist, (1995), British Plastic & Rubber (2001) e Koenig & Sypkens (2002).

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de resíduos de madeira: *Pinus taeda* e *elliottii* e Algarobeira (*Prosopis Juliflora*).

#### 3.1 Pinus

Na década de 1960, através de decreto federal iniciou-se uma política de incentivos para empreendimentos florestais nas regiões sul e sudeste do país, atraindo investimentos de empresas interessadas em suprimento sustentável de matéria prima. Neste ciclo de investimentos foram plantadas extensas áreas principalmente com espécies de *Pinus* originários do sul dos EUA, principalmente *Pinus elliottii*, ilustrado na Figura 3.1, e *Pinus taeda*, além de espécies do gênero Eucalipto tais como *Eucalyptus saligena* e *Eucalyptus grandis*, este originário da Austrália. O rápido crescimento, boa qualidade da madeira e adaptabilidade ao clima e solo das regiões sul e sudeste foram os principais fatores que levaram ao sucesso da implementação destes reflorestamentos (ABIMCI, 2003).

Nos últimos anos a utilização de *Pinus* na indústria madeireira brasileira tem sido crescente. As estimativas indicam que 35% do volume de madeira serrada produzido é formado por madeira desse gênero e que no país, existem

aproximadamente, 1,5 milhões de hectares de plantações. Portanto, trata-se de espécies fundamentais para o fornecimento de matéria-prima, com destaque as Regiões Sul e Sudeste (Ballarin & Palma, 2003), constituindo uma importante fonte de madeira para usos gerais, englobando a fabricação de celulose e papel, lâminas e chapas de diversos tipos, madeira serrada para fins estruturais, confecção de embalagens, móveis e marcenaria em geral. Apesar da demanda, a indústria madeireira está preocupada com a progressiva diminuição da sua oferta. O problema ainda não atinge as grandes empresas do setor afetando as pequenas, incapazes de manter vastas áreas próprias para reflorestamento (Loetz, 2003).



Figura 3.1 – Árvores Pinus elliottii

A madeira Pinus é caracterizada pela coloração bastante clara e baixa dureza. A Tabela 3.1 traz algumas propriedades básicas desta madeira, de acordo com os dados da norma brasileira (NBR 7190, 1997).

Tabela 3.1 – Algumas propriedades básicas da madeira provenientes de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* de acordo com a NBR7190:1997.

Propriedades	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>
Massa específica aparente a 12% de umidade [kg.m <sup>-3</sup> ]	560	645
Resistência a compressão paralela às fibras [MPa]	40,4	44,4
Resistência à tração paralela às fibras [MPa]	66,6	82,8
Resistência normal às fibra	2,5	2,8
Resistência ao cisalhamento [MPa]	7,4	7,7
Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras [GPa]	11,9	13,3

Fonte: Rodolfo Jr. (2005).

Verifica-se, através destes dados, o potencial de reforço deste tipo de fibra de madeira quando utilizado em compósitos poliméricos (Rodolfo Jr., 2005).

### 3.2 Algarobeira

A algarobeira, *Prosopis juliflora*, (algarroba/algarrobo em espanhol, mesquite em inglês e mesquitobaum em alemão) é uma planta xerófita nativa de regiões áridas que vai do sudoeste americano até a patagônia na Argentina e em alguns desertos africanos. Os conquistadores espanhóis, quando chegaram ao novo mundo, deram-lhe o nome de algarrobo, pela semelhança de seus frutos com as vagens da alfarroba (*Ceratonia siliqua*), abundante na região do mediterrâneo (Gomes, 1973, Arruda,1994). Apesar das numerosas espécies existentes desta importante xerófila, no Brasil cultiva-se apenas a *Prosopis juliflora*, espécie originária do deserto de Piura no Peru (Silva, 2002).

No nordeste brasileiro, essa xerófita foi introduzida com a finalidade de ocupar as terras áridas e secas dessa região devido a sua rusticidade e por apresentar a importante característica de frutificar na época mais seca do ano, quando os estoques de forragens naturais atingem um estágio crítico, propiciando, desta forma, um alimento de grande valor nutricional, principalmente para a criação de caprinos e bovinos.

Quando ocorrem os períodos cíclicos de seca no nordeste brasileiro, a massa foliar da algarobeira, ilustrada na Figura 3.2, e as vagens da algarobeira tornam-se a única fonte alimentar economicamente viável que permite a sobrevivência da criação. Nesta época a algarobeira é evidenciada e lembrada pelos agricultores e órgãos de fomento. No entanto, quando esses períodos de seca não ocorrem a algarobeira serve como alvo de críticas pelos órgãos agrícolas incluindo-a até como uma praga. Isto se deve ao espaço que ela ocupa na propriedade e a propagação que dá indiscriminadamente feita pelas sementes que se encontram nas fezes dos animais.



Figura 3.2 – Árvore algarobeira

A algarobeira foi apresentada e difundida como uma promissora alternativa econômica, haja vista sua adaptação em diversas regiões semi-áridas do mundo e por ser ela, uma espécie de uso múltiplo, produtora de lenha, madeira, forragem e outros produtos. Não obstante essas qualidades, a falta de manejo adequado, a adaptação regional da espécie, a facilidade de dispersão promovida pelos rebanhos, dentre outros fatores, transformaram em problema o que pretendia ser uma solução (Pegado, 2006). Hoje é considerada uma “praga vegetal/invasora”, apresenta-se bastante dominante quando em concorrência com as plantas nativas e em algumas situações tem sido inclusive prejudiciais à recuperação da mata nativa.



### 3.3 Compósitos polímero/pó de madeira

A utilização do resíduo (pó de madeira) é uma alternativa viável na preparação de compósitos. A seguir, algumas das pesquisas reportadas por diversos autores são apresentadas.

English et al., (1996), referem-se às boas qualidades da farinha ou pó de resíduos de madeira e de papel usados como carga em resinas termoplásticas. Segundo os autores, este resíduo em pó pode substituir as cargas inorgânicas e minerais, tais como talco ou carbonato de cálcio, na mesma função com as vantagens ecológicas da redução de resíduos sólidos e servindo, também como exemplo de aplicação da reciclagem de resíduos de madeira. As vantagens são: o baixo custo de aquisição de matéria prima, o preço acessível dos produtos gerados além das boas propriedades mecânicas do compósito. Resultado similar foi reportado por Correa et al (2003) quanto à substituição de cargas minerais e fibras de vidro por pó de resíduos de madeira o qual é aplicado em um compósito com uma derivação do polipropileno. O resultado foi um compósito que apresentou ganhos significativos de rigidez em relação aos compósitos não-modificados independentemente do tipo de farinha de madeira empregada.

Marcovich et al., (1999) investigaram a difusão de umidade em compósitos de poliéster insaturado e pó de madeira exposto em ambiente mantido a temperatura ambiente e diferentes umidades relativas. Equações obtidas pelo balanço de massa microscópico para difusão de vapor em sólidos foram usadas para determinar o coeficiente de difusão efetivo no pó de serra, resina pura e dos compósitos. Os autores também investigaram o efeito do tamanho e forma das amostras dos compósitos no teor de umidade final. Diferentes modelos foram usados para prever o coeficiente de difusão efetivo em função da concentração dos enchimentos. Os autores concluíram que os teores de umidade no equilíbrio dos componentes estudados foram dependentes do tamanho e forma das amostras testadas. Este é um aspecto

importante a ser levado em conta quando a aplicação prática destes materiais está sendo considerada. Os autores também concluíram que o coeficiente de difusão dos enchimentos foi aproximadamente 3 ordens de grandeza menor do que a difusividade na matriz. Este comportamento foi atribuído à formação de pontes de hidrogênio entre grupos polares do pó de serra e as moléculas de água, que retardam a difusão de umidade no interior das partículas de madeira.

Yamaji & Bonduelle (2004) utilizaram materiais reciclados para a produção de compósitos plástico/madeira ou WPC (wood-plastic composites). A madeira utilizada na forma de pó e serragem foi misturada ao polietileno de baixa densidade – PEBD reciclado em uma extrusora mono-rosca de 75 mm de diâmetro. Foram testadas formulações contendo 10, 20, 40 e 50% (em massa) de madeira. O teor de umidade inicial da madeira foi de 5,16% para o pó e 7,32% para a serragem. O conjunto de temperaturas na extrusora variou de 135°C a 150°C. Os autores verificaram que foi possível produzir compósitos plástico-madeira utilizando equipamentos convencionais, sem qualquer adaptação, numa indústria recuperadora de plástico. Entretanto, a extrusora mono-rosca, utilizada no estudo, apresentou limitações quanto à remoção dos gases. Sem um sistema de degasagem na extrusora, a produção de compósitos plástico-madeira ficou muito limitada e restrita a determinadas formulações, limitando a produção a formulações com um conteúdo máximo de 20% (em massa) de madeira.

Vianna et al (2004) utilizaram farinha de resíduo de madeira com poliestireno de alto impacto (HIPS) na preparação de compósitos termoplásticos preparados em extrusora de dupla-rosca co-rotacional. As propriedades mecânicas dos compósitos obtidos foram discutidas em termos das características morfológicas dos HIPS utilizados e da quantidade de farinha de resíduo de madeira no compósito. Pela simples aplicação da regra das misturas, mostrou-se que, devido à baixa densidade do resíduo de madeira, o reforço celulósico poderia ser utilizado eficientemente na substituição de cargas minerais ou fibra de vidro em compósitos termoplásticos com um melhor desempenho em termos de resistência e rigidez específica. A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada na análise de superfícies de fratura para

ilustrar a dispersão da farinha de madeira na matriz (HIPS), a molhabilidade do reforço pela resina e as interações reforço-matriz. A incorporação de farinha de madeira ao HIPS apresentou excelente desempenho em termos de resistência e rigidez específica mostrando-se competitiva, em termos de custo-benefício, se comparada à fibra de vidro. Todavia os autores observaram ainda que a substituição de cargas minerais por reforços celulósicos ainda exige estudos mais aprofundados, sobretudo em relação à estabilidade térmica da celulose e durabilidade desses compósitos.

Milagres et al (2006) determinaram as propriedades físicas e mecânicas de painéis produzidos pela mistura, em várias proporções, de partículas de madeira e plástico, comparando a influência do tipo de adesivo e o efeito do tipo de resina termoplástica. Os compósitos foram obtidos por compressão, os materiais foram: partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, polietileno de alta densidade, polietileno de baixa densidade e polipropileno. Empregaram-se duas formulações adesivas (uréia-formaldeído e uréia-formaldeído contendo 0,5% de epóxi). De modo geral, as propriedades dos painéis foram afetadas pela composição das partículas. Os painéis com melhores propriedades foram fabricados com 75% de partículas de madeira e 25% de partículas de polietileno de alta densidade. A adição de epóxi ao adesivo uréico aumentou os valores do módulo de ruptura, dureza e reduziu o inchamento, em espessura, de alguns painéis. As propriedades mecânicas da maioria dos painéis, exceto o módulo de elasticidade, ultrapassaram os valores mínimos estabelecidos na norma ANSI/A1-208/93. De modo geral, os painéis produzidos com PEAD apresentaram maiores valores médios de resistência e menores valores médios de porcentagem de absorção de água e inchamento em espessura, entretanto, na dureza, os painéis produzidos com PP foram mais resistentes do que aqueles com partículas de PEAD e PEBD. O aumento de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas influenciou, significativamente, as propriedades das chapas, diminuindo o módulo de elasticidade, a porcentagem de absorção de água e o inchamento em espessura. Observaram também que, para a resistência à tração perpendicular e módulo de ruptura, os valores médios diminuiriam com o aumento no teor de resinas termoplásticas.

Hillig et al., (2006) estudaram o efeito da composição (cada tipo participou com 30, 50 e 75%) de diferentes misturas de polietileno de alta densidade (HDPE) virgem, HDPE reciclado e serragem de *Pinus* nas propriedades físico-mecânicas de placas confeccionadas pelo processo de compressão. As misturas foram moldadas por compressão em prensa hidráulica a 150°C. Partindo das placas, foram confeccionados corpos-de-prova para ensaios de tração, flexão, impacto e dureza, segundo normas ASTM, e também foram determinadas as densidades médias das placas. Os resultados mostraram não houve diferença significativa entre as propriedades físico-mecânicas dos compósitos confeccionados com HDPE virgem e aqueles confeccionados com HDPE reciclado, exceto para resistência ao impacto, no qual o HDPE virgem apresentou maiores valores. Esses autores observaram também que todos os compósitos confeccionados apresentaram boas propriedades físico-mecânicas, atestando a viabilidade de aplicação industrial.

Pauleski et al., (2007) avaliaram a viabilidade da utilização de casca de arroz e partículas de madeira para a manufatura de compósitos, tendo como matriz o polietileno de alta densidade (PEAD). Os compósitos foram produzidos com casca de arroz e partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, puras ou misturadas, sendo que cada tipo participou com 0, 25, 50, 75 e 100% em proporção de massa seco. O PEAD foi usado como matriz na confecção destes, sendo testadas três proporções: 60, 75 e 90%. Os compósitos foram manufaturados de forma similar à fabricação de chapas aglomeradas com as dimensões de 0,5 x 5 x 25 cm formados em camadas em um molde de aço, e foram avaliadas as propriedades de flexão estática, absorção d'água e inchamento (na espessura) após 24 horas e após 15 ciclos de imersão. Os valores das propriedades de flexão estática foram influenciados pela massa específica do compósito. A casca de arroz provocou menor inchamento em espessura e, independente do tipo de matéria prima utilizada, os valores diminuíram à medida que a proporção de PEAD foi aumentada. Combinações com maior porcentagem de PEAD apresentaram valores mínimos ou, em alguns casos, nulos de absorção d'água. Para a absorção d'água e inchamento em espessura após 15 ciclos, o comportamento foi semelhante ao dos testes após 24 horas de imersão. Os resultados permitiram concluir que os

compósitos produzidos com PEAD, casca de arroz e partículas de madeira puras ou misturadas apresentaram boa qualidade quando comparados aos aglomerados convencionais, evidenciando a viabilidade de uso desses materiais na confecção desse tipo de painel.

## **CAPITULO IV**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados os materiais e as metodologias empregadas nas pesquisas realizadas. Assim são descritos os materiais e as metodologias utilizadas para a identificação botânica, a estimativa da idade da algarobeira, produção do pó de madeira, determinação da granulometria do pó, do teor de umidade, da densidade aparente, o processo de preparação da matriz e dos compósitos, a confecção dos corpos de prova, por compressão e por injeção, a Microscopia Eletrônica de Varredura para a caracterização dos materiais e dos sistemas investigados bem como a sorção de água.

## 4.1 - Materiais

### 4.1.1 – Matriz

Para a confecção das amostras, foi usado como material polimérico o polietileno de alta densidade (PEAD), JV060U, na forma de pequenos grãos (pellets), fornecido pela Braskem, cujas especificações estão mostradas na Tabela 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Propriedades de controle do polietileno de alta densidade utilizado

	Método ASTM	Unidades	Valor
Índice de Fluidez (190°C/2,16Kg)	D-1238	g/10 min	7,0
Densidade	D-1505 / D-792	g/cm <sup>3</sup>	0,957
Distribuição de Peso Molecular	D-2240	-	Estreita

Tabela 4.2 – Propriedades típicas do polietileno de alta densidade utilizado

Propriedades de Referência de Placa <sup>a</sup>	Método ASTM	Unidades	Valor
Tensão de Escoamento	D-638	MPa	28
Módulo de Flexão (Rigidez)	D-790	MPa	1355
Dureza	D-2240	Shore D	65
Resistência ao Impacto Izod	D-256	J/m	55
Resistência a Quebra sob Tensão Ambiental <sup>b</sup>	D-1693-B	h/50°F	3
Temperatura de Deflexão Térmica (0,45 MPa)	D-648	°C	71
Temperatura de Amolecimento Vicat	D-1525	°C	125

Fonte: Polialden Petroquímica S/A, 2007.

(a) Placa moldada por compressão pelo Método ASTM D-1928, procedimento C, (b) Condições: 10% Igepal, placa de 2 mm, com entalhe de 0,3 mm, 50°C.

### 4.1.2 – Reforços Vegetais

Como reforço foram utilizados os seguintes resíduos:

*Pinus taeda e elliottii* - pó de “madeira mole” proveniente da mistura das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, fornecido pela empresa Pinhopó Moagem de Madeiras Ltda., Ponta Grossa - Paraná.

*Prosopis juliflora* - pó de “madeira dura”, oriundo do gênero *Prosopis*, da espécie *Prosopis juliflora*, conhecida como algarobeira, pertencente a família das Leguminosas. Como o pó de algarobeira não está disponível no comércio, produziu-se o pó, a partir de uma árvore de mais de dez anos, adquirida na fazenda Olho D'Água, propriedade de herdeiros da família Gomes, situada no Município de Cumaru, que faz divisa com os Municípios de Bezerros, Surubim, Salgadinho, Passira e Riacho das Almas, situado na região agreste do estado de Pernambuco, região nordestina brasileira, de situação geográfica com 8° 0' 21"S de latitude, 35° 41' 49"W de longitude, 444m de altitude e uma área de 277km<sup>2</sup> (27.700 ha).

O pó da algarobeira foi subdividido da seguinte forma: 3 tipos de pó da casca, 3 tipos de pó do alburno ou branco e 3 tipos de pó do cerne ou durâmen, correspondente, respectivamente as porções do pé, do meio e do topo da tora, a fim de se avaliar comparativamente as suas propriedades. A Figura 4.1 ilustra pós de madeira da casca, do alburno ou branco, do cerne ou durâmen da porção média da Algarobeira e da mistura *Pinus* (*taeda* e *elliottii*).

Para se estimar o quantitativo de pó a ser produzido em relação ao volume das toras da algarobeira e da árvore, aplicaram-se formulações matemáticas que permitiram estimar o volume em função do diâmetro e do comprimento. As Tabelas, do anexo B, mostram as medições que foram realizadas.



Figura 4.1 – Pós da porção média da algarobeira e da mistura de Pinus utilizados nas confecções dos compósitos

## **4.2 Métodos**

### **4.2.1 - Identificação da espécie Algarobeira**

As madeiras comercializadas não são conhecidas pelo seu nome científico mas sim pelo seu nome vulgar e estes dependem da região em que está sendo cultivada. A algarroba/algarrobo em espanhol é conhecida como mesquita em inglês e mesquitobaum em alemão. Ressalte-se ainda que existem várias espécies dentro de um mesmo gênero, e de uma mesma família.

Da espécie arbórea, inicialmente, foi colhido material botânico (ramos, folhas, flores, frutos e sementes) da árvore selecionada sendo, posteriormente, encaminhado ao Herbário Professor Vasconcelos Sobrinho – PEUFR, do Departamento de Biologia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para ser submetido a estudo e identificação.

Para a identificação foi feito um estudo taxonômico da planta onde se procurou evidenciar todas as características dos ramos, das folhas, das flores e dos frutos coletados, e com base em uma chave de identificação botânica, se chegou à família, ao gênero e finalmente a espécie.



#### **4.2.2 – Estimativa da idade da árvore**

Nas essências arbóreas e nas secções transversais dos troncos os acréscimos que ocorrem apresentam formas de anéis anuais de crescimento. Aparecem com o aspecto de anéis em consequência das diferenças quanto à densidade, existentes entre o crescimento inicial de um ano e o último crescimento do ano anterior que lhe fica contíguo. Normalmente uma árvore produz um anel de crescimento por ano, embora ocasionalmente se possa formar, em um ano, mais de um anel. Ocorre, no entanto, que devido aos anéis múltiplos, omissos ou descontínuos, a contagem dos anéis nem sempre indica, como é óbvio, a idade precisa de uma árvore. A contagem dos anéis indica apenas os anos que passaram desde o início do alongamento do tronco, sem indicar os anos em que as plântulas permaneceram numa fase herbácea.

Além da contagem dos anéis de crescimento das toras, realizado por meio de uma lupa com aumento de 30X, foram obtidas informações confiáveis do Sr. Inácio Severino da Mata, administrador da fazenda, que reside a mais de 20 anos na área, de onde se retirou a algarobeira, para dar maior certidão a estimativa da idade da árvore.

#### **4.2.3 – Produção do pó de madeira da algarobeira**

Após a seleção da árvore e a derrubada, sua identificação botânica, seu desdobramento em toras e o transporte para o Laboratório de Análise Estrutural e Tecnologia dos Materiais (LAETEMA) da UFPE, localizado na Cidade Universitária na cidade do Recife, foi feita uma cubagem estimativa das toras.

O processo de cubagem consistiu na medição direta dos comprimentos e dos diâmetros das sub-toras, Pé1 e Pé2, Meio1 e Meio2, Topo1 e Topo2, seguido da determinação do valor médio do diâmetro dessas sub-toras e do comprimento de cada uma. Uma trena milimétrica e um paquímetro digital Mitutoyo Modelo CD- 8" B com precisão do 0,01mm, foram utilizados nessas medições.

Para se estimar o comprimento médio de cada tora foram feitas 3 medições ao longo destas. O diâmetro médio foi estimado por intermédio de 05 medições dos diâmetros em cada face transversal de todas as 6 (seis) sub-toras, procurando-se medir inicialmente o maior e o menor diâmetro e posteriormente três (03) outros diâmetros, escolhidos de modo aleatório.

Para se estimar o volume das toras e da árvore, aplicaram-se formulações matemáticas que permitem encontrar o volume em função do diâmetro e do comprimento.

A determinação dos percentuais de cerne, albarno e casca permitem conhecer as potencialidades de aproveitamento das partes do tronco. Para isso, realizou-se, antes da colocação das toras no processo de serragem e aplainamento, determinação das porções dos componentes nas seções transversais das toras. Além dos diâmetros das toras foram feitas também medições das espessuras da casca, do albarno e do diâmetro do cerne ou durâmen.

De cada uma das sub-toras foi separada a casca, o albarno ou branco e o cerne ou durâmen. A casca e o albarno foram retirados manualmente com a auxílio de um formão, material cortante, tendo-se o cuidado de delimitar essas camadas para não possibilitar a mistura de uma porção com outra. Retiradas, da maneira como o foram, essas porções ficaram sob a forma de fragmentos graúdos e foram todas elas submetidas à pesagem.

A parte central da madeira, correspondente ao cerne ou durâmen, que ficou no formato de tora, foi transformada em cavaco. A parte mais central do cerne ou durâmen, ficou como sobra devido à impossibilidade de toda a sua transformação em cavaco.

O pó de madeira da algarobeira foi produzido a partir de uma frrageira de navalha, movida por um motor trifásico, fabricado pela indústria Arno S/A, com capacidade de 5CV, 2,4 AMP, 50/60HZ e 3.440 RPM sendo antes totalmente reformada e descontaminada. Depois de cada processamento para a produção de um tipo de pó, a frrageira passava por uma total limpeza de descontaminação para não ocorrer possíveis misturas de pós de diferentes posições na tora. Na figura 4.2 pode-se observar a frrageira utilizada para a produção de pó da algarobeira.

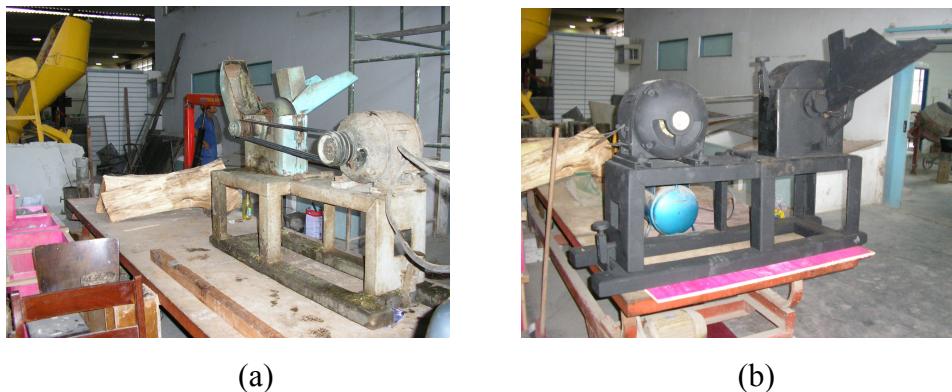


Figura 4.2 – Forrageira utilizada para a produção do pó de madeira da algarobeira. (a) - antes da restauração e contaminada; (b) - Depois da restauração e descontaminada.

O pó de madeira, à medida que ia sendo processado, era colocado separadamente, em reservatórios (tanques) (Figura 4.3a) e colocados em ambiente isolado para evitar contatos e contaminações com outros materiais (Figura 4.3b). Todo o pó produzido foi pesado para se estimar, em função do volume e do peso da madeira trabalhado, o quantitativo de pó produzido.



Figura 4.3 – (a) - Cavaco armazenado em reservatório, (b) - isolado para evitar contaminação.

#### 4.2.4 - Determinação da granulometria do pó de madeira

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação da percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada.

Os pós da algarobeira e das misturas das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* foram classificados granulometricamente. O pó de madeira oriundo da Algarobeira, produzido no LAETEMA, e correspondente a casca, alburno ou branco e cerne ou durâmen, e ao pé, meio e topo da tora, foi submetido à

separação granulométrica e todo pó passante em peneira 70 mesh foi utilizado na confecção dos compósitos.

Para a análise granulométrica do pó de Pinus e da algarobeira foi utilizada 100g de cada pó e a análise foi realizada no equipamento do tipo RO-TAP, testing sieve shaker, fabricado pela W.S. TYLER company, USA, Figura 4.4, com um conjunto de 6 peneiras (100, 120, 170 , 200, 325 e 400) mesh, correspondendo a respectivamente (0,149; 0,125; 0,088; 0,074; 0,044; 0,037) mm. Os testes foram realizados segundo as normas técnicas NBR 7217, (1982).



Figura 4.4 - Equipamento tipo RO-TAP, testing sieve shaker, com um conjunto de 6 peneiras (100, 120, 170 , 200, 325 e 400 ) mesh, utilizado para a determinação da granulometria do pó de madeira

#### 4.2.5 - Teor de umidade do pó de madeira

Para a determinação do teor de umidade do pó da madeira foram utilizadas pequenas cápsulas, específicas para a determinação de umidade, balança digital com precisão de 0,01gramas e uma estufa do tipo ELKA, modelo 179. De início as amostras foram colocadas nas cápsulas, taradas e identificadas, posteriormente pesadas, sendo este peso inicial denominado de  $P_u$ , e colocadas em estufa, a uma temperatura de  $100 \pm 2$  °C. Em intervalos de tempos inicialmente estabelecidos de 15 minutos, eram realizadas pesagens até as amostras apresentarem peso constante, sendo que este peso,  $P_s$ , ocorreu após um período de 72 horas. A medida do teor de umidade foi realizado em triplicata e calculado de acordo com a equação:

$$Umidade(\%) = \left( \frac{P_u - P_s}{P_s} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:  $P_u$  - peso úmido e  $P_s$  – peso seco

#### 4.2.6 - Densidade do pó de madeira

O procedimento para a determinação da densidade consistiu em, inicialmente, tarar a cápsula (Figura 4.5 - a), utilizando cápsula específica e balança digital do tipo solotest, BG 8.000. Em seguida determinou-se o volume da cápsula, enchendo-a de água até o nível do plano superior (Figura 4.5 - b) e, posteriormente, a massa da água. Sendo unitário o valor da densidade da água, a massa corresponde ao volume com a sua respectiva unidade,  $g/cm^3$ . Depois de esvaziada a cápsula esta era novamente tarada e preenchida com pó de madeira para em seguida determinar-se o peso do pó contido na cápsula. Com os valores do volume da cápsula, igual ao volume da amostra, e o peso da amostra determinou-se a densidade aparente aplicando-se a fórmula:

$$Dap = M/Vap \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

onde:  $Dap$  - Densidade aparente;  $M$  - Massa da amostra e  $Vap$  - Volume aparente da amostra.



(a)



(b)

Figura 4.5 – (a) Taragem da cápsula, (b) Determinação do volume da cápsula para determinação da densidade aparente do pó da madeira

#### 4.2.7 - Processamento das composições

Para o processamento dos compósitos plástico-madeira foi utilizado o reômetro de Torque System 90 da Haake Buchler, operando com o acessório

do misturador, rotores. Figura 4.6-a e processador de dados figura 4.6 – b. Antes da preparação das misturas, as porções de PEAD e Pó de Madeira foram pesadas em balança digital, tipo Balança Marte, modelo AS2000C.

O percentual para o polietileno de alta densidade e para o pó de madeira foi definido da seguinte forma:

- ✓ Composições contendo 0, 10 e 20% de pó de madeira passante em peneira de 70 mesh, foram preparadas.

Embora inicialmente o planejado fosse composições com percentuais mais elevados, de 30 e 40% de pó de madeira, não foi possível o processamento devido às limitações experimentais. Com 30% de pó verificou-se uma diminuição na aderência entre o termoplástico e as partículas de pó de madeira.

O pó de madeira não foi seco em estufa, foi processado com a umidade das condições ambiente.

- ✓ As condições operacionais adotadas foram:

- 1) Temperatura de 150°C, 200°C e 220°C.
- 2) Velocidade do rotor de 50 e 100 RPM
- 3) Tempos de processamento de 5, 10, 15 e 30 minutos.

Essas condições foram escolhidas seguindo os cuidados para evitar degradação do material, por isso a temperatura inicial de 150 °C teve como referência a temperatura de fusão do PEAD (135 °C) enquanto que a temperatura máxima foi de 220 °C para evitar a degradação da celulose do pó de madeira.



(a)



(b)

Figura 4.6 – (a) Misturador do Reômetro de Torque System 90 da Haake Buchler utilizado para processamento das composições e (b) Processador de dados

#### 4.2.8 - Confeção dos corpos-de-prova

Por compressão – Depois de retiradas do reômetro e trituradas as amostras, para obtenção de material fragmentado, os corpos de prova foram moldados utilizando-se uma prensa hidráulica uniaxial operando a 150°C. Foram confeccionados no mínimo 6 corpos de prova para cada composição. O material era colocado em moldes vazados dispostos entre duas folhas de alumínio e levado à prensa aquecida, onde eram mantidos por 10 minutos, sob uma pequena força de fechamento. Decorrido esse tempo, a pressão era aliviada rapidamente para liberação de gases, em seguida a prensa era fechada com uma pressão de 1,5 MPa e mantida por 15 minutos, para possibilitar a moldagem.

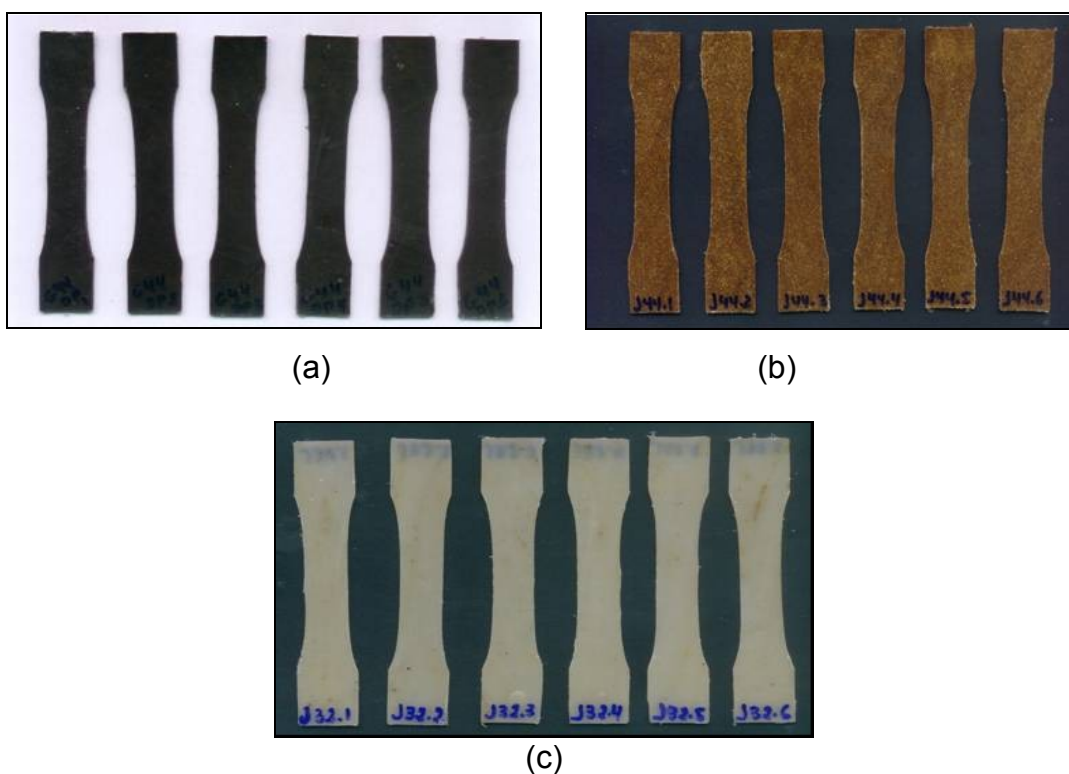


Figura 4.7 – Corpos de prova moldados por compressão, com composições processadas a temperatura de 200°C, 50rpm e 10 minutos a - (PEAD com 20% de PMALDPé); b – (PEAD com 20% de PMPinus)); c – (PEAD/PURO).

Por injeção – A moldagem por injeção foi realizada em injetora de bancada do tipo RAY RAN, operando a uma pressão de 0,69 MPa e uma temperatura de barril de 150 °C, e temperatura de molde de 60 °C. Os corpos de prova (ASTM D638, tipo IV) moldados por injeção, com composições processadas a temperatura de 200°C, 50rpm e 10 minutos, estão ilustrados na Figura 4.8.

onde se observa a mesma variação de coloração e uma melhor moldagem devido a melhor compactação dos corpos de prova. . Foram confeccionados no mínimo 6 corpos de prova para cada composição.

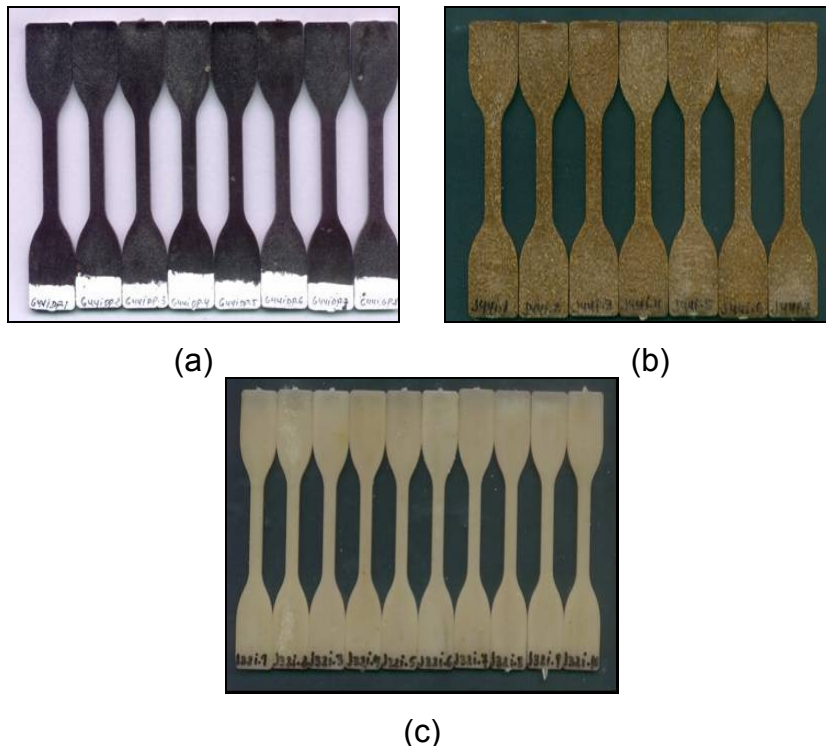


Figura 4.8 – Corpos de prova moldados por injeção, com composições processadas a temperatura de 200°C, 50rpm e 10 minutos: a - (PEAD com 20% de PMALDPé); b – (PEAD com 20% de PMPinus); c – (PEAD).

#### 4.2.9 - Propriedades Mecânicas

Os ensaios de tração foram realizados segundo as normas ASTM D-638, em máquina universal de ensaios Lloyd LR-10KN, operando à temperatura ambiente, com uma taxa de deslocamento de 50 mm/min. A Figura 4.9, ilustra a máquina de ensaio e um corpo de prova após ser submetido a ensaio.





(a)



(b)

Figura 4.9 – a - (Máquina de ensaio de tração - Lloyd LR-10KN), b – (Corpo de prova rompido após ser submetido a ensaio de tração).

#### 4.2.10 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura foram realizados em um microscópio eletrônico com detector de retroespalhamento, sistema de baixo vácuo e micro análise por EDX, marca Shimadzu, modelo SSX-550. Para tal ensaio foram empregadas superfícies de fratura dos corpos de prova de tração, os quais foram recobertos com carbono. As análises foram realizadas no Laboratório de Ensaio de Materiais – UNPA - CTGÁS.

#### 4.2.11 - Ensaio de sorção de água

Os ensaios de sorção de água foram realizados em amostras selecionadas, em número de no mínimo 6 para cada composição. As amostras foram pesadas e, em seguida, imersas em água destilada à temperatura ambiente. Em intervalos de tempos inicialmente pré-determinados de 15 minutos, as amostras eram retiradas da água, secas rapidamente com tecido de baixa absorção e pesadas em balança, com precisão de  $\pm 0,1$  mg. O teor de

água absorvido foi calculado comparando-se o peso inicial e o peso final após a exposição a água, de acordo com a equação:

$$Abs(\%) = \left( \frac{P_u - P_s}{P_s} \right) \times 100 \quad (4.7)$$

Onde:  $P_u$  - peso úmido e  $P_s$  - peso seco

Após o completo saturamento, as amostras foram submetidas a ensaios de tração com a finalidade de se determinar a influencia da umidade no comportamento mecânico dos compósitos. A Figura 4.10 ilustra os corpos de provas imersos em água para os ensaios de sorção.



(a)



(b)

Figura 4.10 – (a) CPs de PEADPURO e (b) CPs de PEAD/PMPinus, imersos em água.

#### 4.2.12 – Cinética de sorção de água – Modelagem

As curvas de cinética de absorção de água e os mecanismos envolvidos foram interpretados a partir da utilização de um modelo difusional Fickiano simplificado com coeficiente de difusão efetivo constante e condições de equilíbrio na superfície. Levando-se em consideração a geometria das amostras foi proposto no modelo as hipóteses de transferência unidirecional e comportamento da placa infinita. A sorção de água foi descrita pela 2ª Lei de Fick.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{D \partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\text{Com condição inicial: } C_A(x,0) = 0 \quad (2)$$

$$\text{e de contorno } C_A\left(\pm \frac{b}{2}, t\right) = C_{A\infty} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_A(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (3a)$$

a equação (1) admite a solução (Crank, 1975)

$$M^* = 1 - \frac{\bar{C}_A}{C_{A\infty}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{l^2}\right] \quad (4)$$

A equação (4) tem uma aproximação assintótica para tempos curtos muito utilizada na literatura sobre difusão em polímero (Neogi, 1996).

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{8}{\pi^{1/2}} (Dt/l^2)^{1/2}$$

(5)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{8}{\pi^{1/2}} \cdot \frac{D^{1/2}}{l} \quad (6)$$

da inclinação do gráfico  $\frac{M_t}{M_\infty}$  em função do  $t^{1/2}$  (anexo D) faz-se a regressão linear

(anexo D) e com o valor de B (anexo E) substitui-se na equação (6).

$$B = \frac{8}{\pi^{1/2}} \cdot \frac{D^{1/2}}{l} \quad (7)$$

O coeficiente de difusão para tempos curtos é dado pela equação (8)

$$D = \frac{B^2 l^2 \pi}{64} \quad (8)$$

onde:

$B \rightarrow$  dado da regressão linear;

$l \rightarrow$  é a espessura da amostra;

$D \rightarrow$  é o coeficiente de difusão para tempos curtos em  $m^2/s$ .

Coeficiente de difusão para tempos longos:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{l^2}\right) \quad (9)$$

$$1 - \frac{M_t}{M_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{l^2}\right) \quad (10)$$

Aplicando o logaritmo neperiano na equação (10), temos:

$$\ln\left(1 - \frac{M_t}{M_\infty}\right) = \ln\frac{8}{\pi^2} + \left(\frac{-D\pi^2 t}{l^2}\right) \quad (11)$$

Da inclinação do gráfico  $\left(1 - \frac{M_t}{M_\infty}\right)$  em função do tempo (anexo D) , faz-se a regressão linear (anexo D) e com o valor de B encontrado (anexo E) iguala-se ao termo b da equação (11):

$$B = \frac{D\pi^2}{l^2} \quad (12)$$

O coeficiente de difusão para tempos longos é dado pela equação (13):

$$D = \frac{B.l^2}{\pi^2} \quad (13)$$

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo os resultados obtidos são apresentados e discutidos. Para facilitar o entendimento e melhor embasar as discussões, os tópicos investigados foram organizados da seguinte forma: a) Identificação botânica das espécies selecionadas; b) Estimativa da idade da árvore algarobeira; c) Estimativa do quantitativo de pó produzido da algarobeira; d) Determinação da granulometria do pó de madeira (Pinus e Algarobeira); e) Determinação do teor de umidade e densidade aparente do pó de madeira; f) Propriedades mecânicas; e) sorção de água.

Os valores médios das propriedades estudadas, com os respectivos desvios padrões estão relatados nos resultados e a seguir em forma de gráficos para uma melhor avaliação dos comportamentos apresentados.

#### **5.1 - Identificação das espécies fornecedoras do Pó de madeira**

Do estudo das arvores utilizadas para fornecimento do pó para o presente trabalho, resultou essas pertencerem ao gênero *Prosopis* e ao gênero *Pinus*.

Do estudo da árvore selecionada no campo e coletada evidenciou-se esta pertence a espécie *Prosopis Juliflora* (S.w)D.C., (leguminosae

mimosóidea), “madeira dura”. Essa identificação foi realizada pelo taxonomista A. Laurênio, que se baseou nas características das folhas, das flores e dos frutos da espécie, com base na literatura, e descrita como sendo uma árvore de caule tortuoso, com até 6 a 8 m de altura, possuindo espinhos axilares, solitários ou geminados, com cerca de 6 a 8 cm de comprimento, raro inerme; casca pardo-avermelhada, fendida, escamosa e grossa; folhas bipinadas, 1 juga, raro 2 jugas, folíolos 6 a 30 jugos, linear oblongo, separados entre si por longa raque; flores amarelo-pálidas, dispostas em espigas axilares cilíndricas, de 7cm; ovário súpero; fruto legume de cerca de 20 cm de comprimento.

Com relação ao gênero *Pinus* o pó foi recebido diretamente da empresa Pinhopó que prestou a informação de que a empresa trabalha com fornecimento de pó oriundo das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliotte*, “madeira mole”, misturados.

## 5.2 - Estimativa da idade da árvore algarobeira

Da contagem dos anéis de crescimento da algarobeira estimou-se essa possuir uma idade de 10 anos, estimativa confirmada pelo administrador da propriedade de onde foi coletada a árvore. Na Figura 5.1 pode-se observar a seção transversal da tora de algarobeira e os anéis de crescimentos.

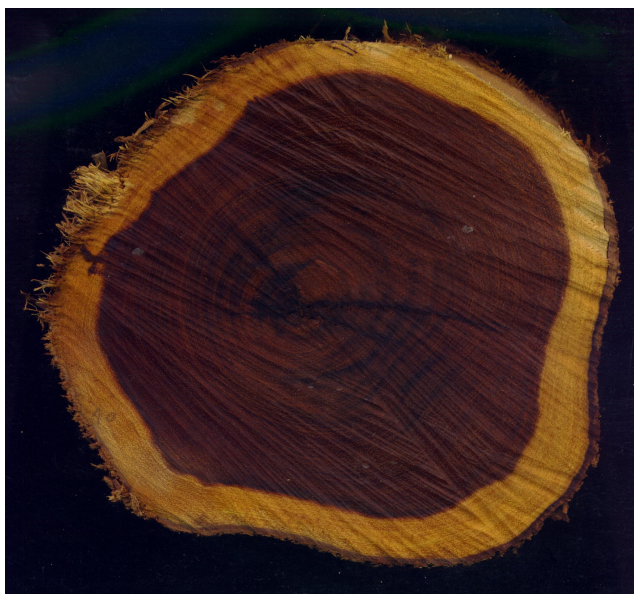


Figura 5.1 - Seção transversal da tora de algarobeira (*Prosopis juliflora* (Sw)DC)

## 5.3 - Quantitativo de pó obtido da algarobeira - *Prosopis juliflora*

Observando-se a Tabela 5.1, e considerando-se a totalidade do pó produzido (>70mesh + <70mesh) verifica-se que o alburno do pé foi quem apresentou um melhor rendimento enquanto que a casca do meio apresentou o menor rendimento.

No processo de produção de pó por intermédio de uma forrageira considerando-se a tora como um todo, chega-se a obtenção de um percentual médio de aproveitamento da ordem de 94,33%. No entanto, em relação ao aproveitamento para um pó de granulometria <70 mesh, o percentual obtido foi da ordem de 7,63%, considerado baixo. Esse aproveitamento baixo se deve a um processo pouco otimizado uma vez que o objetivo maior do presente trabalho era o da produção de um quantitativo suficiente de pó apenas para a utilização nos compósitos.

Particularizando-se se observa que quem apresentou maior rendimento foi o alburno ou branco do pé com 99,74%, enquanto que a casca do meio apresentou o mais baixo rendimento que foi de 82,92%. Pela ordem de rendimento e considerando-se a tora como um todo, o alburno apresentou 97,02% de rendimento, o cerne ou durâmen 93,85% e a casca com 88,99%. Como se pode observar o aproveitamento de 94,33% de material proveniente de uma tora de madeira, submetida a um processo não otimizado de transformação em pó, foi considerado muito bom.

Tabela 5.1 - Produção de pó da algarobeira.

Porção na tora	Peso inicial (kg)	Peso do pó >70mesh (kg)	Peso do Pó <70mesh (kg)	Perdas (kg)	Perdas (%)	Aprov. (%)
Casca Pé	3,7	2,58	0,84	0,28	7,57%	92,43 %
Alburno Pé	15,2	13,90	1,26	0,04	0,26%	99,74 %
Cerne ou durâmen Pé	55,4	48,40	1,52	5,48	9,89%	90,11 %
Casca Meio	2,4	1,31	0,68	0,41	17,08%	82,92 %
Alburno Meio	10,93	8,90	1,15	0,88	8,05%	91,95 %
Cerne /durâmen Meio	28,8	25,90	2,61	0,29	1,01%	98,99 %
Casca Topo	1,8	1,01	0,61	0,18	10%	90,00 %
Alburno Topo	8,80	7,80	0,88	0,12	1,36%	98,64 %
Cerne /Durâmen Topo	22,8	20,10	1,89	0,81	3,55%	96,45 %
Casca	7,90	4,90	2,13	0,87	11,01%	88,99 %
Alburno	34,93	30,60	3,29	1,04	2,98%	97,02 %
Cerne ou durâmen	107,00	94,40	6,02	6,58	6,15%	93,85 %
Total	149,83	129,9	11,44	8,49	5,67%	94,33 %

#### 5.4 - Determinação da granulometria do pó de madeira (Pinus e Algarobeira)

As Tabelas 5.2 e 5.3, ilustradas nas Figuras 5.2 e 5.3 apresentam os resultados da avaliação da distribuição granulométrica para os pós de madeira utilizados neste trabalho, determinadas de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM D1921: 2001.



Tabela 5.2 – Resultados da avaliação da distribuição granulométrica para o pó de madeira *Pinus eliotti* e *Pinus taeda* misturados

Peneira (mesh)	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Retido (%)	Retido acumulado (%)
100	149	29,42	29,42
140	105	21,59	51,01
170	88	23,59	77,60
200	74	5,06	79,66
325	44	10,06	89,72
400	37	6,19	95,91
fundo	-	4,06	99,97

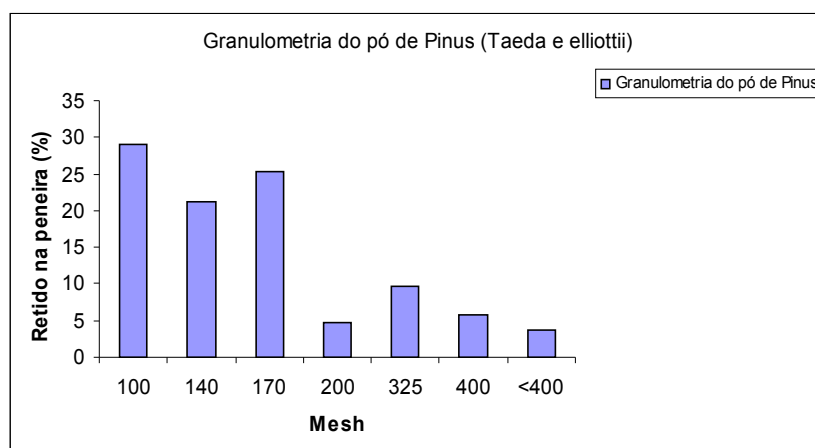


Figura 5.2 – Histograma da distribuição das partículas de Pinus taeda e eliottii misturados

Tabela 5.3 – Resultados da avaliação da distribuição granulométrica para a fibra lignocelulósica *Prosopis juliflora* (Algarobeira).

amostra	Peneira 100mesh (%)	Peneira 140mesh (%)	Peneira 170mesh (%)	Peneira 200mesh (%)	Peneira 325mesh (%)	Peneira 400mesh (%)	fundo (%)
Cerne (ou Duramen) pé	25,41	17,70	27,01	5,93	12,84	7,05	4,50
Duramen Meio	27,35	16,34	27,06	5,51	12,53	7,55	4,29
Durame Topo	22,01	17,59	29,27	6,57	14,06	6,50	4,51

Alburno Pé	25,01	15,87	26,43	6,18	13,21	7,12	6,13
Alburno meio	22,43	16,94	28,95	6,44	13,98	6,95	4,79
Alburno topo	25,49	16,80	27,48	6,31	12,92	6,84	4,70
Casca Pé	20,61	18,87	28,09	4,21	13,95	6,44	8,09
Casca Meio	22,95	18,82	26,19	3,66	12,61	6,56	8,83
Casca Topo	23,51	18,80	25,88	3,78	12,56	6,22	8,52
Mistura/Pó	26,20	17,29	26,67	5,36	13,03	5,78	5,65
Pinus	29,42	21,59	23,59	5,06	10,06	6,19	4,06

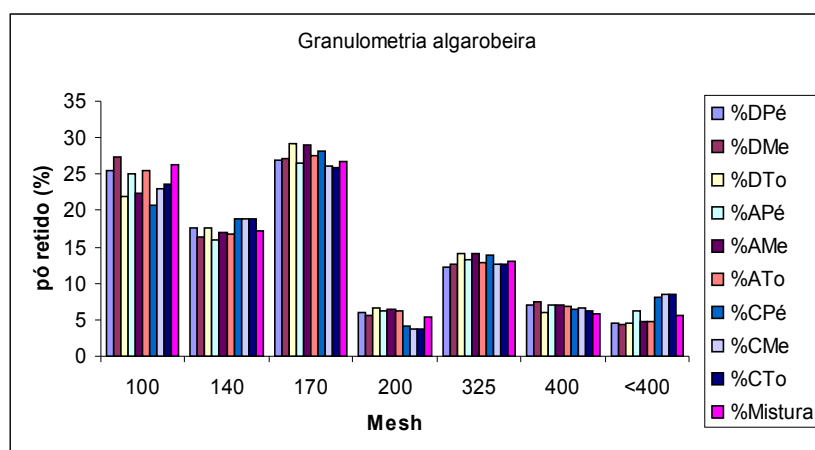


Figura 5.3 – Histograma da distribuição de partículas de pó das partes da tora da algarobeira e da mistura.

Observa-se que os diversos tipos de pó da algarobeira apresentaram uma granulometria que, tendo inicialmente 70 mesh, variou de 100 até 400 mesh. O material que apresentou maior granulometria foi o pó oriundo do cerne ou durâmen do meio que teve retido 27,35%, na peneira de 100 mesh. O maior quantitativo de pó de menor diâmetro, 8,83% é da casca do meio que ficou retido no coletor. A granulometria da mistura apresentou a mesma tendência dos pós da tora, apresentando maior quantitativo de pó retido na peneira de 170 mesh. De modo geral, o tamanho médio de partículas de todas amostras investigadas são similares. Cerca de 75% de pó de madeira Pinus taeda e elliottii e 70% de pó de algarobeira foram retidas em peneira de malha 170. As variações na distribuição do tamanho de partículas foram observadas como uma função da posição na tora onde foi obtida. A distribuição granulométrica dos pós indica que o material produzido tem granulometria do pó adequada ao que é comercializado.

### 5.5 - Determinação do teor de umidade e densidade aparente do pó de madeira

A Tabela 5.4 apresenta os resultados de teor de umidade e densidade aparente dos tipos de fibras lignocelulósicas avaliados neste estudo.

Tabela 5.4 - Teor de umidade e densidade aparente da algarobeira (*Prosopis juliflora*) e *Pinus taeda* e *elliottii*.

Amostras		Teor de Umidade do pó de madeira (%)	Densidade aparente do pó de madeira (g/cm <sup>3</sup> )	
Algarobeira	Cerne (ou durâmen) Pé	4,501	232,534	
	Alburno Pé	2,332	183,410	
	Casca Pé	3,773	386,175	
	Média Pé	3,535	274,373	
	Cerne Meio	3,290	211,336	
	Alburno Meio	2,129	197,511	
	Casca Meio	4,033	368,971	
	Média Meio	3,15	288,606	
	Cerne Topo	4,077	213,825	
	Alburno Topo	1,997	195,511	
	Casca Topo	4,388	354,531	
	Média Topo	3,487	287,955	
		Média Cerne	3,956	219,232
	Média Alburno	2,153	192,144	
	Média Casca	4,065	369,892	
Pó misturado da algarobeira		3,390	286,756	
Pinus taeda e elliottii		3,960	211,80	

Observa-se que de modo geral, o maior teor de umidade encontrado foi de 4,501% em uma amostra correspondente ao cerne ou durâmen do pé e a menor foi de 1,997% para o alburno do topo. O teor de umidade médio do Pinus, 3,96% e o da algarobeira, 3,39%, mesmo pertencendo a espécies diferentes, uma “madeira mole” e outra “madeira dura”, respectivamente, são semelhantes e podem ser considerados baixos.

O teor de umidade de equilíbrio de uma determinada espécie de madeira, na forma de peças, varia de acordo com a umidade relativa do ar e da histerese. Considerando um teor da umidade relativa do ar entre 60% e 90%, o teor de umidade de equilíbrio da madeira deve ficar entre 10% e 18%.

Observa-se que o valor médio da densidade aparente do alburno situado no pé da tora, é o material que apresenta a densidade aparente mais baixa, 183,410 g/cm<sup>3</sup>. Por outro lado a maior densidade foi identificada na

casca do pé 386,175 g/cm<sup>3</sup>. De acordo com Koenig e Sypkens (2002), a baixa densidade dos resíduos da madeira é um dos fatores para que ocorram inconsistências no produto final, como a segregação de materiais, acarretando na produção de compósito plástico-madeira de baixa qualidade.

Os resultados indicam uma relação direta entre a densidade média e o teor de umidade médio contido no pó de madeira. Comparando-se os valores encontrados para o teor de umidade média em relação à densidade média, verifica-se que o pó de madeira da casca foi quem apresentou maior densidade média e reteve maior teor de umidade enquanto que o pó de madeira do alburno apresentou menor densidade média e reteve menor teor de umidade média. O pó de Pinus (taeda + elliottii) apresentou uma densidade média bem próxima da densidade média do pó do cerne e seu teor de umidade média tem um valor, também, bem próximo do teor de umidade média do cerne. Essa relação é perfeitamente justificável uma vez que o pó que apresenta maior densidade possui menos vazios capilares e isso possibilita uma menor perda de água por evaporação natural.

Diferentemente do pó, a densidade da madeira numa mesma árvore varia da medula ou canal medular para a casca e da base do tronco para a copa. Quando se estuda a variação no sentido medula-casca, podem freqüentemente ser encontradas pequenas reduções na densidade da madeira mais recentemente formada, isto é, nas camadas mais próximas à casca. O cerne geralmente contém maior quantidade de substâncias extrativas que o alburno; isto explica porque a densidade do cerne em muitas espécies é maior que a do alburno. Para a densidade no sentido base-copa da árvore, não existe modelo de variação definido.

Embora a densidade da madeira, na forma sólida (tora, tábua, viga, etc.) seja conhecida, é importante também saber a quantidade de madeira existente num determinado volume de serragem. Em se tratando do pó da madeira a densidade esta relacionada com o tamanho das partículas.

## **5.6 – Propriedades mecânicas**

### **5.6.1 Moldados por Injeção**

Os resultados, que são valores médio de 6 corpos de provas ensaiados, obtidos para as propriedades mecânicas de compósitos PEAD/Pinus taeda e elliotii, processados a uma temperatura de 150°C, em função do teor de pó de madeira e das condições de processamento, estão ilustradas nas Figuras 5.4 - 5.5.

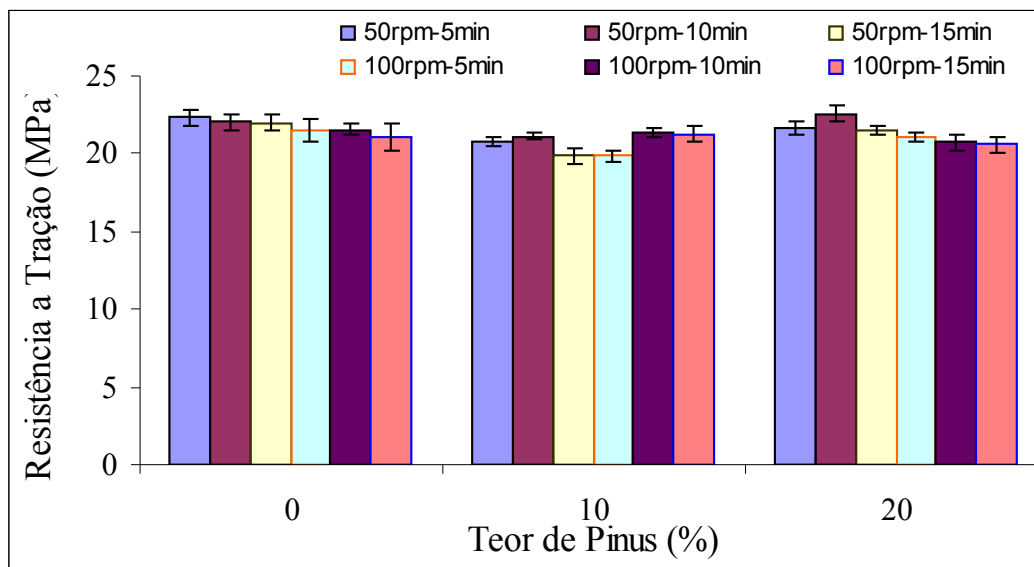


Figura 5.4 – Resistência a tração do compósito PEAD/madeira Pinus como função das condições de processamento e teor de pó de madeira.

Observa-se na Figura 5.4 que, em média, a resistência da matriz tende a diminuir com a severidade das condições de processamento, isto é, com alta velocidade do rotor e longos tempos. Entretanto, dentro do erro experimental, essas mudanças não são acentuadas, indicando que a degradação da matriz em função das condições de processamento foi mínima. A resistência à tração dos compósitos de PEAD/Pinus mostrou comportamento semelhante. De modo geral a resistência à tração dos compósitos foi menor que a da matriz e tendeu a aumentar com o aumento do teor de fibra (pó de madeira). Observa-se ainda que o compósito com 10% de pó de madeira pinus apresentou aumento na resistência para amostras processadas sob condições mais elevadas de processamento (100rpm, 15 min). O fato da resistência a tração dos compósitos ser maior em condições mais severas é atribuído a baixa degradação e melhor dispersão do pó de madeira.

A influência das condições de processamento no módulo de elasticidade do compósito PEAD/pó de madeira Pinus está ilustrada na Figura 5.5.

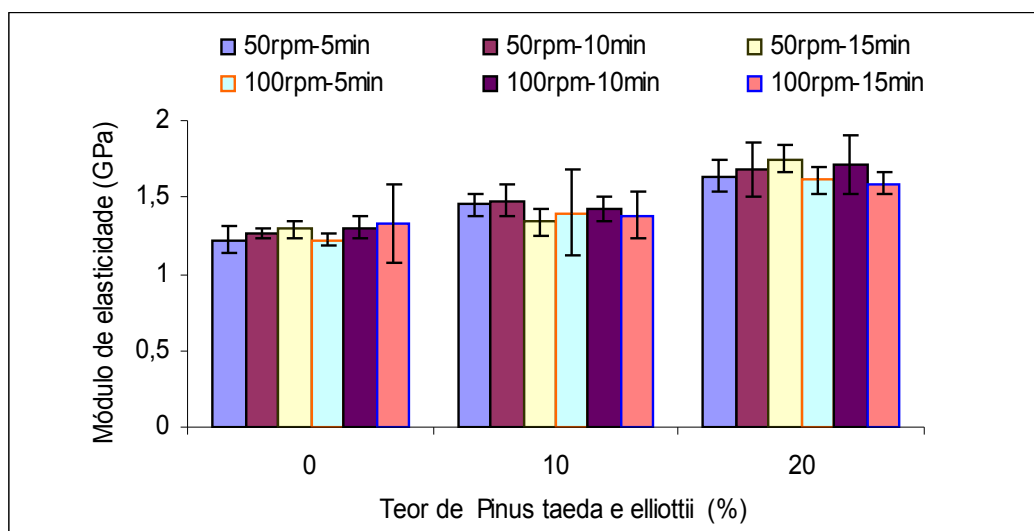


Figura 5.5 – Módulo de elasticidade do compósito PEAD/madeira Pinus como função das condições de processamento e teor de pó de madeira.

Observa-se na Figura 5.5 que o módulo da matriz não mudou significativamente com as condições de processamento adotadas. Indicativo de que as condições de processamento não causaram degradação significativa na matriz. O módulo de elasticidade dos compósitos foram superiores ao da matriz, comportamento esperado e atribuído às propriedades individuais dos componentes e ao teor do pó de madeira. Pode-se afirmar que os efeitos das condições de processamento tenderam a diminuir o módulo de elasticidade dos compósitos processados sob condições mais severas (longos tempos de processamento e maior velocidade do rotor). Estas mudanças, entretanto, foram pequenas, podendo-se afirmar de que as condições de processamento adotadas podem ser consideradas adequadas. O PEAD funde a 135°C e o pó de madeira degrada numa temperatura cerca de 200-220°C, logo, a temperatura de processamento adotada de 150°C não causou degradação significativa.

A influência das condições de processamento no alongamento de ruptura dos compósitos PEAD/pó de madeira pinus está ilustrada na Figura 5.6.

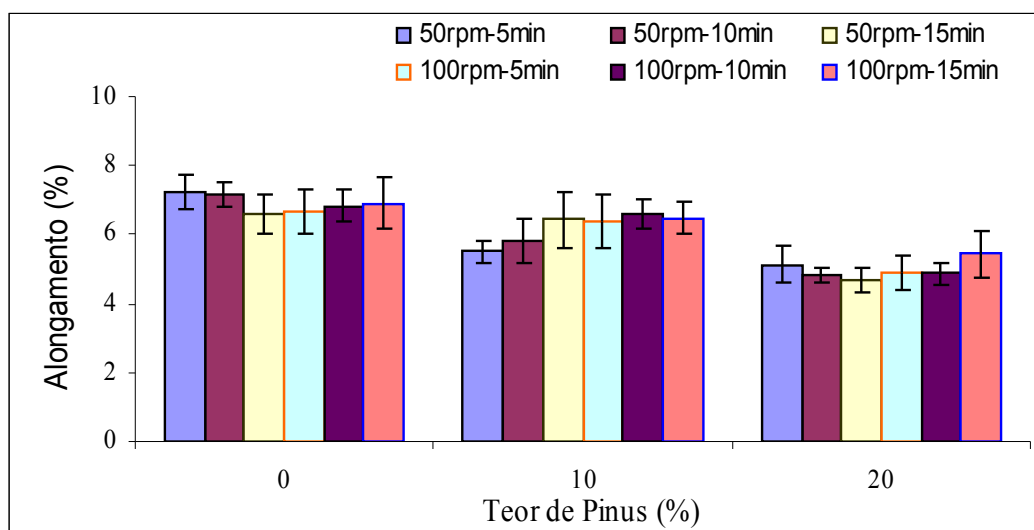


Figura 5.6 - Alongamento do compósito PEAD/madeira Pinus como função das condições de processamento e teor de madeira.

Observa-se uma tendência pequena na redução no alongamento para a matriz processada sob condições mais severas de processamento, podendo estar ocorrendo leve degradação da matriz nestas condições. Estas diminuições, entretanto, não são significativas, podendo-se atribuir ao erro experimental inerentes ao teste. Como esperado, o alongamento na ruptura tendeu a diminuir com o aumento do teor de pó de madeira. Observou-se para o compósito com 10 % de pó de madeira, que o mesmo apresentou aumento no alongamento sob condições de processamento mais elevadas. É possível que tenha havido uma melhor dispersão do pó de madeira na matriz.

A resistência tênsil e módulo de elasticidade do compósito PEAD/pó da madeira *Prosopis juliflora* (algarobeira) obtido de diferentes posições da tora da algarobeira estão ilustrados na Figura 5.7. Todos os resultados referem-se a composição com 10% de pó de madeira e foram processados a 150°C, 50 rpm por 5 minutos.

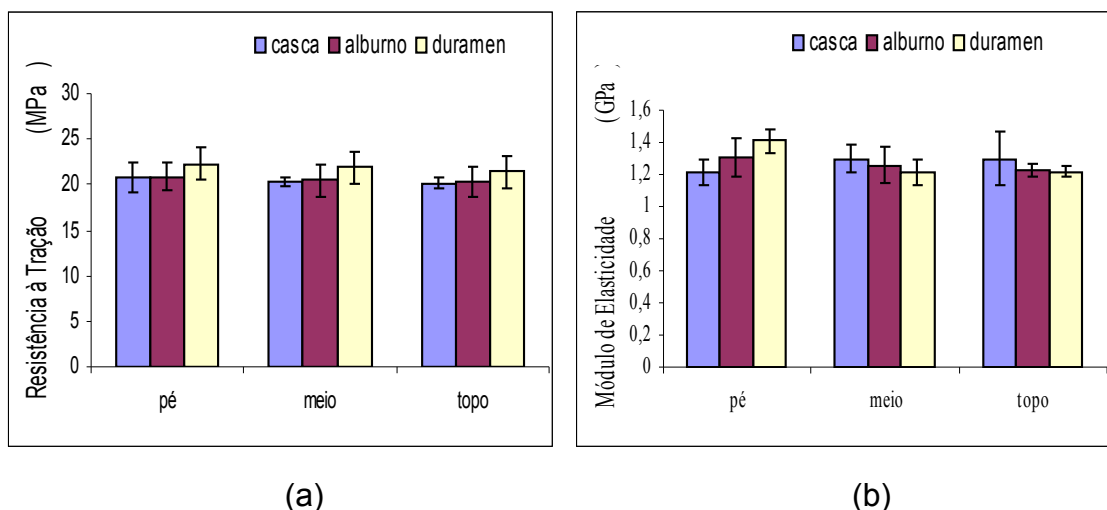


Figura 5.7 – Propriedades dos compósitos PEAD/10%PMAL como função das posições do material obtido na tora, processados a 150°C, 50 rpm e 5 minutos: a) Resistência à tração e b) Módulo de elasticidade.

Observam-se nos dados que há pequenas diferenças nas propriedades com relação à posição longitudinal de onde o pó foi obtido (pé, meio e topo), e das regiões casca, alburno e durâmen. Melhor resistência à tração e melhor módulo foi verificado na região do durâmen do pé da tora. A diferença de propriedades para as demais regiões, entretanto, considerando-se o erro experimental, não foi significativa. Esses dados são indicativos de que todas as partes da árvore podem ser usadas, de modo separado ou misturado, para preparação de compósitos sem causarem redução brusca nas propriedades mecânicas.

A Tabela 5.5 apresenta um estudo comparativo das propriedades mecânicas dos compósitos PEAD/pó de madeira Pinus e PEAD/pó da madeira Prosopis juliflora (algarobeira)



Tabela 5.5 – Propriedades mecânicas do PEAD/PURO e dos compósitos PEAD/Pinus e PEAD/algarobeira, processados numa velocidade de rotor de 50rpm, moldados por injeção.

Compósitos	Teor de pó de madeira (%)	Temperatura (°C)	Tempo de processam. (min)	Resistência Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
PEAD/PURO	0	150	5	22,3 ± 0,5	1,22 ± 0,1
	0	150	10	22,1 ± 0,5	1,26 ± 0,03
	0	200	10	21,5 ± 0,5	1,14 ± 0,14
	0	220	30	21,2 ± 0,1	1,08 ± 0,04
PEAD/Pinus	10	150	5	20,8 ± 0,3	1,45 ± 0,07
	10	150	10	21,1 ± 0,3	1,48 ± 0,11
	10	200	10	21,4 ± 0,1	1,39 ± 0,07
	20	150	5	21,7 ± 0,4	1,64 ± 0,10
	20	150	10	22,6 ± 0,5	1,68 ± 0,20
	20	200	10	22,1 ± 0,5	1,71 ± 0,06
	20	220	30	21,3 ± 0,6	1,41 ± 0,20
	20	220	30	21,3 ± 0,6	1,41 ± 0,20
PEAD/algarobeira	10	150	5	20,9 ± 0,1	1,27 ± 0,05
(Durâmen/Pé)	20	200	10	20,7 ± 0,5	1,49 ± 0,10

Os resultados indicam que a resistência à tração e o módulo de elasticidade do compósito PEAD/algarobeira foram levemente menores do que os do PEAD/Pinus o que não era esperado. Para os processados com 10% de pó 150 °C e 5 minutos essa diferença foi de 0,47% e para os processados com 20% de pó, 200 °C e por 10 minutos essa diferença foi de 6,3%. Esperava-se que o compósito obtido a partir do pó de madeira dura (*Prosopis juliflora* - algarobeira) apresentasse propriedades superiores às do compósito obtido a partir de madeira mole (*Pinus*). Este comportamento é possível que esteja associado às diferenças no tamanho de partículas, ao teor de mistura e a fraca dispersão do pó de madeira na matriz, mas não foi dada evidência experimental. Por outro lado, o Pó de Madeira em si é um compósito em que a celulose é o reforço envolvido pela matriz que é a lignina e na Tabela 5.6 observa-se que as folhosas (Algarobeira) possuem menor percentual de lignina (7% em média) do que as coníferas (*Pinus*).

Tabela 5.6 – Composição Média de Madeiras de Coníferas e Folhosas

Constituinte	Coníferas	Folhosas
Celulose	42 ± 2%	45 ± 2%
Polioses	27 ± 2%	30 ± 5%
Lignina	28 ± 2%	20 ± 4%
Extrativos	5 ± 3%	3 ± 2%

Fonte: Química da Madeira, Klock et al, 2005.

Além do que o formato das células particularmente de traqueóides e fibras, é influenciado não somente por mudanças sazonais, mas também por forças mecânicas.

As árvores reagem às forças que atuam no tronco, (exemplo: por ventos fortes ou crescimento geotrópico) copa e galhos (exemplo: por seu peso próprio) formando madeira de reação nas zonas de compressão ou tensão.

Coníferas desenvolvem lenho de compressão nas partes sujeitas à compressão e folhosas desenvolvem lenho de tensão (ou tração) nas áreas sujeitas à tração.

O lenho de tensão contém menos e menores vasos que no lenho normal, e as fibras são providas com uma camada especial na parede celular, a chamada camada gelatinosa ou camada G. Esta camada G, consiste de lamelas concêntricas de fibrilas de celulose alinhadas na direção do eixo axial da fibra. A celulose é altamente cristalina e o conteúdo de polioses e lignina é bastante baixo.

Na Figura 5.8 observa-se o aspecto dos lenhos de reação em folhosas e coníferas onde se observa a presença de grandes cavidades e maior quantidade de vazios, o que pode se concluir que o pó de madeira do pinus possui maior superfície de contato do que o da algarobeira e consequentemente melhores condições de molhamento da resina. Isso explica também a leve superioridade da resistência dos compósitos produzidos com pó de Pinus (considerada madeira mole) em relação aos produzidos com pó de algarobeira( considerada madeira dura).

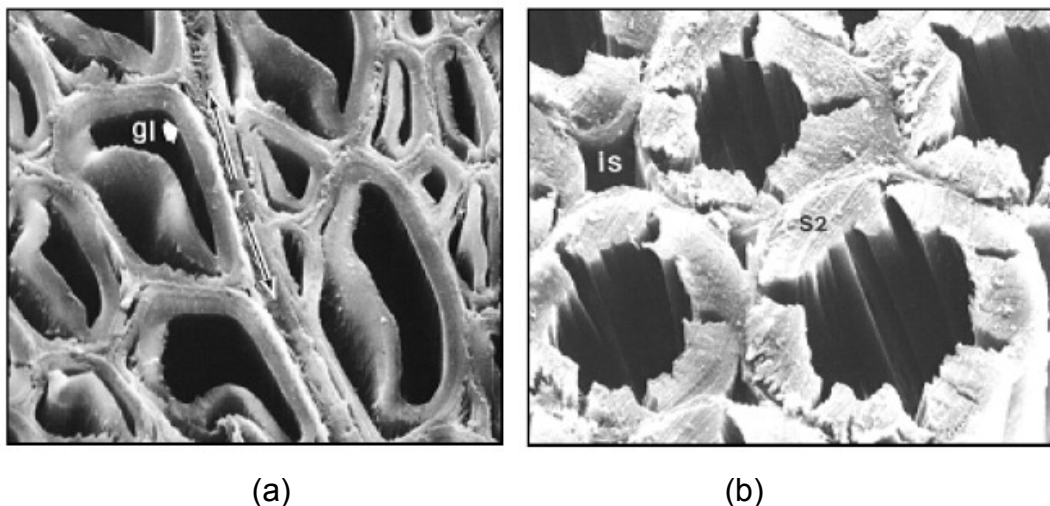


Figura 5.8 – a – Microfotografia eletrônica de lenho de tensão de folhosa (*Populus* sp) observa-se a camada gelatinosa (gl) interna solta, característica do lenho de tensão em folhosas. (Fonte CORE et all, 1979); b - Microfotografia eletrônica de lenho de compressão de conífera (*Pseudotsuga menziesii*), observa-se a ausência da camada S3 e a presença de grandes fendas ou cavidades na camada S2. O aspecto arredondado e os espaços intercelulares (is) que são típicos deste lenho anormal. (Fonte CORE et all, 1979).

Melhor comportamento mecânico foi obtido para o tempo de 10 minutos de processamento para ambos os compósitos, o que pode ser atribuído a melhor dispersão do pó e a uma degradação da matriz não significativa. Os dados obtidos confirmam previamente que condições de processamento mais elevadas (tempo, temperatura e velocidade de rotor) levam a maior degradação da matriz e conseqüentemente do compósito.

### 5.6.2 Moldados por Compressão

Amostras de compósitos PEAD/Pinus foram preparadas no Rheomix operando nas seguintes condições de processamento: a) tempo: 5, 10 e 15 minutos; b) velocidade de rotor: 50 e 100 rpm; c) temperatura: 150°C. Em seguida os compósitos foram moldados por compressão (150 °C, 6 toneladas por 15 minutos). A análise comparativa das propriedades mecânicas dos compósitos moldados por injeção e compressão, está ilustrada na Figura 5.9.

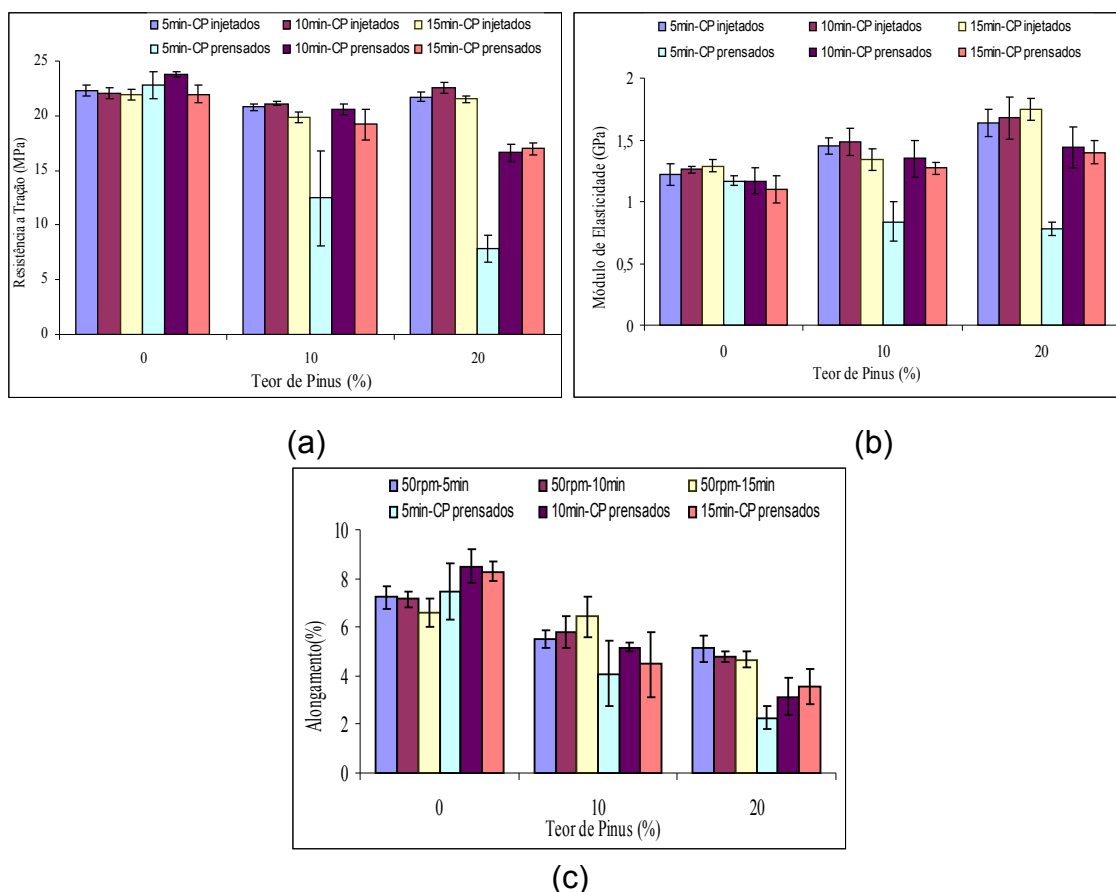
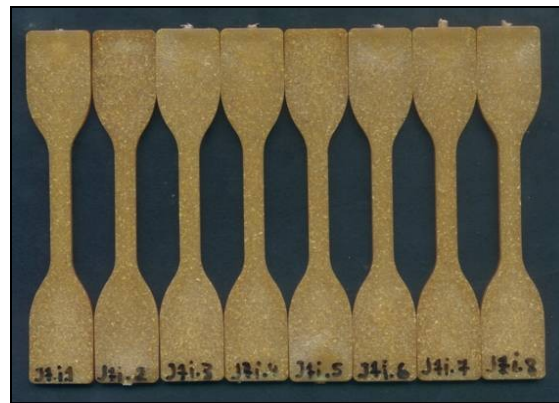


Figura 5.9 - Propriedades do compósito PEAD/pó da madeira Pinus, processados a 50rpm, moldados por injeção e compressão: a) Resistência à tração e b) Módulo de elasticidade e c) Alongamento.

O gráfico da resistência à tração dos compósitos moldados por injeção e compressão, da Figura 5.9 (a), indica que em geral, as propriedades dos corpos de prova prensados foram menores do que a dos injetados. Diferenças e erros experimentais significativos foram observados para o material processados por 5 minutos e moldados por compressão. Atribui-se a esta dispersão de resultados a possível dispersão de cargas, no tempo de mistura, e a uma forma de moldagem menos intensa. A dispersão ocorre também no momento do preenchimento do molde que é feito de forma manual. Esta dispersão somada a moldagem ineficiente ocasiona aprisionamento de ar, formação de bolhas. Na moldagem por injeção a pressão é maior, o material desce forçado pelo cilindro e passa por uma constricção conduzindo a uma melhor compactação, eliminação de defeitos e a moldagem de peças mais homogênea e eficiente, conforme se pode observar na Figura 5.10..



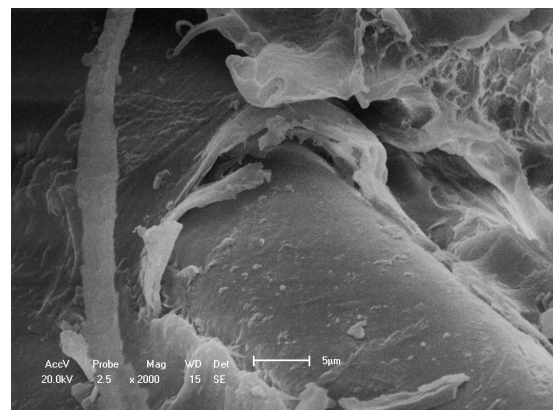
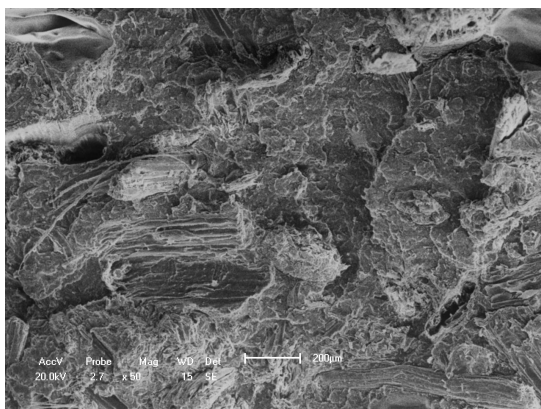
(a)

(b)

Figura 5.10 – Corpos de prova moldados por: (a) compressão; (b) injeção

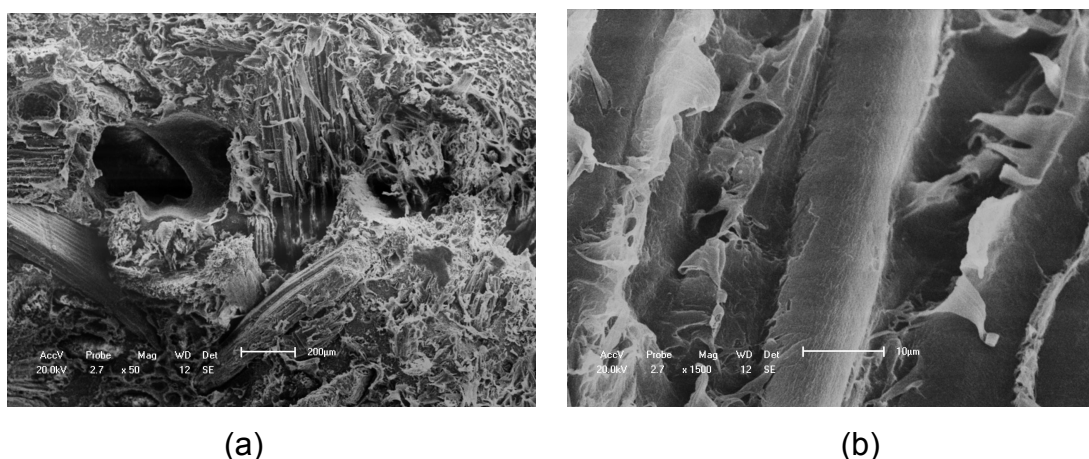
### 5.7 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foi realizada análise micrográfica das superfícies de fratura dos compósitos PEAD/Pinus, os resultados estão ilustrados nas Figuras 5.11 a 5.13.



(a) (b)  
 Figura 5.11 - MEV da região de ruptura por tração de corpo de prova PEAD/Pinus, moldado por compressão, (a) 50x e (b) 2000x

Observa-se na Figura 5.11 (a) e (b), respectivamente com aumento de 50x e 2000x, relativa à MEV da região de fratura por tração do corpo de prova, da composição 80%PEAD/20%PMPinus, processada a 150°C, 50RPM, por 10 minutos e moldados por compressão, que parece ter havido uma boa interação entre o PEAD e o Pó de madeira. Ainda são notadas regiões em que ocorre só presença da matriz (estrias de *crazing*) em razão da falta de homogeneidade na distribuição do reforço ou carga (amplas regiões sem a presença do pó de madeira). Isso pode ser indicativo das menores propriedades observadas.



(a) (b)  
 Figura 5.12 - MEV da região de ruptura por tração de corpo de prova, PEAD/Pinus, moldado por injeção: (a) 50x e (b) 1500x.

Observa-se na Figura 5.12 (a) e (b), respectivamente com aumento de 50X, e 1500x, relativa à MEV da região de fratura, da composição 80%PEAD/20%PMPinus processada a 150°C, 50RPM e por 10 minutos e moldados por injeção parece que as fibras estão mais “machucadas”. Se não foram vistas áreas só de resina (com as estrias) isso implica em melhor distribuição das fibras. A adesão parece ser menor, mas não se pode afirmar com certeza.

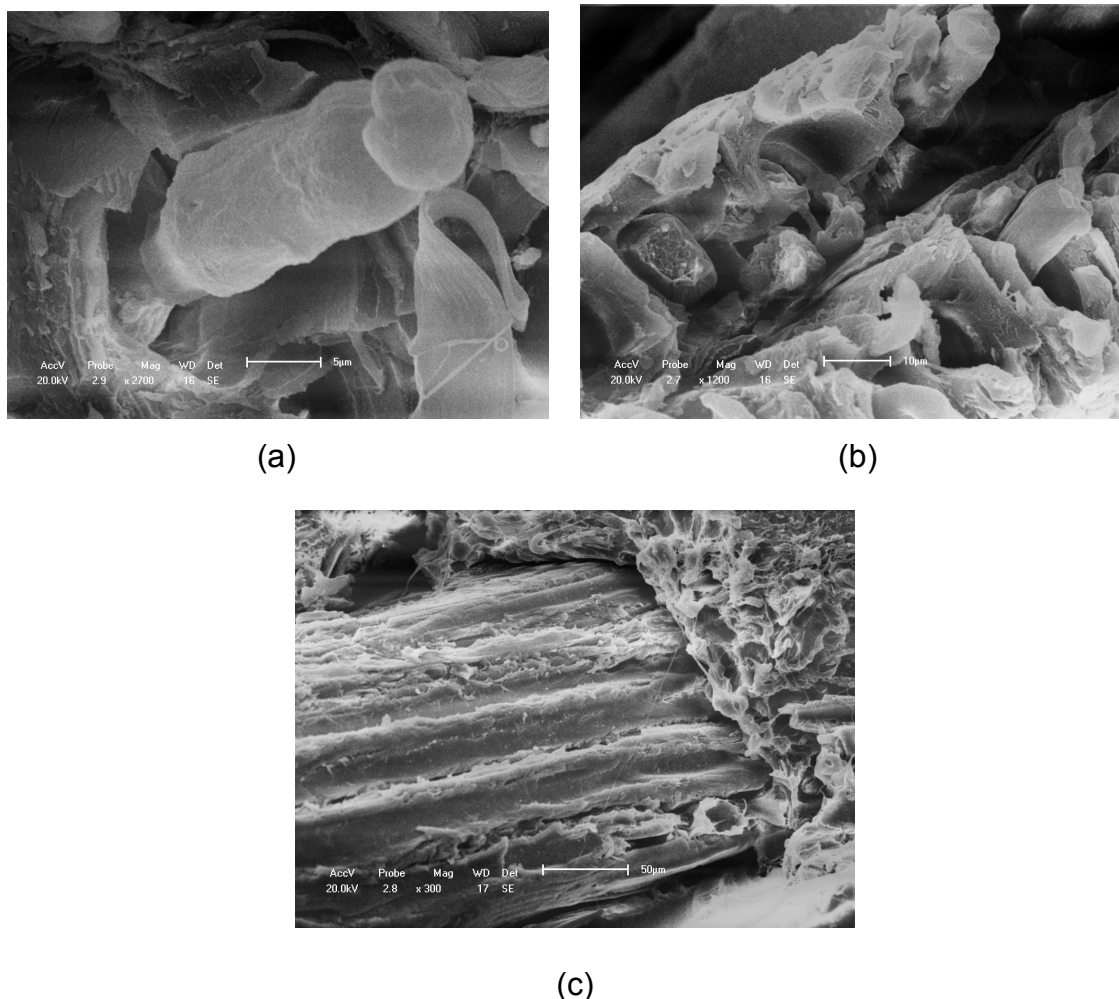


Figura 5.13 - MEV da região de ruptura por tração de corpo de prova, PEAD/PINUS, moldado por injeção (a) 2700x, (b) 1200x e (c) 300x.

Na Figura 5.13 (a), (b) e (c), respectivamente com aumento de 2.700X, 1.200X e de 300X, relativas à MEV da região de fratura, da composição 80%PEAD/20%PMPinus, processada a 220°C, 50RPM e 30 minutos e moldada por injeção, podemos observar em (a) e (b) que o pó de madeira parece estar mais deformado do que o material prensado e que há indicativo de material degradado. A Figura (c) parece indicar algumas marcas de polímero sobre o pó de madeira.

Como podemos observar nada é muito conclusivo. Indicativo de falta de homogeneidade nas composições é a presença de áreas só de resina que ocorre de modo mais acentuado no material prensado e isso explica as menores propriedades mecânicas. E, dependendo, das temperaturas de degradação da matriz (e do controle das temperaturas na injetora) pode estar

havendo um início de degradação do material injetado a 220<sup>o</sup>C, o que também estaria de acordo com os resultados.

### 5.8 - Análise das Curvas de Torque

Para evidenciar se houve degradação ou não do PEAD/PURO e dos compósitos foram analisadas as curvas de torque das amostras sob condições mais severas de processamento.

As curvas de torque obtidas para o PEAD/PURO submetido a uma rotação de 100 rpm nas temperaturas de 150 °C, 200 °C e 220 °C estão apresentadas na Figura 5.14. Como esperado, os valores máximos de torques foram atingidos imediatamente após a adição do material (frio) à câmara de mistura. Em seguida se observam rápidos e acentuados declínios do torque em razão da diminuição de sua viscosidade estabilizando-se (após 7 minutos) em torno de 6,0 Nm, 5,5 Nm e 4,5 Nm para o PEAD/PURO processado a 150 °C, 200 °C e 220 °C, respectivamente. Estes valores praticamente não se alteraram em tempos mais longos (até 30 min) de processamento.

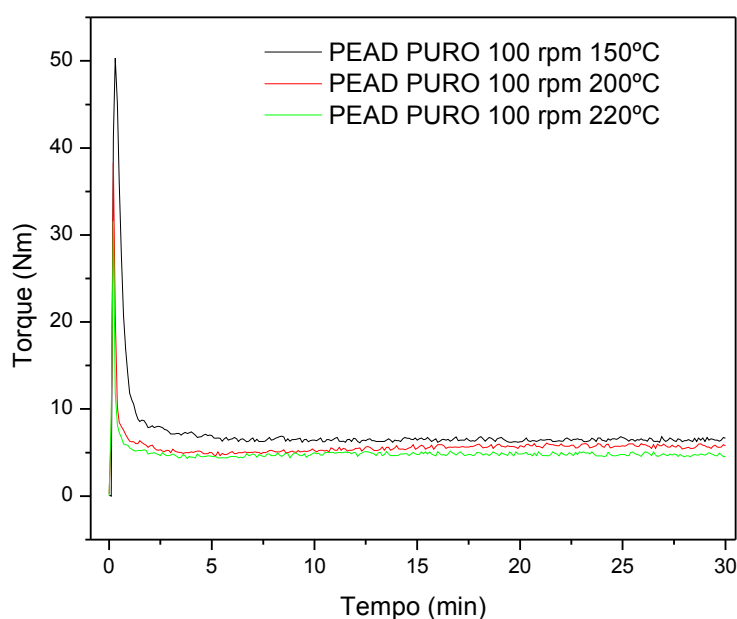




Figura 5.14 – Torques do PEAD/PURO em função do tempo e para diferentes temperaturas de processamento.

Os dados obtidos evidenciam que o aumento da temperatura de processamento diminui a viscosidade e conseqüentemente o valor do torque.

As curvas de torque obtidas para o sistema PEAD/Pinus contendo 20% de pó de pinus, processados a 150°C estão ilustradas na Figura 5.15. Como esperado, um aumento na velocidade dos rotores acarretou um aumento no torque. Novamente, nas condições experimentais adotadas, não houve evidência clara de degradação acentuada em função do tempo de processamento, haja vista que o torque manteve-se praticamente constante (variações inferiores a 5%) durante todo o tempo de processamento adotado.

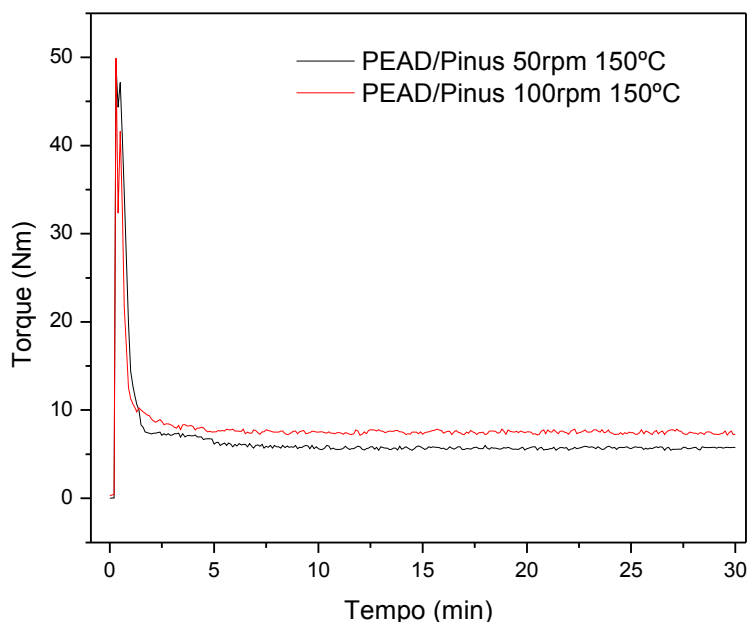


Figura 5.15 – Torques do composto PEAD/Pinus em função do tempo e diferentes velocidades do rotor.

As curvas de torque obtidas para os compostos PEAD/Algarobeira contendo 20% de pó de algaroba estão apresentadas na Figura 5.16. Comportamentos semelhantes, aos discutidos e apresentados anteriormente foram obtidos, ou seja, sob as mesmas condições de velocidade do rotor, há uma diminuição do torque em função do aumento da temperatura e, para uma mesma temperatura, o torque aumenta com a velocidade do rotor.

Os valores máximos, mínimos e médios de torque obtidos para a matriz e compósitos processados sob distintas condições estão sumarizados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Valores correspondentes do torque máximo, mínimo e na estabilização

COMPOSIÇÃO	Torque Max. (Nm)/(tempo)	Torque Mín. (Nm)/(tempo)	Torque na estabilização (Valor aprox.) Nm
PEAD/PURO 100 rpm 150°C	50,32 Nm/0,3min	6,12Nm/12,2min.	6,0 Nm
PEAD/PURO 100 rpm 200°C	38,29 Nm/0,2min	4,66Nm/5,20min	5,5 Nm
PEAD/PURO 100 rpm 220°C	31,55 Nm/0,2min	4,30Nm/3,80 min	4,5 Nm
PEAD/Pinus 50 rpm 150°C	49,26 Nm/0,3min	5,44 Nm/12,9min	5,5 Nm
PEAD/Pinus 100 rpm 150°C	49,90 Nm/0,3min	7,18 Nm/20,5min	7,5 Nm
PEAD/Algarobeira 50 rpm 150°C	50,49 Nm/0,5min	5,58 Nm/16,3min	6,0 Nm
PEAD/Algarobeira100rpm 150°C	45,39 Nm/0,5min	7,27 Nm/28,0min	7,5 Nm
PEAD/Algarobeira 50 rpm 200°C	33,59 Nm/0,4min	3,80 Nm/16,0min	5,0 Nm
PEAD/Algarobeira100rpm 200°C	37,81 Nm/0,4min	4,82 Nm/27,0min	5,5 N m

Fica evidenciado que, para uma dada condição de processamento, o torque necessário para processar os compósitos é sempre maior do que o necessário para processar a matriz, ou seja, a fluidez da matriz é maior do que a de seus compósitos o que evidencia que a incorporação do pó de madeira provoca um aumento da viscosidade do composto, o que era esperado.

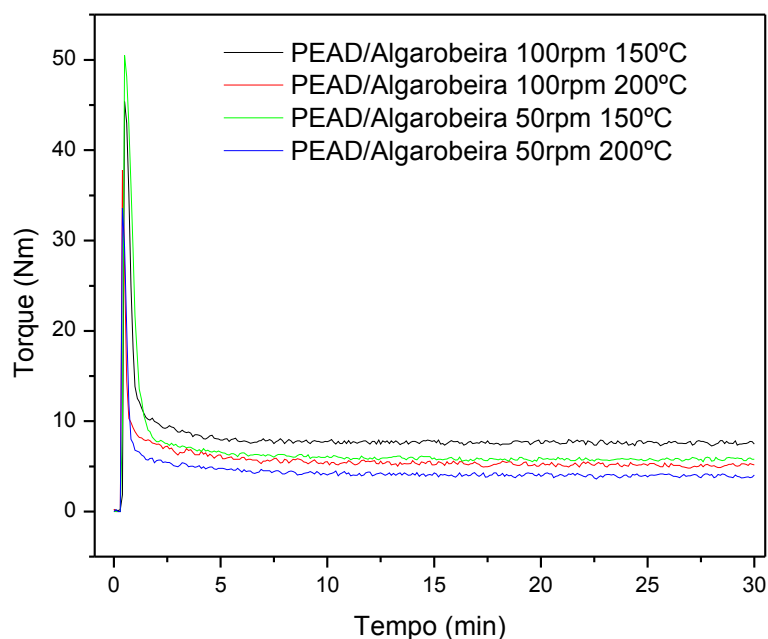
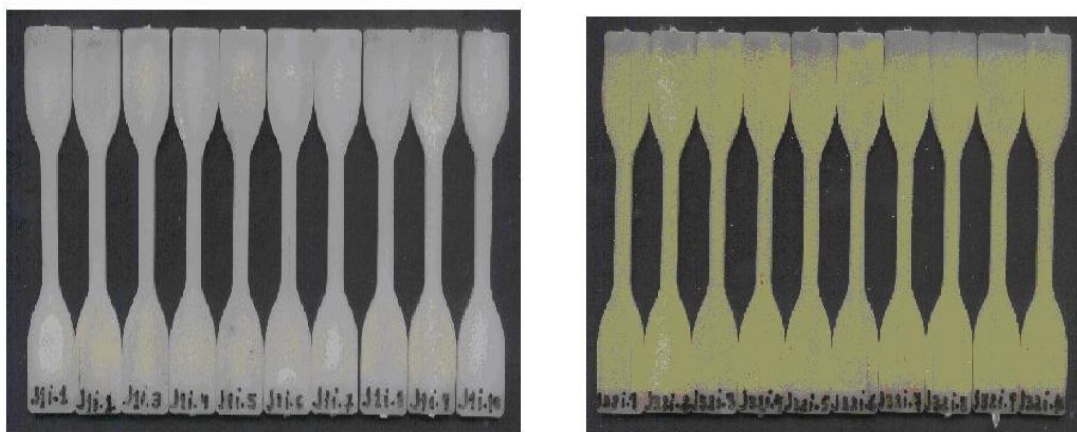


Figura 5.16 - Torques do compósito PEAD/Algarobeira em função tempo com diferentes velocidades do rotor e temperaturas de processamento.

A variação mínima ocorrida no torque em função do tempo de processamento tanto para o PEAD/PURO, o PEAD/Pinus e o PEAD/Algarobeira, significa que a degradação sofrida pelos sistemas em função do tempo de processamento adotado, foi mínima. O aumento na temperatura reduziu a viscosidade do sistema, enquanto um aumento na velocidade dos rotores causou elevação do torque, porém, estes não sofreram alterações significativas com o tempo de processamento, o que não era esperado já que houve alterações perceptíveis na cor das amostras processadas sob condições mais severas, ou seja, em tempos mais longos e temperaturas mais elevadas, conforme evidenciado na Figura 5.17.



(a)

(b)

Figura 5.17 - (a) PEADPURO/150<sup>o</sup>C/5min, (b)PEADPURO/220 <sup>o</sup>C/30min.

A principal limitação para aplicação dos materiais poliméricos em muitas situações é decorrente da baixa sensibilidade dos polímeros orgânicos à altas temperaturas. Acima da temperatura de transição vítrea, o polímero começa apresentar variações dimensionais e se exposto por longos períodos ao calor desencadeia-se lentamente o processo termooxidativo com alterações de cor, perda de massa, ruptura e rearranjo e formação de novas ligações químicas com ou sem interações com oxigênio do ar, resultando na formação de ligações duplas, grupos carbonila e conseqüente alterações nas propriedades físicas do material. A sensibilidade dos polímeros à temperatura depende da estrutura e tipo de ligação química presentes na cadeia polimérica. No caso do PEAD, o principal mecanismo de degradação é por reticulação de cadeia o que, em princípio, deveria levar a um aumento no torque dos sistemas processados sob condições mais severas, o que não foi observado experimentalmente. É possível que, para os tempos e condições de processamento adotados, a degradação não tenha sido suficientemente elevada para gerar alterações significativas de torque. Independente do mecanismo de degradação – se por cisão ou reticulação – a primeira etapa consiste na quebra e rearranjo das ligações químicas e ambos os mecanismos ocorrem simultaneamente. A estrutura do polímero e a estabilidade das espécies formadas é que determina qual deles predomina. Nossos dados indicam que alterações estruturais foram observadas (alterações de cor), mas que estas não foram suficientes para alterar significativamente a viscosidade dos sistemas sendo processados.

### 5.9 - Sorção de Água

A alta resistência à umidade e boas propriedades que resistam ao envelhecimento são melhorias fundamentais requeridas para que os compósitos poliméricos, reforçados com pó de madeira, tenham condições de ampliar mais a faixa de aplicações e competir com maior eficácia com os compósitos de fibras sintéticas. Um dos problemas associados a compósitos poliméricos reforçados com pó de madeira é a presença da água, que

geralmente enfraquece a interação pó de madeira/matriz, afetando as propriedades mecânicas e podendo acelerar o envelhecimento (ROUISSON et al., 2005).

Em razão das propriedades mecânicas dos compósitos não apresentarem variações significativas em relação à matriz, nem entre si, e em função da necessidade de conhecermos a sorção de água na matriz e em compósitos com pó de Pinus e pó de madeira algarobeira, retirado da casca, do alburno e do cerne submetidos a diferentes condições de processamento, escolhemos as seguintes composições: a) PEAD (150°C, 100rpm, 15min); b) 90%PEAD/10%PMPinus (150°C, 50rpm, 15min); c) 90%PEAD/10%PMPinus (150°C, 100rpm, 15min); d) PEAD (220°C, 50rpm, 30min); e) 80%PEAD/20%PMALCPé (200°C, 50rpm, 10min); f) 80%PEAD/20%PMALAPé (200°C, 50rpm, 10min); g) 80%PEAD/20%PMALDPé (200°C, 50rpm, 10min).

Os resultados dos ensaios de sorção com PEAD e compósitos de PEAD/Pinus e PEAD/Algarobeira, se encontram na Figura 5.18, que representam as curvas de sorção de água em função do tempo.

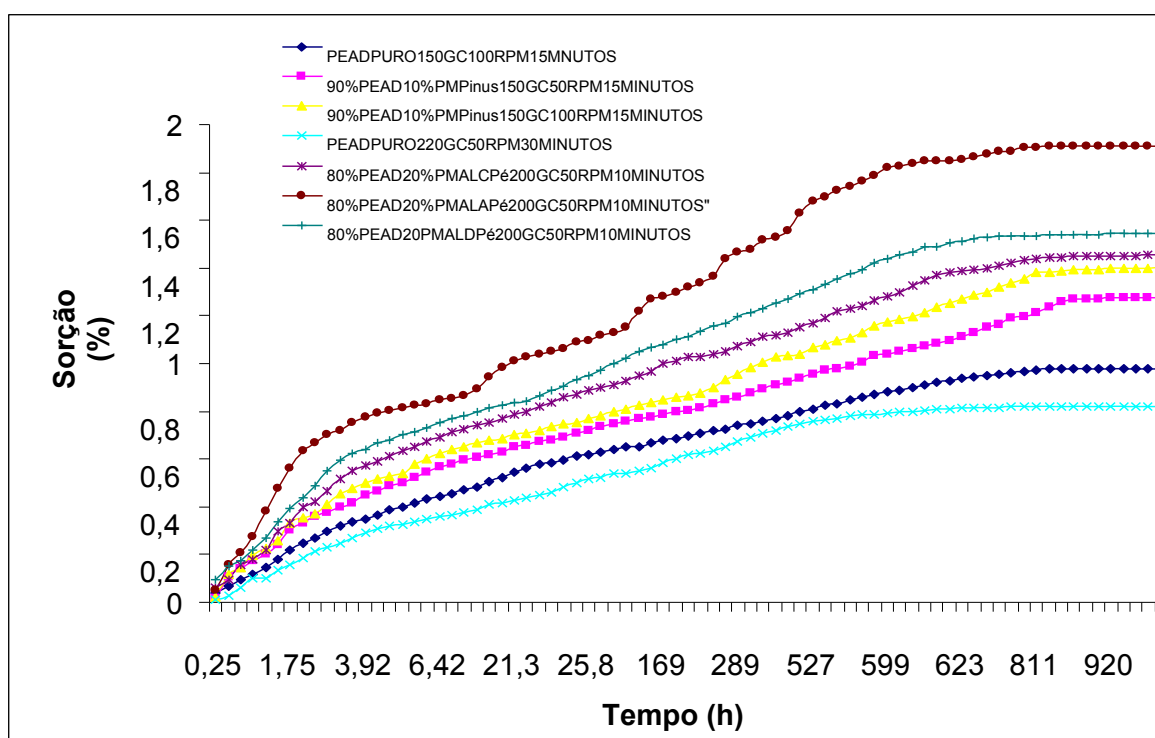


Figura 5.18 – Sorção d'água no PEAD e nos compósitos PEAD/Pinus e PEAD/Algarobeira

Esses resultados evidenciam que a sorção de água é rápida nos estágios iniciais, para o PEAD/PURO e os compósitos, aumentando e tendendo ao equilíbrio em tempos mais longos de exposição (acima de 900 horas). Observa-se que o maior teor de água sorvida ocorreu no compósito contendo o pó de madeira da algarobeira e do alburno. Para o caso específico do compósito com o pó da algarobeira os resultados de sorção de água estão correlacionados com as densidades destes pós de madeira. Os dados indicam que quanto menor a densidade maior a sorção de água. Pressupõe-se que os pós de madeira obtidos de distintas partes do tronco apresentem porosidade e/ou composição química distinta o que se reflete em sua densidade e

capacidade de sorção. Observar-se também que o PEAD/PURO foi o que menos água absorveu isso devido a sua natureza (hidrófobo).

O PEAD submetido a condições mais severas de processamento apresentou menor sorção de água, isso porque o PEAD se degrada por reticulação o que o torna mais insolúvel, mais rígido, e menos susceptível a penetração da umidade.

Na Tabela 5.8 podemos observar os resultados das propriedades mecânicas após a os corpos de prova serem submetidos a 985 horas de absorção.

Tabela 5.8 - Propriedades mecânicas do PEAD/PURO e dos compósitos PEAD/Pinus e

Composição	T (°C)	Rotor (RPM)	Tempo (min)	Resist. Tração (MPa)	Módulo Elastic. (GPa)	Alongamento (%)	Sorção (985hs) (%)	
PEAD	150	100	15	21,08 ± 0,84	1,33 ± 0,26	6,90 ± 0,74		a
PEAD	150	100	15	21,18 ± 0,38	0,51 ± 0,03	16,17 ± 0,3	0,9778	d
PEAD/10%Pinus	150	50	15	19,88 ± 0,48	1,34 ± 0,09	6,42 ± 0,81		a
PEAD/10%Pinus	150	50	15	20,50 ± 0,47	0,68 ± 0,07	13,4 ± 0,68	1,2759	d
PEAD/10%Pinus	150	100	15	21,26 ± 0,50	1,38 ± 0,15	6,47 ± 0,46		a
PEAD/10%Pinus	150	100	15	20,37 ± 0,43	0,69 ± 0,15	11,16 ± 1,21	1,4047	d
PEAD	220	50	30	21,17 ± 0,10	1,08 ± 0,04	7,16 ± 0,27		a
PEAD	220	50	30	21,80 ± 0,19	0,55 ± 0,03	16,2 ± 0,89	0,8219	d
PEAD/20%Algaroba (duramen-Pé)	200	50	10	20,61 ± 0,74	1,35 ± 0,13	6,61 ± 0,43		a
PEAD/20%Algaroba (durâmen -pé)	200	50	10	19,48 ± 0,66	0,56 ± 0,17	12,8 ± 0,49	1,5438	d
PEAD/20%Algaroba (alburno -Pé)	200	50	10	22,27 ± 0,24	1,70 ± 0,07	4,26 ± 0,44		a
PEAD/20%Algaroba (alburno -Pé)	200	50	10	22,28 ± 0,16	0,70 ± 0,11	10,45 ± 0,4	1,9097	d
PEAD/20%Algaroba (casca-pé)	200	50	10	19,11 ± 0,65	1,43 ± 0,15	5,71 ± 0,56		a
PEAD/20%Algaroba (casca-pé)	200	50	10	20,46 ± 0,33	0,8 ± 0,17	10,74 ± 0,52	1,4528	2

PEAD/Algarobeira após 985 horas de imersão em água. a- antes da absorção, d - depois da absorção.

Os resultados da Tabela 5.8 indicam que a resistência a ruptura após absorção de água praticamente não se alterou. O maior alongamento e o menor módulo de elasticidade observada já eram esperados e é atribuída a presença da água que atua como plastificante e também reduz a interação entre fibra e matriz tornando o compósito menos rígido.

### 5.10 - Modelagem da cinética de sorção de água

O coeficiente de difusão caracteriza a habilidade das moléculas de água de se difundirem entre as moléculas dos polímeros e compósitos. Na Figura

5.19 estão apresentados os valores dos coeficientes de difusão obtidos a partir do ajuste ao modelo difusional Fickiano para tempos curtos até 8 horas e para tempos longos até 985 horas.

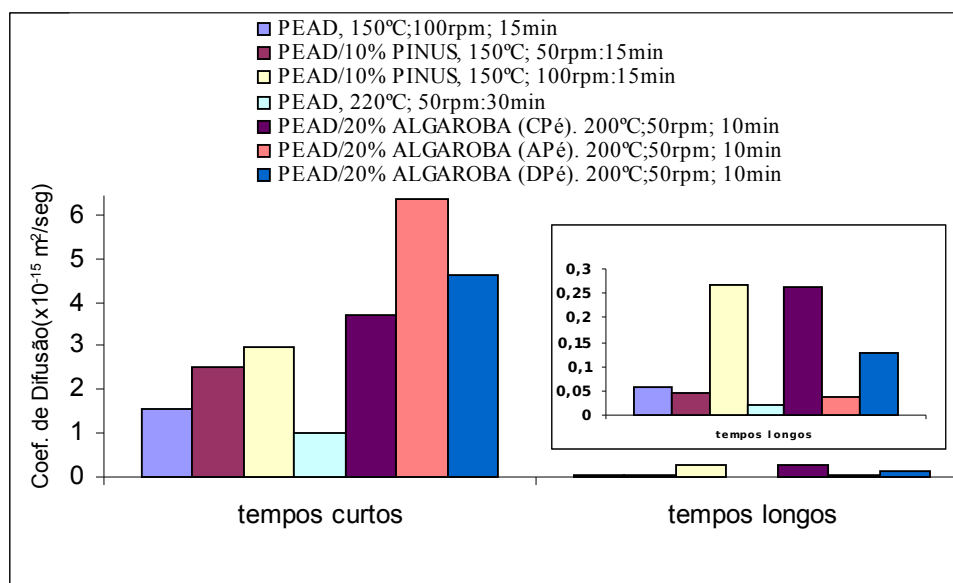


Figura 5.19 – Histograma dos Coeficientes de difusão de água nos sistemas estudados.

Observa-se que para tempos curtos e tempos longos o PEAD submetido às condições mais severas de processamento apresentou menor coeficiente de difusão. A natureza pouco ramificada do PEAD que se degrada por reticulação, torna-o mais insolúvel, mais rígido e menos susceptível a penetração da água.

Em tempos curtos, o coeficiente de difusão do polietileno puro apresenta-se menor do que o coeficiente de difusão quando se incorpora 10% de pó de madeira de Pinus a matriz. Tal comportamento já era esperado e se deve a presença do pó de madeira que induz o aparecimento de uma maior quantidade de vazios em relação ao polímero puro. Daí se explica a maior quantidade de água absorvido pelo PEAD/PMPinus em relação ao PEAD/PURO durante todo o processo de absorção.

Por outro lado o PEAD/PMPinus, submetido a condições mais severas de processamento, passando de 50rpm para 100rpm, apresentou um maior coeficiente de difusão, o que não era esperado, o que pode estar relacionado ao tamanho das partículas, ao teor de mistura, que não permitiu que o pó de



madeira fosse encapsulado pela matriz polimérica e a dispersão do pó de madeira na matriz.

Analisando-se os compósitos produzidos com o pó de algarobeira observa-se uma relação direta entre a densidade do pó e o coeficiente de difusão em tempos curtos. O compósito processado com pó de madeira da casca, que possui maior densidade, apresentou menor coeficiente de difusão, ao contrário do compósito produzido com pó de madeira do alburno que, possuindo menor densidade, apresentou maior coeficiente de difusão. O compósito produzido com o pó de madeira do cerne ou durâmen apresentou um coeficiente de difusão intermediário uma vez que a sua densidade situa-se entre a densidade do pó da casca e do alburno.

Observa-se, em tempos longos, que o coeficiente de difusão do PEAD apresenta um comportamento inverso quando comparado com tempos curtos quando se incorpora 10% de pó de madeira de Pinus a matriz. Isso se justifica porque próximo à fase do equilíbrio, os vazios estão saturados e pó de madeira já se encontra completamente intumescido passando a ser um obstáculo a difusão da água, pois com o intumescimento do pó ocorre um aumento do seu volume reduzindo os espaços vazios. A presença das partículas de madeira dificulta a passagem da água devido a sua natureza hidrofílica, aprisionando as moléculas de água e dificultando a sua difusão no compósito na fase final.

Em tempos longos, próximo ao equilíbrio, o PEAD e os compósitos, o coeficiente de difusão é bastante reduzido devido à saturação dos vazios pela água. Por outro lado os grupos polares existentes na estrutura química do pó de madeira podem atrair e aprisionar as moléculas retardando o coeficiente de difusão. Consequentemente as pontes de hidrogênio tornam um fator limitante na difusão das moléculas de água no pó de madeira. A maior absorção ocorre nos estágios inicial e intermediário do processo de absorção.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

Os ensaios mostraram que é possível o processamento de compósitos partindo do Polietileno de Alta Densidade (PEAD) tendo o pó de madeira como reforço, tanto o pó oriundo da madeira de características mole, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, assim como aquele oriundo da madeira com características dura, como a Algarobeira, *Prosopis juliflora*. Os resultados indicaram que:

- 1 As propriedades mecânicas dos compósitos PEAD/*Pinus* (*Elliottii* e *Taeda*) e PEAD/*Prosopis juliflora* (algarobeira) não foram afetadas significativamente pelas condições de processamento adotadas indicativo de que essas condições de processamento podem ser consideradas adequadas.
- 2 Condições de processamento mais elevadas (tempos longos, altas temperaturas e velocidade do rotor) levaram a uma redução, não significativa, das propriedades mecânicas, para ambos os compósitos, atribuída a uma leve degradação da matriz, degradação essa evidenciada por intermédio da análise das curvas de torque. Melhor resultado foi obtido pelo compósito PEAD/*Pinus* processado a 150°C, 50 rpm, por 10 minutos. As curvas de torque analisadas confirmaram essa mínima degrada
- 3 As propriedades mecânicas dos compósitos PEAD/*Prosopis juliflora* (algarobeira) apresentaram variações da região onde o pó foi obtido, no entanto essas variações foram muito pequenas. Esses dados são indicativos de que todas as partes da árvore podem ser usadas para preparação de compósitos sem causarem redução brusca nas

propriedades mecânicas. Melhor resistência à tração e melhor módulo de elasticidade foi verificado na região do durâmen do pé da tora.

- 4 A resistência à tração e o módulo de elasticidade do compósito PEAD/algarobeira foram, em geral, pouco inferiores que os do compósito PEAD/Pinus. Este comportamento é possível que esteja associado às diferenças no tamanho de partículas e ao teor de mistura ou pode ter ocorrido uma fraca dispersão do pó de madeira na matriz. Mas a presença de maior teor de lignina (em torno de 7%) nas coníferas (Pinus) do que nas folhosas (Algarobeira) pode ser indicativo desse melhor comportamento das coníferas.
- 5 Os compósitos moldados por compressão apresentaram alguns diferenças significativas e propriedades inferiores aos obtidos por injeção devido à presença de defeitos e peças não homogêneas em razão da pouca dispersão, má compactação e moldagem ineficiente.
- 6 A sorção de umidade, pelas paredes celulósicas das fibras provoca consideráveis variações nas propriedades do material. Mas dentro das condições de processamento e do teor de pó de madeira utilizado a resistência à ruptura após absorção de água praticamente não se alterou. A sorção de água foi rápida nos estágios iniciais, tendendo ao equilíbrio em tempos mais longos de exposição (acima de 900 horas) devido à saturação progressiva dos vazios existentes na matriz, entre a matriz e o pó de madeira, e no pó de madeira.
- 7 A modelagem cinética de sorção de água indicou coeficiente de difusão diferenciado para tempos curtos e tempos longos, ou seja, para tempos curtos, independente das amostras, o coeficiente de difusão foi superior ao coeficiente de difusão para tempos longos, este comportamento foi atribuído ao fato de que na fase final as amostras tendem a saturação.
- 8 Para os compósitos PEAD/Algarobeira, verificou-se uma relação inversa entre o coeficiente de difusão, em ambos os tempos (curtos e longos),

com a densidade do pó, ou seja, o pó da casca que apresentou maior densidade teve um coeficiente de difusão menor, se comparado com o pó do alburno e do cerne. Pode-se atribuir este comportamento a indução de uma maior ou menor porosidade provocada pela densidade do pó.

- 9 Os resultados da baixa absorção de água para os compósitos PEAD/Pó de madeira são promissores se comparados com a madeira convencional. A vantagem da impermeabilidade permite que estes possa ser utilizados como Madeira Plástica na Construção Civil e em particular para o caso de peças que ficam submetidas as condições ambiente.

De modo geral, é importante observar que as fibras lignocelulósicas avaliadas neste estudo, não podem ser consideradas “fibras” no sentido estrito da palavra, uma vez que seu fator de forma é desfavorável, ou seja, o comprimento das partículas de madeira é curto e estão distribuídas aleatoriamente, para que permita a observação do efeito significativo do reforço da matriz. Os resultados mostram que as fibras atuaram na verdade como carga inerte e que poderá promover uma economia de material polimérico utilizado na confecção de compósitos.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Processar compósitos com pós de madeiras comercializadas e polímeros reciclados;
- Avaliar de maneira mais ampla a influência do pó com diferentes granulometrias nas características físicas e mecânicas dos compósitos;
- Utilizar outros tipos de pó de madeira comercializados e madeiras da caatinga do sertão paraibano e de outros estados brasileiro;
- Correlacionar os modelos experimentais obtidos com outros modelos teóricos;
- Investigar processos de melhoria da interação pó de madeira matriz polimérica com a adição de agentes compatibilizantes;
- Avaliar a influência da secagem do pó de madeira na resistência mecânica dos compósitos;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 – Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

Agnelli, J. A. M., Curso aperfeiçoamento em tecnologia de polímeros. Módulo I. Introdução a matérias polimérico. São Carlos: Núcleo de Reologia e Processamento de Polímeros, 2000.

Alter, H., Particle size and mechanical properties of polymers Journal of Applied polymer Science, v. 9, p. 1525-1531, 1995.

Alves, M. V. S., Novas tecnologias para utilização e aproveitamento de resíduos. In: 1º Congresso Brasileiro de Industrialização da Madeira e Produtos de Base Florestal-, Curitiba. IBAMA, p. 10, 2003.

Arruda, D. T. de Viabilidade técnico-econômica da produção de etanol e subproduto (ração) a partir da algaroba no semi-árido da Paraíba. Dissertação UFPB, 1994.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Projeto de estruturas de Madeira. NBR 7190, Rio de Janeiro, 1997.

Ballarin, A., W., Palma, H. A. L., Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. Rev. Árvore, vol.27 no.3 Viçosa May/ June 2003.

Billmeyer Jr, F. W. Textbook of polymer science, 2. Ed. Canada, John Wiley & Sons, 1984.

BIMICI- Estudo setorial 2003. Produtos da madeira sólida. Curitiba. Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente, 2003, disponível em [www.abimci.com.br](http://www.abimci.com.br) , acesso em julho de 2007.

Brady, D. - “ Polyethylene - A Roller Coaster Business” - .- Phillips Chemical Co Petrochemical Conference, 1996.

Braga, R. Plantas do Nordeste, especialmente do Ceará, 4ª Edição Natal-RN, 1976.

Bristsh plastics & rubber. Growth in consumption of extruded wood-plastic composites. London: MCM Publishing Ltd., p.26, 2001.

Calil, C. Jr. O potencial do uso da madeira de Pinus na construção civil. Revista da Madeira. ano 9, Curitiba, n. 52. p. 60 - 64, out. 2000.

Cavalcanti, W. S., Compósitos polyester/tecidos tramados vegetal-vidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água. Tese de Doutorado, UFCG, 2006.

Chielle, J. L., Compensados de Bambu. Revista da Madeira – Painéis: Edição Especial, p. 42, Ed. Remade. Curitiba. 2003.

Chiou, B.S.; Glenn, G.M.; Imam, S.H.; Inglesby, M.K.; Wood, D.F.; Orts, W.J - Natural Fibers, Biopolymers, and Their Biocomposites, p. 639, 2006.

Clemons, C. Wood-plastic composites in the United States. Forest Products Journal, v.52, n.6, p.10, 2002.

Colom, X.; Caarrasco, F.; Pagès, P.; Cañavate, J. Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites. Composites Science and Technology, v.63, p.161, 2003.

Correa, C. A., Fonseca, C. N. P., Neves, S., Razzino, C. A., Haje Jr., E. H., Compositos Termoplásticos com Madeira. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 3, p. 154-165, 2003.

Cruz, C. V. M. S., Emprego do delineamento de experimentos para o desenvolvimento de compósito de polipropileno/fibras de sisal. Dissertação. UFSCar, 2002.

Dardene, D.S. Woodtruder System for Extrusion of Wood Fiber. Polymer Composites. Dave Murdoch. Davis Standart Corporation, 2003.

Durback, I., Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology, John Wiley & Sons, 4ª. Ed. v. 25, p. 627, 1998.

English, Brent et al. Waste-Wood-Derived Fillers for Plastics. Forest Products Laboratory. USA. 1996. Disponível no site: [http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/Properties\\_products.htm](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/Properties_products.htm). Acessado em 10 de julho de 2007.

Gomes, R.P. Forragens fartas na seca. 2ª ed. Nobel. São Paulo, 236p, 1973.

Gonçalves, M. T. T., Caracterização de resíduos e otimização de processos produtivos em indústrias madeireiras Disponível em [www.unesp.br/propp/dir\\_proj/industria/industria.htm](http://www.unesp.br/propp/dir_proj/industria/industria.htm) Acesso m 10.07.2007.

Gonçalves, M., T., T. , Ruffino, R., T., Aproveitamento do Resíduo Gerado na Indústria Madeireira. III EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Anais. USP – EESC. São Carlos, p. 129 à 140, 1989.

Gupta, B. S., Reiniati, I., Laborie, M. G., Surface properties and adhesion of wood fiber reinforced thermoplastic composites, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 302, p. 388–395, 2007.



Haje Jr., E., Compósitos e blendas poliméricas. Campinas, Instituto Latino americano e IBM, 1989.

Hillig, E., Freire, E., Carvalho, G. A., Schneider, V. E., Poci, K., Modelagem de misturas na fabricação de compósitos polímero-fibra, utilizando polietileno e serragem de *pinus* sp., Ciência Florestal, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 343-351 343, 2006.

Hull, D., Clyne, T. W., An introduction to composite material, solid state science series, Cambridge, 1996.

Joseph, K., Varghese, S.; Kakaprasad, G.; Thomas, S, S.; Prasannakumar, L.; Koshy, P.; Pavithran, C. Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fibre reinforced polymer composites. European Polymer Journal, v.32, n.10, p.1243-50, 1996.

Joseph, P. V.; Rabello, M. S.; Mattoso, L. H. C.; Joseph, K.; Thomas, S. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. Composites Science and Technology, v.62, p.1357-72, 2002.

Klock, U. Muniz, G.I.B.,Hernandez, J. A., Andrade, A. S., Manual Didático-Setor de Ciências Agrárias UFPR, 2005.

Koenig, K. M.; Sypkens, C. W. Wood-plastic composites for market share. Wood and Wood Products, v.107, n.5, p.49, 2002.

Loetz, C. Vai faltar *Pinus*. <http://an.uol.com.br/2003/abr/19/0looe.htm>.  
Consultado em 10/07/2007.

Maine, F. W., Shepherd, P. D, Mica reinforced plastics: A review Composites, p. 193-200, 1974.

Manson, J. A., Interfacial effects in composites. Pure and Applied Chemistry, v. 57, p. 1667-1678, 1985.

Marcovich, N. E.; Reboredo, M.M; Aranguren, M. I. moisture diffusion in polyester-woodflour composites, Polymer, v.40, p. 7313-7320, 1999.

Martins, P. L., Baracuhy, J. G. V., Trovão, D. M. B. M., Costa, G. M., Cavalcanti, M. L. F., Almeida, M. V. A., As essências florestais utilizadas nas fogueiras de São João na cidade de Campina Grande- PB. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 4, n. 1, 2004.

Mattoso, L. H. C. Conferência internacional de compósitos reforçados com fibras vegetais. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.IX, n.2, p.16, 1999.

Matuama, L. M., Kamdem, D. P., Zhang, J. Photoaging and stabilization of rigid PVC/Wood fiber composites. Journal of Applied Polymer Science, v.80, p. 1943-1950, 2001.

Matuama, L. M., Mengelöglu, F., Manufacture of rigid PVC/Wood-flour composite foams using moisture contained in wood as foaming agent Journal of vinyl and additive technology, v.8, n4, p.264-270, 2002.

Milagres, E. G., Vital, B. R., Della Lúcia, M. R., Pimenta, A. S., Compósitos de partículas de madeira de *eucalyptus grandis*, polipropileno e polietileno de alta e baixa densidades. Revista. Árvore, Viçosa-MG, v.30, n.3, p.463-470, 2006.

Miller, R. B., Structure of wood. Forest Products Laboratory, p. 2, 1999.

Nahuz, M. A. R., Atividades industriais com madeira de Pinus. Atualidades de desafios. REMADE, p.10, 2004.

Neves, C. J. A. Resistência Química de PE's a Vários Reagentes Químicos" – Boletim Técnico nº13 – OPP Petroquímica S.A. 1999.

Pauleski, D. T., Haselein, C. R., Santini, E. J., Rizzatti, E., Características de compósitos laminados manufaturados com polietileno de alta densidade (pead) e diferentes proporções de casca de arroz e partículas de madeira. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 17, n. 2, p. 157, 2007.

Pegado, C. M. A., Andrade, L. A., Félix, L. P., Pereira, I. M., Efeitos da invasão biológica de algaroba - *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. sobre a composição e a estrutura do estrato arbustivo-arbóreo da caatinga no Município de Monteiro, PB, Brasil. *Acta bot. bras.* 20(4): 887-898. 2006.

Pinto, M. R. O., Desenvolvimento de compósitos a base de poliuretano derivado do óleo de mamona, sisal e bentonita. Tese de Doutorado, UFCG, 2004.

Polialden Petroquímica S/A, Boletim Técnico 6. São Paulo, 1998.

Quirino, W., F., Utilização Energética de Resíduos Vegetais. Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA.. Disponível no site: [www.funtec.org.br/arquivos/aproveitamento.pdf](http://www.funtec.org.br/arquivos/aproveitamento.pdf). Acessado em julho de 2007.

Razera, D. L., - Estudo sobre as interações entre as variáveis do processo de produção de painéis aglomerados e produtos moldados de madeira. Tese de doutorado. UFPR, 2006.

REFERÊNCIA, Revista do Setor Madeireiro. Resíduo de Madeira parte 2. A sobra que vale ouro. Curitiba, Ed. Jota Comunicação, 2003.

Reto, M.A.S. Cobrança de tributos sobre o plástico reciclado e coleta seletiva incipiente freiam pleno desenvolvimento da atividade. *Revista Plástico Moderno*, p.22, 2000.

Rodolfo Jr., A., Estudo da processabilidade e das propriedades de PVC reforçado com resíduos de pinus. Dissertação. USP. 2005.

ROUISON D.; COUTURIER, M.; SAIN. M.MACMILLAN, B.;BALCON, B.J.WATER absorption of hemp fiber/unsaturated polyester composites. *Polymer Composites*, p.510-524, 2005.

Saheb, D. N.; JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: a review. *Advances in Polymer Technology*, v.18, n.4, p.351-63, 1999.

Schut, J. H. For compounding, sheet & profile, wood is good. *Plastics Technology*, v.45, n.3, p.46, 1999.

Selke, S. E., Wichman, I., Wood fiber/polyolefin composites. *Composites: Part A* 35 321, 2004.

Silva, C. G. Desenvolvimento de um sistema micro-industrial para obtenção de aguardente bidestilada de algaroba (*Prosopis Juliflora* (Sw.) DC ). Dissertação, UFCG, 2002.

Simpson, W., Tenwold, A., Physical properties and moisture relations of wood. In: Forest products laboratory. Wood handbook, wood as an engineering material p. 3, 1999.

Sombatsompop, N., Chaocancaikul, C., Effects of acrylic-based processing aids on processability rheology, thermal and structural stability and mechanical properties of PVC/wood-sawdust composites. *Journal of Applied Polymer Science*, v.92, p.782-790, 2004.

Stark, N. M. Wood fiber derived from scrap pallets used in polypropylene composites. *Forest Products Journal*, v.49, n.6, p.39-46, 1999.

Stark, N. M.; Rowlands, R. E. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science*, v.35, n.2, p.167-74, 2003.

Teixeira, M. G., Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: O exemplo do resíduo de madeira. Dissertação, UFBA, 2005.

Theocaris, P. S., The unfolding model for the representation of the mesophase layer in composites. *Journal of applied polymer science*, v. 30, p 621-645, 1985.

Vianna, W. L., Correa, C. A., Efeitos do tipo de poliestireno de alto impacto nas propriedades de compósitos termoplásticos com farinha de resíduo de madeira. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 14, n° 5, p. 339-348, 2004.

Wambua, P.; Ivens, J.; Verpoest, I. - Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63, p.1259 2003.

Wasilkoski, C. M., Caracterização do polietileno de baixa densidade através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com a análise por impedância dielétrica. Dissertação UFPR, 2002.

YAMAJI, F. M. "Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira".. 2004. 150 f. Tese (Doutor em Ciências Florestais) - UFPR, Curitiba, 2004.

Yamaji, F. M., Bonduelle, A., Utilização da serragem na produção de compósitos plástico-madeira. *REVISTA FLORESTA* 34 (1), p. 59-66, Curitiba-Pr, 2004.

Youngquist, J. A. The marriage of wood and nonwood materials. *Forest Products Journal*, v.45, n.10, p.25, 1995.

Youngquist, J. A., Mechanical and physical properties of air formed wood-fiber/polymer-fiber composites. *Forest Products Journal*, v. 42, n. 6, p. 42-48, 1992.

**ANEXOS**

## Anexo A - Determinação dos Percentuais e separação do Cerne ou durâmen, Alburno ou branco e Casca da Algarobeira.

A importância da determinação dos percentuais de cerne ou durâmen, alburno ou branco e casca, reside no fato de que, através destas determinações podem-se conhecer as potencialidades de aproveitamento das partes do tronco. Para isso, realizou-se, antes da colocação das toras no processo de serragem e aplainamento, determinação das porções dos componentes nas seções transversais das toras. Além dos diâmetros das toras foram feitas também medições das espessuras da casca do alburno ou branco e do diâmetro do cerne ou durâmen.

De cada uma das sub-toras foi separada a casca, o alburno ou branco e o cerne ou durâmen. A casca e o alburno foram retirados manualmente com a auxílio de um formão, material cortante, tendo-se o cuidado de delimitar essas camadas para não possibilitar a mistura de uma porção com outra (Figura A1). Retiradas, da forma como o foram, essas porções ficaram sob a forma de fragmentos graúdos.

A parte central da madeira, correspondente ao cerne ou durâmen, que ficou no formato de tora, foi transformada em cavaco, utilizando-se máquina desempenadeira do tipo INVICTA, fabricada pela Indústria Invita S/A, movida a motor Modelo ARNO, ASSÍNCRONO, TRIFÁSICO, com 5 CV, 60 HZ, 3.420 RPM, 25 AMP, 380 WATT. A parte mais central do cerne ou durâmen, ficou como sobra devido à impossibilidade de toda a sua transformação em cavaco.



Figura A1 – Toras descascadas podendo-se observar o quantitativo de alburno ou branco e cerne ou durâmen da madeira.

Anexo B - Cubagem das toras – Estimativa do volume total da madeira bruta (não trabalhada) para transformação em pó.

Após a seleção da árvore, sua identificação botânica, a derrubada, seu desdobramento em toras e o transporte para o LAETEMA da UFPE, localizada na cidade Universitária na cidade do Recife, foi feita a estimativa da cubagem das toras.

O processo de cubagem consistiu na medição direta dos comprimentos e dos diâmetros das sub-toras, Pé1 e Pé2, Meio1 e Meio2, Topo1 e Topo2. Em seguida foi determinado o valor médio do diâmetro dessas sub-toras e o comprimento de cada uma. Uma trena milimétrica e um paquímetro digital Mitutoyo Modelo CD- 8”B com precisão do 0,01, foram utilizados nessas medições”.

Para se estimar o comprimento médio de cada tora foram feitas 3 medições ao longo destas. O diâmetro médio foi estimado por intermédio de 05 medições dos diâmetros em cada face transversal de todas as 6 (seis) sub-toras, procurando-se medir inicialmente o maior e o menor diâmetro e posteriormente três (03) outros diâmetros, escolhidos de modo aleatório. Para se estimar o volume das toras e da árvore, aplicaram-se formulações matemáticas que permitem encontrar o volume em função do diâmetro e do comprimento. As Tabelas B1e B2 mostram as medições dos diâmetros médios e do comprimento, respectivamente, que foram realizadas.





Tabela B1 - Estimativa dos diâmetros médios das sub-toras, das toras e da árvore da Algarobeira – *Prosopis juliflora*

Sub-toras	Pé <sub>1</sub> ScA	Pé <sub>1</sub> ScB	Pé <sub>2</sub> ScA	Pé <sub>2</sub> ScB	Me <sub>1</sub> ScA	Me <sub>1</sub> ScB	Me <sub>2</sub> ScA	Me <sub>2</sub> ScB	To <sub>1</sub> ScA	To <sub>1</sub> ScB	To <sub>2</sub> ScA	To <sub>2</sub> ScB
Diâmetro(cm)	41,70	40,74	39,42	30,16	28,8	26,0	25,78	23,9	23,68	20,8	21,16	20,97
Sub-toras	Pe <sub>1</sub>		Pe <sub>2</sub>		Me <sub>1</sub>		Me <sub>2</sub>		To <sub>1</sub>		To <sub>2</sub>	
Diâmetro(cm)	41,22		34,79		27,40		24,84		22,24		21,06	
Toras	Pé				Meio				Topo			
Diâmetro médio (cm).	38,00				26,12				21,65			
Diâmetro médio da árvore (cm)	28,59cm											

ScA – secção A

ScB – secção B

Tabela B2 - Estimativa dos comprimentos das sub-toras, das toras e da árvore da Algarobeira – *Prosopis juliflora*.

Sub-toras	Pé1 (cm)	Pé2 (cm)	Meio1 (cm)	Meio2 (cm)	Topo1 (cm)	Topo2 (cm)
Comprimento das sub-toras (cm)	52,00	78,00	58,00	59,50	57,00	55,00
Toras (cm)	Pé		Meio		Topo	
Comprimento das toras (cm)	130		117,5		112	
Comprimento da árvore (cm)	359,5					
Volume da árvore (m <sup>3</sup> )	0,23067					



Anexo C - Determinação dos percentuais de casca, albarno ou branco cerne ou durâmen da tora da Algarobeira - *Prosopis juliflora*.

Tabela C1 – Estimativa dos percentuais de cerne ou durâmen, albarno ou branco e casca da tora da algarobeira – *Prosopis juliflora*

Tora	Diâmetro da Tora	Espessura da Casca	Espessura do Albarno	Diâmetro do Durâmen
Pé 1 (Secção A)	41,70	3,06	3,84	34,80
Pé 1 (Secção B)	40,74	2,68	3,46	34,60
Pé 2 (Secção A)	39,42	2,90	3,22	33,30
Pé 2 (Secção B)	30,16	2,22	2,72	25,22
Meio 1 (Secção A)	28,80	2,62	4,56	21,62
Meio 1 (Secção B)	26,00	1,44	4,36	20,20
Meio 2 (Secção A)	25,78	1,26	4,36	20,16
Meio 2 (Secção B)	23,90	1,08	3,88	18,94
Topo 1 (Secção A)	23,68	2,92	3,56	17,20
Topo 1 (Secção B)	20,80	2,30	3,10	15,40
Topo 2 (Secção A)	21,16	1,72	2,08	17,36
Topo 2 (Secção B)	20,97	1,26	3,30	16,36
Diâmetro médio da tora/Pé	38,00			
Diâmetro médio da tora/Meio	26,12			
Diâmetro médio da tora/Topo	21,65			
Espessura média da casca/Pé		2,71		
Espessura média da casca/Meio		1,60		
Espessura média da casca/Topo		2,05		
Espessura média do albarno/Pé			3,31	
Espessura média do albarno/Meio			4,29	
Espessura média do albarno/Topo			3,01	
Diâmetro médio do durâmen/Pé				31,98
Diâmetro médio do durâmen/Meio				20,23
Diâmetro médio do durâmen/Topo				16,58
Valor médio do diâmetro da tora	28,59			
Valor médio da espessura da casca		2,12		
Valor médio da espessura do albarno			3,54	
Valor médio do diâmetro do durâmen				22,93
Comprimento da tora	359,5	359,5	359,5	359,5
Volume da Tora	0,23067m <sup>3</sup>			
Volume da Casca		0,0330m <sup>3</sup>		
Volume do Albarno			0,0536 m <sup>3</sup>	
Volume do Durâmen				0,1484m <sup>3</sup>
Percentagem (%)	100%	14,31%	23,24%	64,33%

Os percentuais encontrados evidenciam que a Algarobeira coletada possui um valor elevado (64,16%) de cerne ou durâmen, que corresponde à parte mais nobre da madeira, de maior resistência mecânica e resistência ao

ataque de microorganismos, sendo um fator positivo a ser levado em consideração quando de sua utilização como material de construção e como reforço/carga, em materiais compósitos.

### Perdas no processo de transformação da algarobeira – *Prosopis juliflora*

Depois do desmembramento das toras, com a separação da casca, do albarno ou branco e do cerne ou durâmen e sobras (miolos), estas porções foram pesadas. Antes do desmembramento, o peso total das toras foi de 210 kg. Quando separados, o durâmen apresentou-se com 107 kg, o albarno ou branco com 34,93 kg, a casca com 7,50 kg e as sobras (miolos) com 4,975 kg, representando cada, antes do processamento na forrageira, os percentuais de 50,95%, 16,63%, 3,57% e 2,37%, respectivamente, cujos resultados estão na Tabela C2.

Tabela C2 – Peso das toras, do cerne ou durâmen, do albarno ou branco, da casca e das sobras (miolos) Algarobeira – *Prosopis juliflora*

Toras	Peso das Toras (kg)	Peso Casca (kg)	Peso do Albarno (kg)	Peso do durâmen (kg)	Peso das sobras (kg)
Pé-1	55,00	1,80	6,20	25,20	0,362
Pé-2	45,00	1,90	9,00	30,20	1,585
Meio1	32,00	1,30	5,53	14,00	0,649
Meio2	29,00	1,10	5,40	14,80	1,464
Topo1	28,00	1,00	5,00	13,80	0,568
Topo2	21,00	0,40	3,80	9,00	0,347
TOTAL	210,00	7,50	34,93	107,00	4,975
Percentuais	100%	3,57%	16,63%	50,95%	2,37%
Perda total em kg [210 – (7,5 + 34,93 + 107,00)]					55,6kg
Perda total em (%)					26,48%
Aproveitamento (%)					73,52%

Por apresentar maior percentual, o peso do cerne ou durâmen representa um valor 14,27 vezes superior ao da casca e 3,06 vezes superior ao do albarno ou branco.

Descontado, do peso total das toras, os valores correspondentes aos pesos dos seus componentes e das sobras, as perdas registradas foram de 55,6 kg que corresponde a 26,48%. Esse valor alto de perda, deve-se a

subtração da umidade, por secagem natural durante o período de espera para o processamento, as perdas de partículas durante a serragem para transformação das toras em sub-toras, durante a passagem da parte correspondente ao cerne ou durâmen na desempenadeira para transformação em cavaco e do pó perdido durante a passagem na forrageira, além das perdas durante a retirada da casca e do alburno ou branco por intermédio do formão.

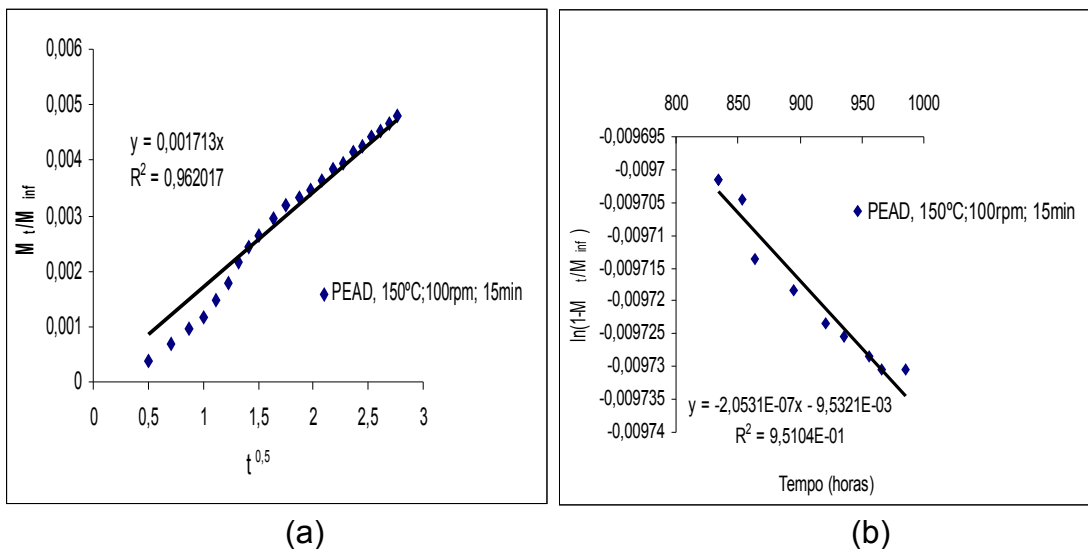


Figura D1 - Gráficos da regressão linear para determinação do coeficiente de difusão do PEAD processado a 150°C, 100 rpm e 15 minutos para: a) tempos curtos, b) tempos longos.

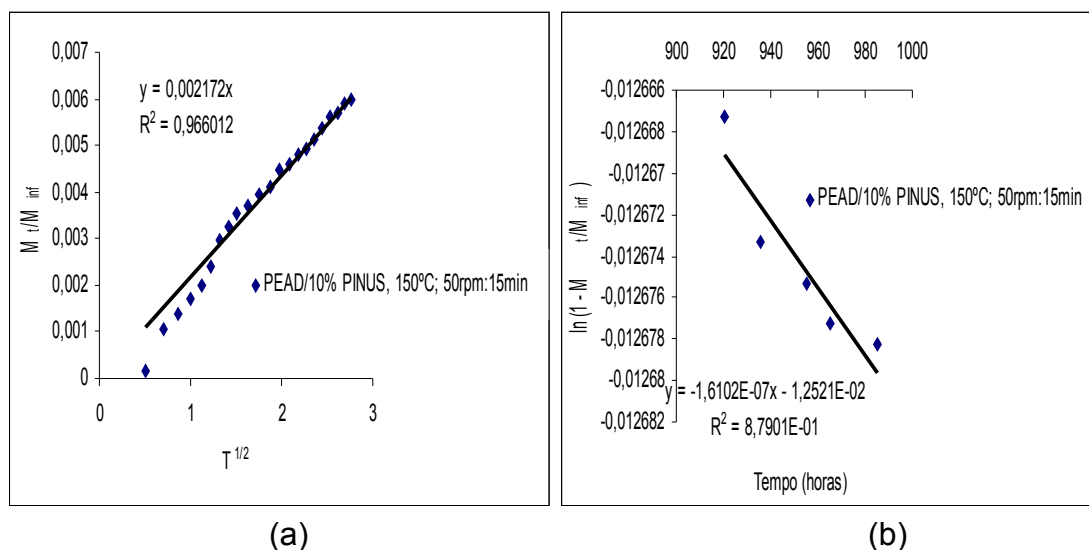


Figura D2 - Gráficos da regressão linear para determinação do coeficiente de difusão do composto com 90%PEAD/10%PMPinus, processado a 150 °C, 50 rpm e 15 minutos para: a) tempos curtos, b) tempos longos.

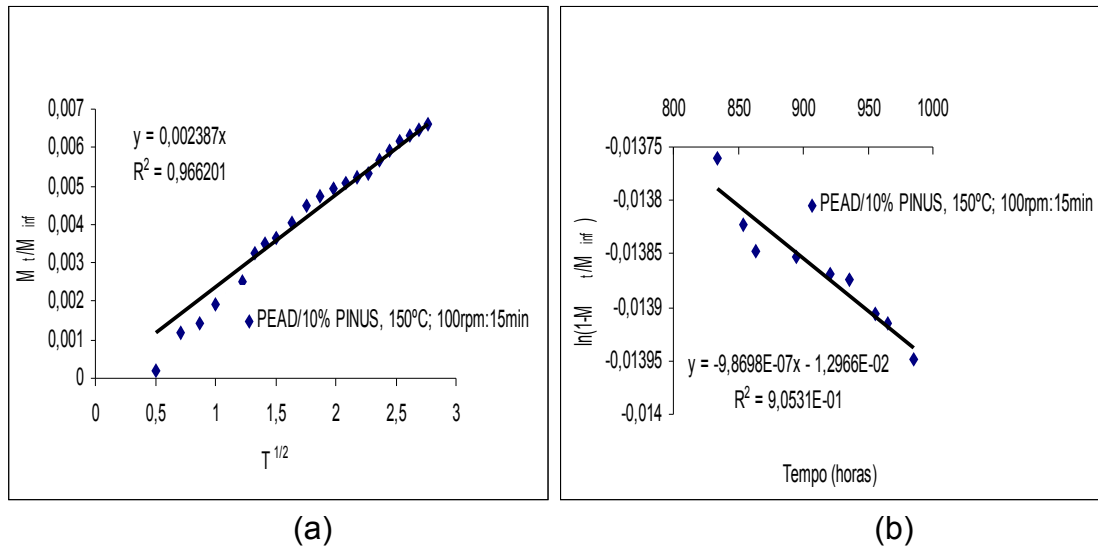


Figura D3 - Gráficos da regressão linear para determinação do coeficiente de difusão do compósito com 90%PEAD/10%PMPinus, processado a 150 °C, 100 rpm e 15 minutos para: a) tempos curtos, b) tempos longos.

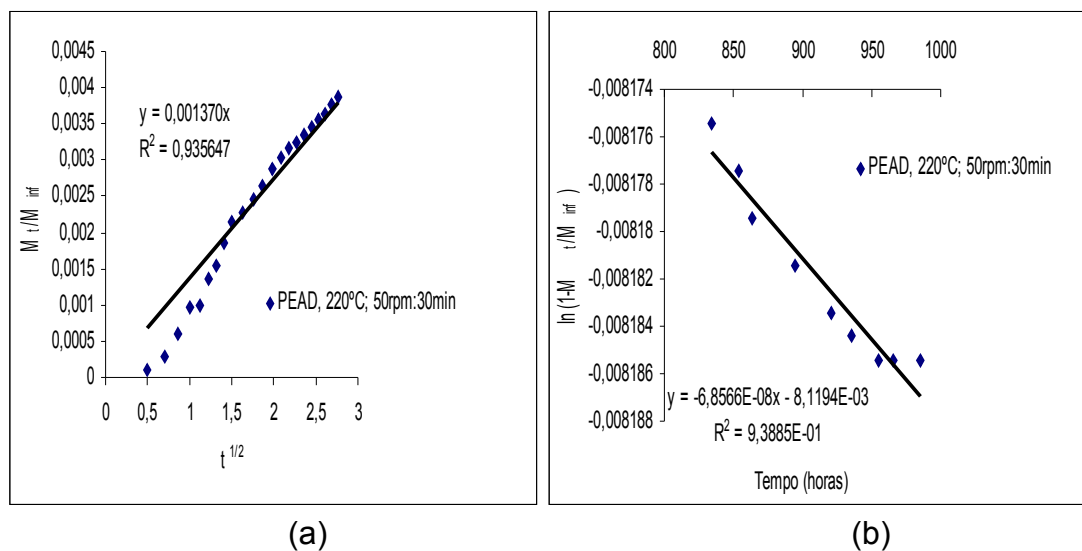


Figura D4 - Gráficos da regressão linear para determinação do coeficiente de difusão do PEAD processado a 220 °C, 50 rpm e 30 minutos para: a) tempos curtos, b) tempos longos



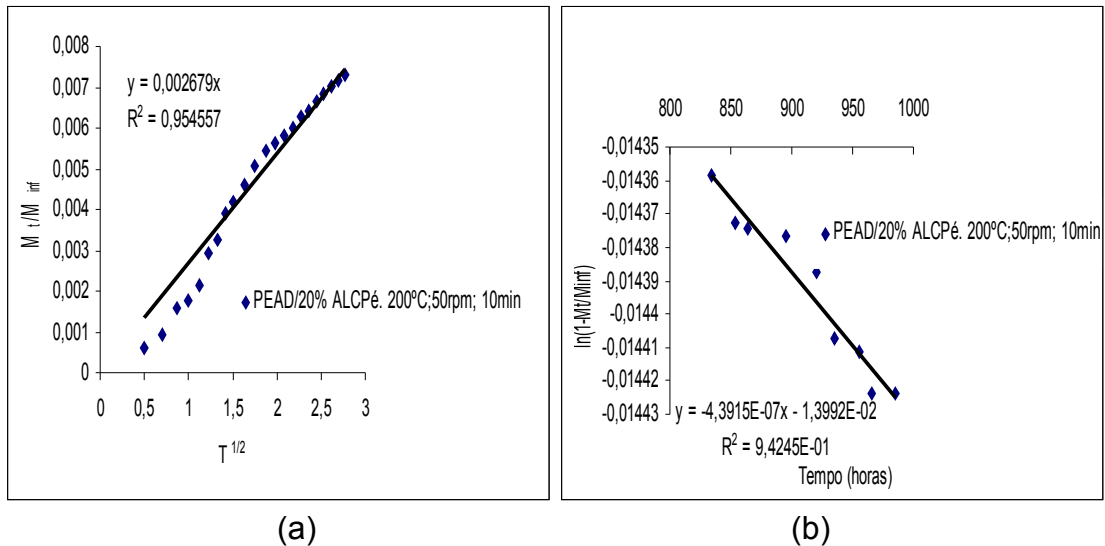


Figura D5 - Gráficos da Regressão linear para determinação do coeficiente de difusão de compósito com 80%PEAD10%PMALCPé, processado a 200 °C, 50 rpm e 10 minutos para: a) tempos curtos, b) tempos longos.

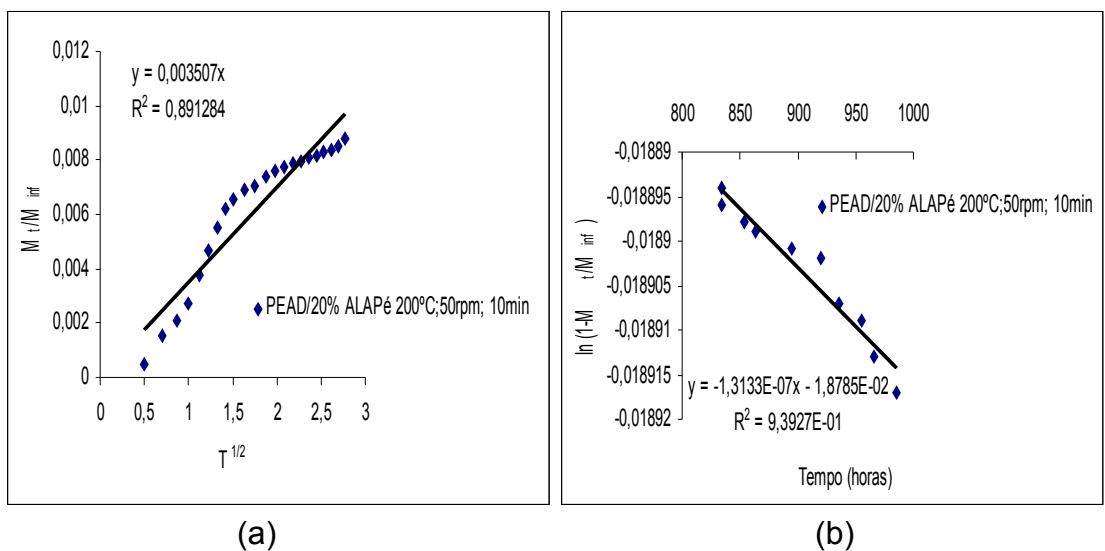


Figura D6 - Gráficos da Regressão linear para determinação do coeficiente de difusão de compósito com 80%PEAD10%PMALAPé, processado a 200 °C, 50 rpm e 10 minutos para: a) tempos curtos, b) tempos longos.

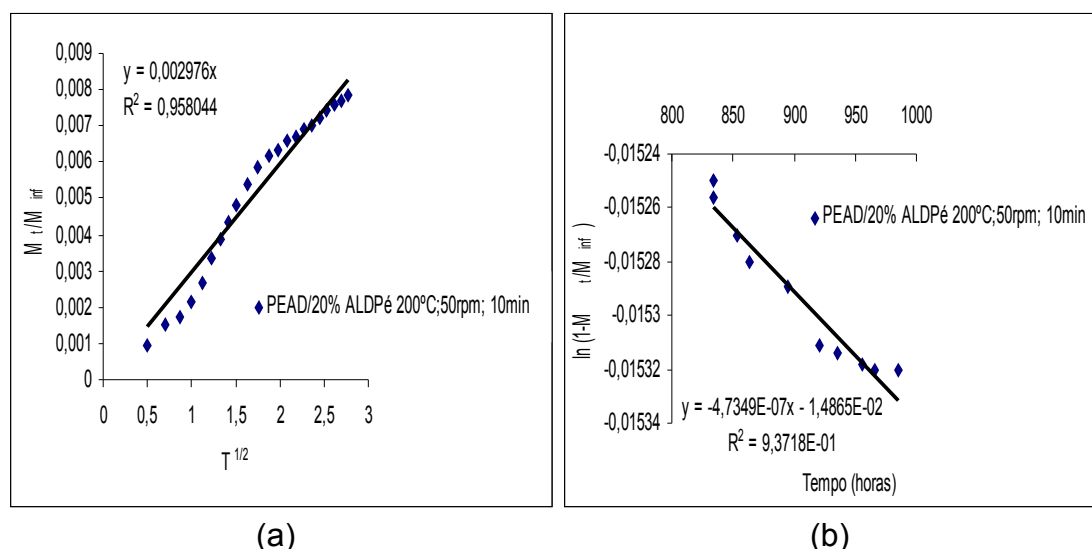


Figura D7 - Gráficos da Regressão linear para determinação do coeficiente de difusão de composto com 80%PEAD10%PMALDPé, processado a 200 °C, 50 rpm e 10 minutos para: a) tempos curtos, b) tempos longos.

#### Anexo E - Coeficiente de Difusão

Tabela E1 - Determinação do Coeficiente de Difusão para tempos curtos.

Amostras	B	L (mm)	Pi	D (m <sup>2</sup> /seg.)
PEAD (150°C, 100rpm, 15min)	0,001713	3,10	3,14159	1,53803E-15
90%PEAD/10%PMPinus (150°C, 50rpm, 15min)	0,002172	3,14	3,14159	2,53692E-15
90%PEAD/10%PMPinus (150°C, 100rpm, 15min)	0,002387	3,10	3,14159	2,98645E-15
PEAD (220°C, 50rpm, 30min)	0,00137	3,13	3,14159	1,0029E-15
80%PEAD/20%PMALCPé (200°C, 50rpm, 10min)	0,002679	3,08	3,14159	3,71342E-15
80%PEAD/20%PMALAPé (200°C, 50rpm, 10min)	0,003507	3,08	3,14159	6,36356E-15
80%PEAD/20%PMALDPé (200°C, 50rpm, 10min)	0,002976	3,10	3,14159	4,64212E-15

Tabela E2 - Determinação do Coeficiente de Difusão/para tempos longos.

Amostra	B	L (mm)	Pi	D (m <sup>2</sup> /seg.)
PEAD (150°C, 100rpm, 15min)	-2,0531E-07	3,10	3,14159	5,55305E-17
90%PEAD/10%PMPinus (150°C, 50rpm, 15min)	-1,6102E07	3,14	3,14159	4,46824E-17
90%PEAD/10%PMPinus (150°C, 100rpm, 15min)	-9,8698E-07	3,1	3,14159	2,6695E-16
PEAD (220°C, 50rpm, 30min)	-6,8566E-08	3,13	3,14159	1,89058E-17
80%PEAD/20%PMALCPé (200°C, 50rpm, 10min)	-9,8698E-07	3,08	3,14159	2,63516E-16
80%PEAD/20%PMALAPé (200°C, 50rpm, 10min)	-1,3133E-07	3,08	3,14159	3,50641E-17
80%PEAD/20%PMALDPé (200°C, 50rpm, 10min)	-4,7349E-07	3,1	3,14159	1,28065E-16

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)