

ANÁLISE FRACTOGRÁFICA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER E RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA.

Jean da Silva Rodrigues, jeansr2@yahoo.com.br¹

Roberto Tetsuo Fujiyama, fujiyama@ufpa.br²

Dênio Raman Carvalho de Oliveira, denio@ufpa.br³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP 66093-020, Fone: 91-3201 1798, Belém - Pará – Brasil.

²Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Correa, 01, Guamá, CEP 66075-110, Fone: 91-3183-1435 - Belém - Pará – Brasil.

³Faculdade de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Correa, 01, Guamá, CEP 66075-110, Laboratório de Engenharia Civil, Sala 24, Fone: 91-3183-1435 - Belém - Pará – Brasil.

Resumo: Neste trabalho, materiais compósitos de matriz poliéster reforçados por resíduos de madeira foram produzidos. A matriz de poliéster utilizada foi a tereftálica pré-acelerada com naftenato de cobalto e curada a temperatura ambiente com peróxido de metil-etil-cetona (MEK) em diferentes proporções em relação à resina, 0,33%, 1,66%, 3,33% e 5,00% em volume, de forma a se avaliar a influência deste nas propriedades mecânicas. O resíduo de madeira utilizado foi o pó de lixadeira da madeira maçaranduba, que foi caracterizado quanto à sua granulometria, umidade, massa específica aparente e aspecto microestrutural. Os compósitos foram fabricados por moldagem manual, sem pressão e a temperatura ambiente. Foram fabricados corpos de prova de matriz pura e compósitos reforçados por pó de maçaranduba, em diferentes proporções. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de tração e as superfícies de fratura geradas foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura. Foi determinada a massa específica de cada série de corpos de prova fabricada, bem como a fração volumétrica do reforço nos compósitos. Os resultados obtidos foram correlacionados com as propriedades físicas do reforço e os aspectos fractográficos verificados na superfície de fratura.

Palavras-chave: compósitos, poliéster, resíduo madeira, maçaranduba, fractografia

1. INTRODUÇÃO

A população mundial alcançou, em julho do ano de 2007 a marca de 6,7 bilhões de habitantes e chegará a 9,2 bilhões de habitantes até 2050, segundo estimativas da ONU. Aliado a este fato deve-se considerar que grande parte da população mundial encontra-se em países em desenvolvimento, com potencial de tornarem-se “classe média” em algum momento da história. Se este contingente populacional passar a demandar materiais à mesma taxa que a classe média dos países ditos desenvolvidos, o problema é evidente (Rodolfo Jr., 2005).

Neste contexto, o reaproveitamento de rejeitos, bem como o desenvolvimento de materiais provenientes de fontes renováveis, torna-se indispensável à nova lógica do desenvolvimento sócio-ambiental sustentável.

Dentre os mais abundantes rejeitos gerados pelas indústrias de processamento primário estão os resíduos de madeira. Gerwing et al. (2001), avaliando o rendimento do processamento de toras em serrarias da Amazônia Oriental chegou a rendimentos médios de 39% para laminadoras, 36% para as serrarias que processam para o mercado interno e 32% para as exportadoras. Dados do Anuário Estatístico do Estado do Pará dão conta que somente no ano de 2005 foram gerados no estado cerca de 9,9 milhões de metros cúbicos de madeira em tora. Levando em conta um rendimento médio de 36%, teríamos um valor em torno de 6,3 milhões de m³/ano de resíduos gerados somente nas etapas primárias de processamento da madeira no estado do Pará.

Neste cenário, uma das alternativas para o reaproveitamento de todo esse volume de resíduos é a produção de compósitos plástico-madeira, ou WPC (Wood Plastic Composites). Dados recentes dão conta de que somente nos Estados Unidos, 400 mil toneladas de polímeros reforçadas com fibras lignocelulósicas diversas foram utilizadas no ano de 2002 (Jiang; Kamdem, 2004).

Dentre as matrizes poliméricas utilizadas para a produção de compósitos, a matriz de poliéster tem se destacado devido as suas propriedades mecânicas, baixa viscosidade, alta molhabilidade e baixo custo. Poliésteres insaturados são extremamente versáteis em suas propriedades e aplicações e tem sido um popular termofixo usado como matriz

polimérica em compósitos. O poliéster é amplamente produzido industrialmente e possui muitas vantagens comparado às outras resinas termofixas, incluindo capacidade de cura à temperatura ambiente, boas propriedades mecânicas e transparência (Aziz et al., 2005).

Neste trabalho, compósitos de matriz poliéster tereftálica reforçados por resíduos da madeira maçaranduba foram fabricados e ensaiados em tração e impacto. Após os ensaios, as superfícies de fratura dos corpos de prova foram avaliadas e seus aspectos correlacionados com as propriedades mecânicas levantadas.

2. RESINA POLIÉSTER

As resinas de poliéster são de uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada. A reação de síntese da resina poliéster é uma reação de polimerização por condensação em etapas, ou seja, a reação de um álcool (base orgânica) com um ácido, resultando em uma reação de esterificação, formando um éster e água (Levy Neto; Pardini, 2006).

Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras lignocelulósicas têm sido estudados por diversos pesquisadores ao redor do mundo. Aziz et al. (2005) estudaram diferentes formulações de poliésteres insaturados reforçados com fibras longas de kenaf. Idicula et al. (2006) produziram compósitos de matriz poliéster e reforço híbrido fibras de sisal e banana em diferentes proporções. Gowda; Naidu; Chaya, (1999) levantaram as propriedades mecânicas de compósitos poliéster/juta. Monteiro et al. (2006) avaliou a tenacidade de compósitos de poliéster reforçados por fibras de piaçava. Marcovich; Aranguren; Reboredo, (2001) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos poliéster/serragem de madeira.

3. RESÍDUOS DE MADEIRA E A MADEIRA MAÇARANDUBA

A madeira é um dos mais importantes recursos naturais utilizados pelo homem e é um dos poucos que é renovável. Sua presença é importantíssima em nosso dia-a-dia e em nossa economia, seja na forma de material estrutural na construção civil ou na indústria moveleira, como papel, combustível ou mesmo como matéria-prima na indústria química. A madeira é também um reservatório de carbono - o crescimento vegetal fixa carbono e reduz a incidência de dióxido de carbono na atmosfera (Rodolfo Jr., 2005).

No setor madeireiro, a grande quantidade de resíduos gerados sempre foi motivo para preocupações. Dentre esses, o pó de lixa e a serragem merecem especial atenção por serem materiais de baixa densidade, exigindo maior espaço para a estocagem, além de serem materiais altamente combustíveis. Atualmente, cada vez mais os resíduos vêm despertando o interesse de pesquisadores e empresários, principalmente para verificar as possibilidades de reutilização desses materiais (Yamaji; Bonduelle, 2004).

Manilkara huberi é uma árvore com cerca de 40-50 m de altura. Ocorre geralmente nas regiões de terra firme da Amazônia de até 700 m de altitude. Dentre as espécies do gênero, Manilkara huberi é a mais conhecida e com a maior distribuição na Amazônia. Apesar de ser facilmente reconhecida devido suas folhas grandes e amarelas na face abaxial, é freqüentemente confundida com outras espécies do gênero devido à similaridade dos seus troncos.

A maçaranduba é a espécie do gênero mais valorizada devido sua madeira, que é muito pesada, dura e resistente. É usada principalmente na construção externa, dormentes, pisos industriais, etc.

4. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR RESÍDUOS DE MADEIRA

Polímeros reforçados com fibras lignocelulósicas fazem parte de uma nova classe de materiais que combina os atributos favoráveis tanto da madeira quanto dos plásticos. Outra vantagem da utilização destes compósitos é sua moldabilidade. A utilização de materiais sólidos como a madeira para a produção de perfis complexos não é a melhor proposição em termos de custo/benefício. As técnicas tradicionais de usinagem de madeira, tais como corte e desbaste, promovem perdas significativas de material, principalmente na forma de resíduo fino ("serragem"), material sem uso de alto valor comercial, sendo normalmente utilizado em processos industriais como fonte de calor (queima). Aliado a isto existe o fato de que o custo da madeira, apesar de ainda pouco sentido no Brasil, tende a crescer no futuro, principalmente por conta de sua escassez crescente. Espera-se, portanto, que a madeira deva mudar seu perfil de utilização para produtos cada vez mais nobres, restando a alternativa de dar uma utilização mais adequada aos seus resíduos na forma de produtos com algum valor agregado (Rodolfo Jr., 2005).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais e Processo de Produção

O polímero utilizado no desenvolvimento do trabalho foi a resina poliéster tereftálica insaturada e pré-acelerada, fabricada pela Royal Polímeros sob a denominação comercial de Denverpoly 754. O agente de cura utilizado foi o peróxido de MEK (Butanox M-50), nas proporções de 0,33% (v/v), 1,66% (v/v), 3,33% (v/v) e 5% (v/v). A resina foi adquirida já pré-acelerada com naftenato de cobalto (CoNap), na proporção de 0,15% em massa.

Foram obtidos resíduos de Maçaranduba, na forma de pó, proveniente do processo de lixamento. O resíduo foi colhido no pátio de uma indústria madeireira (serraria) localizada na zona rural da cidade de Benevides-PA. O material foi colhido no momento de processamento, de forma a garantir a uniformidade (em relação à espécie) da amostra.

Os corpos de prova foram fabricados por moldagem manual utilizando-se moldes de silicone, sem desmoldante e sem pressão. Inicialmente foi realizada a otimização da matriz pela variação do percentual, em volume, do agente de cura adicionado. Foram fabricadas quatro séries de seis corpos de prova (CP's) de matriz pura para ensaio tração com as proporções de agente de cura/resina de 0,33% (v/v), 1,66% (v/v), 3,33% (v/v) e 5% (v/v). Os compósitos foram fabricados seguindo o procedimento realizado por D'álmeida (1994), que fabricou compósitos particulados misturando as quantidades pré-pesadas de resina, agente de cura e, no caso deste trabalho, resíduos de madeira, sendo a mistura homogeneizada por cerca de cinco minutos e vazada, à temperatura ambiente nos moldes.

A fração mássica do reforço utilizado na fabricação dos corpos de prova foi definida pela capacidade volumétrica do molde em acomodar o reforço sem pressão ou compactação e na ausência da matriz. Os moldes de tração e impacto foram preenchidos com o reforço até o limite de sua capacidade volumétrica, sem pressão ou vibração mecânica. Em seguida foram devidamente pesados e o valor da massa obtida, foi estabelecida como sendo a referência de incorporação e trabalhabilidade para a fabricação de compósitos sem pressão. A partir deste valor de referência, foram estabelecidas as proporções a serem utilizadas nos compósitos. Todo o procedimento foi repetido três vezes.

5.2. Caracterização dos Resíduos de Madeira

Os resíduos de madeira foram caracterizados quanto à granulometria, teor de umidade e massa específica aparente.

A granulometria das partículas foi determinada de acordo com os procedimentos descritos na norma ASTM D 1921:2001. Os resíduos foram submetidos a peneiramento em um conjunto de peneiras padronizado, mostrado na Fig. (5), equipado com peneiras de Mesh's 20, 40, 60, 100 e mais bandeja coletora (BC). A amostra permaneceu sobre vibração mecânica por um período de 20 minutos a uma frequência de 1,5 Hz. De posse do valor das massas retidas em cada peneira, foi determinado o diâmetro médio representativo da amostra e plotado seu histograma de distribuição.

A determinação do teor de umidade foi realizada pelo método direto de acordo com os procedimentos descritos na norma ASTM D 3030:1995. O procedimento consiste em submeter a amostra à secagem convectiva a 105° C com circulação de ar, até que a massa fique constante. De modo a se levantar a curva de secagem, ou seja, o comportamento do material submetido a secagem ao longo do tempo, o processo de secagem foi repetido em seis amostras medindo-se a umidade perdida em intervalos de tempo pré-determinados. Os intervalos foram definidos em 10 min., 20 min., 30 min., 1 h, 1 h e 30 min., 2 h, 3 h, 4 h, 7 h, 10 h e 24 h, contados a partir do momento de entrada da amostra na estufa.

Os resíduos de madeira foram ainda caracterizados quanto à sua massa específica aparente. A massa específica aparente ou bulk density (BD) é a relação da massa por unidade de volume do mesmo no estado não compactado (Rodolfo Jr., 2005). Neste trabalho a massa específica aparente foi determinada seguindo o procedimento descrito em Yamaji; Bonduelle (2004), que basicamente consiste na determinação da densidade aparente por meio da relação massa/volume utilizando-se um Becker contendo uma quantidade de material de massa conhecida. De forma a se avaliar a geometria do material, os resíduos foram ainda avaliados por microscopia eletrônica de varredura.

5.3. Ensaios de Resistência à Tração e Impacto Charpy

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D 638M e seguiram as medidas como demonstrado esquematicamente na Fig. (1a). Os corpos de prova foram fabricados a partir de moldes de silicone em número mínimo de 6 para os ensaios com matriz pura e matriz reforçada com resíduos de madeira. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal EMIC DL500 – com célula de carga de 5 kN, a uma velocidade de ensaio de 5 mm/min.

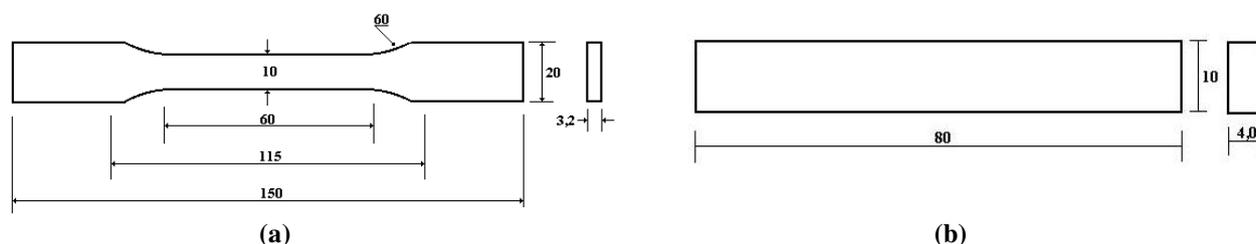


Figura 1. Desenho esquemático dos corpos de prova de (a) tração e (b) impacto Charpy (unidades em mm).

Os ensaios de impacto foram realizados conforme os procedimentos da norma ASTM D 5942 com as dimensões de acordo com o demonstrado esquematicamente na Fig. (1b). O número de corpos de prova fabricados foi de 10 para cada composição testada. Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina de ensaio modelo WP 410 da Gunt Hamburg, com uma distância entre apoios de 42 mm. Os valores foram lidos diretamente na escala do equipamento.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização dos Resíduos de Madeira

A Fig. (2) apresenta a distribuição granulométrica do pó de lixadeira da madeira maçaranduba obtida por peneiramento por 20 minutos a uma frequência de 1,5 Hz, utilizando as peneiras de mesh 20, 40, 60 e 100, além da bandeja coletora (BC).

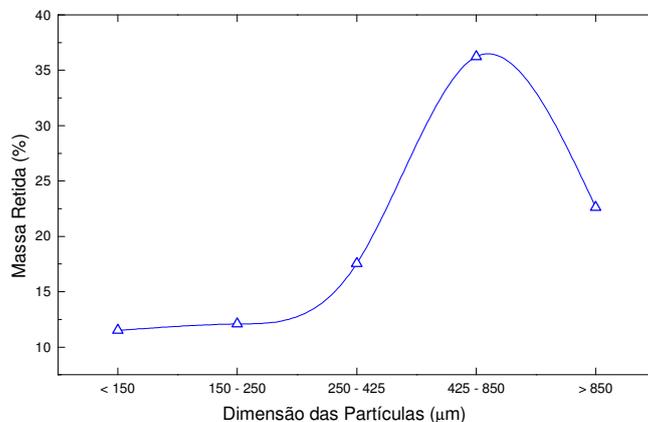


Figura 2. Curva de distribuição granulométrica do resíduo de Maçaranduba em função do percentual de massa retida nas peneiras.

A massa específica aparente, ou Bulk Density (BD), do resíduo de Maçaranduba foi determinada pela relação massa/volume de 3 amostras no estado não compactado. O resultado está demonstrado na Tab. (1). O teor de umidade do resíduo de Maçaranduba foi determinado pela secagem de 6 amostras do resíduo, com massa de 18 g cada, a 105° C por 24 horas. A média dos resultados, e o desvio padrão (DP), estão demonstrados na Tab. (1). Adicionalmente foi obtida a curva de secagem para estas amostras monitorando-se o decréscimo da massa em função do tempo. O gráfico ilustrado na Fig. (3) demonstra a curva obtida umidade da amostra versus tempo de secagem para os primeiros 120 minutos de ensaio. A partir deste ponto foi atingido o teor de umidade de equilíbrio com as condições de secagem, a curva estabilizou e se manteve praticamente constante até o término do ensaio. No gráfico pode-se observar que nos primeiros 20 minutos de secagem, o gráfico apresenta uma taxa de secagem constante, trecho reto, o qual representa a perda da umidade superficial, de fácil eliminação. Decorridos 90 minutos, a umidade cai de 20,02% para menos de 0,50%, uma redução de mais de 98%.

Tabela 1. Teor de umidade e massa específica aparente do pó de maçaranduba.

Material	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Umidade (base úmida) (%) (DP)
Resíduo de Maçaranduba	0,23	20,02 (± 0,19)

O resíduo de maçaranduba foi utilizado para a produção dos compósitos em condições ambientais, com um teor de umidade inicial de 20,02% e na condição heterogênea de granulometria, como produzido no lixamento.

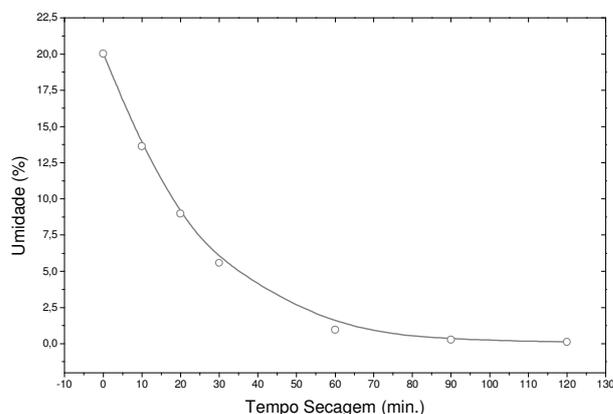


Figura 3. Curva de secagem para o pó de Maçaranduba a 105° C.

A análise do resíduo de madeira ao microscópio eletrônico de varredura, mostrou que a morfologia dos resíduos é composta por um misto de fibras e partículas. Rowell (2006) e Ferrigno apud Rodolfo Jr. (2005) diferenciam fibras de partículas conceituando fibras como componentes que apresentam uma razão de aspecto, relação entre a maior e menor dimensão do resíduo, maior que dez. Avaliando-se visualmente as micrografias pode-se constatar a heterogeneidade da amostra, confirmando o que foi observado nos ensaios de peneiramento. A amostra apresenta uma grande variação na razão de aspecto entre as partículas, não se caracterizando propriamente como um pó, mas também longe de poder ser considerado como fibra. A partir desta análise, convencionou-se classificar ao longo de todo este trabalho os resíduos de madeira como pó.

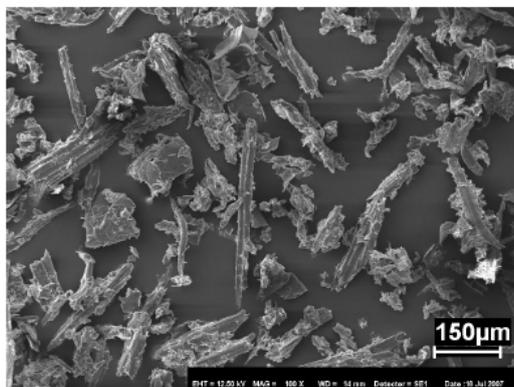


Figura 4. Morfologia dos resíduos de maçaranduba utilizados na produção dos compósitos.

6.2. Resistência à Tração dos Corpos de Prova de Matriz Pura

A Tab. (2) mostra os resultados obtidos no ensaio de tração dos corpos de prova fabricados com poliéster sem reforço, variando-se a proporção agente de cura/resina.

Tabela 2. Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova de poliéster sem reforço.

Tipo Amostra	Proporção Ag. Cura/Resina (%) _{v/v}	Resist. Tração (MPa) Média (DP)
Matriz Pura (MP)	0,33	36,74 (± 3,47)
	1,66	34,90 (± 3,01)
	3,33	32,02 (± 3,19)
	5,00	34,76 (± 6,01)

A Tab. (2) mostra que a composição com 0,33%(v/v) de agente de cura apresentou o maior nível de resistência à tração ($36,74 \pm 3,47$ MPa) dentre as séries produzidas, sendo superior em 5,27% às composições com 1,66% ($34,90 \pm 3,01$ MPa) e com 5% ($34,76 \pm 6,01$ MPa), que mostraram desempenho semelhante. Já a composição com 3,33% apresentou um desempenho significativamente inferior às demais composições ficando sua resistência à tração ($32,02 \pm 3,19$ MPa) 12,84% mais baixa que a resistência da composição de melhor desempenho.

A Fig. (5) apresenta as curvas carga versus deslocamento de corpos de prova característicos de cada série fabricada variando a proporção agente de cura/resina em 0,33% (v/v), 1,66% (v/v), 3,33%(v/v) e 5,00%(v/v).

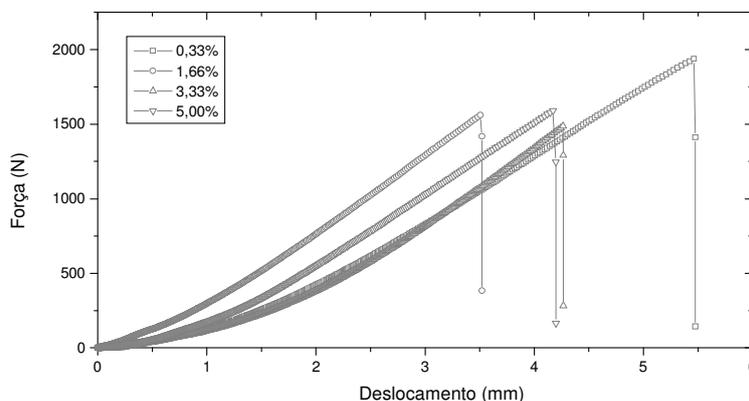


Figura 5. Curvas força versus deslocamento de corpos de prova característicos de poliéster sem reforço com diferentes proporções agente de cura/resina, em volume.

As curvas apresentadas na Fig. (5) mostram que a matriz de poliéster apresenta um comportamento dúctil quando ensaiada em tração, porém com fratura brusca, sem capacidade de absorção de energia após o trincamento da matriz. A composição com 0,33% (v/v) apresentou além da maior resistência à tração, um nível de deformação também maior que as demais séries fabricadas.

A avaliação das superfícies de fratura por microscopia eletrônica de varredura, ilustrada na Fig. (6), mostra que com o aumento da quantidade de agente de cura adicionada à resina, existe uma tendência a aumentar a formação de bolhas, que ficam aprisionadas na matriz durante o processo de cura do polímero. Na Fig (6a) podemos observar a micrografia eletrônica de uma amostra da série com 0,33% agente de cura, isenta de bolhas; já a micrografia mostrada na Fig. (6b), de uma amostra com 3,33% apresenta, indicadas por setas, bolhas formadas provavelmente no processo de cura, que podem ter contribuído para reduzir a resistência à tração da série.

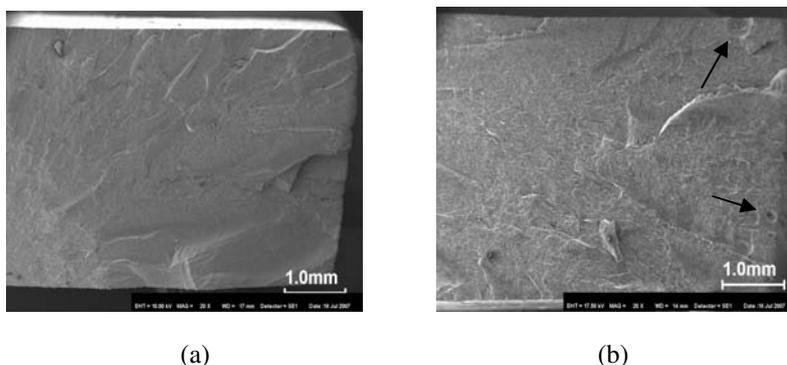


Figura 6. Corpos de prova (CP) de poliéster sem reforço. (a) CP com 0,33% (v/v) de agente de cura. (b) CP com 3,33% (v/v) de agente de cura. As setas em (b) mostram bolhas geradas no processo de cura.

6.3. Resistência à Tração dos Compósitos Reforçados com Resíduos de Madeira

Os resultados, demonstrados na Tab. (3) mostram que a inclusão do pó de maçaranduba na matriz de poliéster reduziu a resistência das amostras em 60% (média), em relação à matriz pura. A diminuição da resistência é compatível com a literatura, já que reforços particulados, inseridos em matrizes poliméricas dúcteis, podem atuar como pontos concentradores de tensão, nucleando trincas, reduzindo assim a resistência. Selke; Wichman (2004), trabalhando com HDPE reforçado com 20% (m/m) de fibras de madeira, teve a resistência à tração de seus compósitos reduzida em 23% em relação à matriz sem reforço.

Tabela 3. Resultado dos ensaios de tração dos compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba.

Tipo Amostra	F. Mássica Reforço (%)	Resist. Tração (MPa) Média (DP)
Compósito Poliéster/ Pó Maçaranduba	9,64	14,88 (\pm 1,15)

A Fig. (7) ilustra o comportamento típico carga versus deslocamento de corpos de prova reforçados com pó de maçaranduba comparado com o comportamento da matriz de poliéster sem reforço com 0,33% (v/v) de agente de cura.

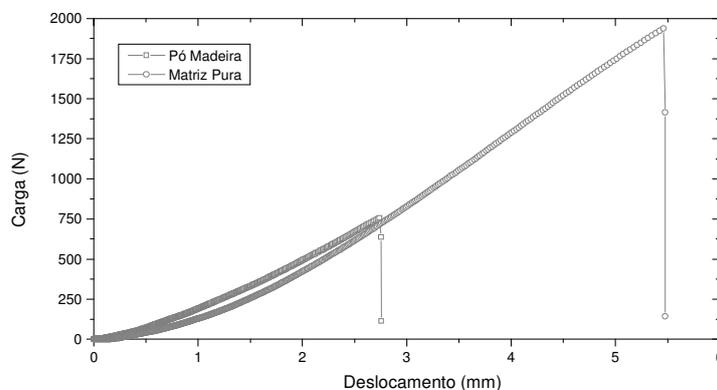


Figura 7. Corpo de prova típico de compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba comparado com uma amostra de poliéster sem reforço.

A análise das micrografias eletrônicas indicam as razões da redução da resistência desta série em relação à matriz pura. Devido à heterogeneidade granulométrica do reforço, encontramos no compósito, partículas que vão desde pequenos cavacos a pós propriamente ditos, passando por fibras com alta razão de aspecto. Como foi comprovado em Rodolfo Jr. (2005), quanto menor o tamanho de partícula de uma carga, maior sua capacidade de reforço de uma matriz polimérica; por outro lado, vários autores tem reportado um aumento na eficiência de reforçamento de fibras lignocelulósicas em matrizes poliméricas com o aumento da razão de aspecto, até um certo nível (Monteiro, S. N.; D'almeida, J. R. M., 2006; Martins, G. S. et al., 2004; Kuruvilla; Medeiros; Carvalho, 1999), ou seja, as partículas menores e as fibras presentes no pó de maçaranduba possuem efetividade como reforço, porém partículas como os cavacos têm um efeito negativo nas propriedades do compósito. Essas partículas mais grosseiras, quando dispostas transversalmente à direção de carregamento, sofrem delaminação entre suas faces, nucleando trincas, como podemos observar na Fig. (8a). Quando as partículas se tornam fibras com boa razão de aspecto, estas possuem efetividade como reforço e alteram o modo de falha para pull out parcial seguido de falha da matriz, como demonstrado na Fig. (8b), onde pode-se ver, indicado por setas pretas, o pull out parcial das fibras e indicado por setas brancas a região onde a matriz falhou. Como a análise granulométrica nos mostrou a preponderância das partículas mais grosseiras no resíduo de maçaranduba, o efeito de nucleação de trinca é muito mais pronunciado que o efeito de reforçamento propriamente dito.

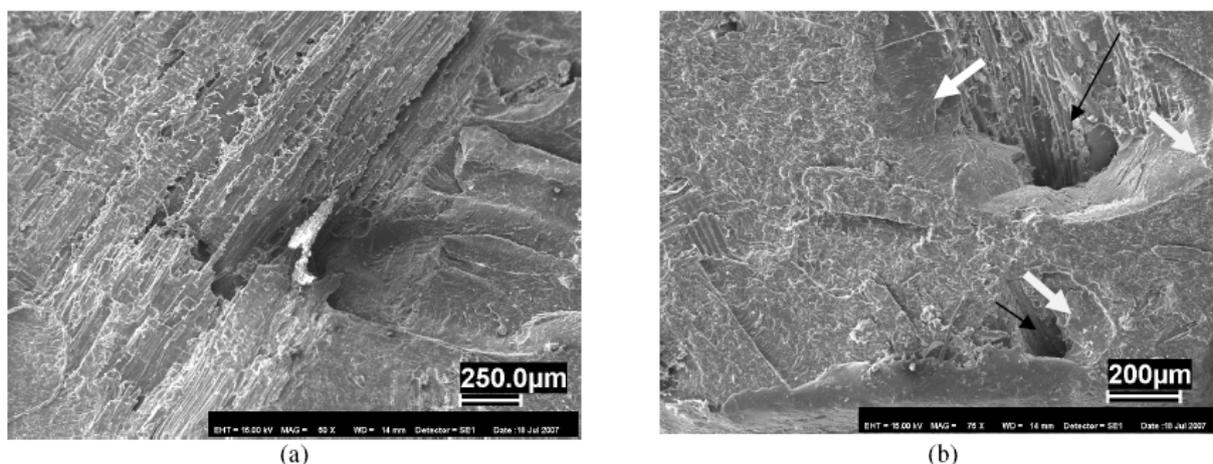


Figura 8. Micrografias eletrônicas de compósitos poliéster reforçados com resíduos de maçaranduba. Em (a) pode-se observar a delaminação do resíduo de madeira. Em (b), as setas pretas indicam o pull out parcial das fibras de madeira e as brancas a região onde a matriz falhou.

6.4. Resistência Ao Impacto Charpy

A Tab. (4) apresenta os resultados obtidos nos ensaios de impacto charpy sem entalhe para os corpos de prova de matriz de poliéster sem reforço e compósitos poliéster reforçados com pó de maçaranduba. Analisando os dados obtidos para os compósitos com pó de maçaranduba, pode-se verificar que eles obtiveram resistência ao impacto 26% menor do que a resistência alcançada pelas amostras sem reforço. A Fig. (9) ilustra graficamente os resultados obtidos no ensaio de impacto para os corpos de prova de matriz poliéster sem reforço e compósitos reforçados com pó de maçaranduba.

Tabela 4. Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy sem entalhe de corpos de prova de poliéster sem reforço e compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba.

Tipo Amostra	F. Mássica Reforço (%)	Resist. Impacto Charpy (kJ/m ²) Média (Desvio Padrão)
Matriz Pura (MP)	-	22,48 (± 0,65)
Compósito Poliéster/ Pó Maçaranduba	9,64	16,63 (± 1,09)

Os dois mecanismos básicos de absorção de energia dos materiais são a criação de novas superfícies de fratura e a deformação do material. No ensaio de impacto, o primeiro mecanismo a operar é a deformação do material e, sendo a energia incidente suficientemente alta, ocorre a iniciação e propagação da trinca, atuando como segundo mecanismo de absorção de energia. No caso dos compósitos, os mecanismos de absorção de energia de maior contribuição para a sua tenacidade ocorrem durante a propagação da trinca e são a extração das fibras e o descolamento da interface (Gowda et al., 1999). Estes mecanismos consomem energia pela criação de uma maior área superficial de fratura dentro do compósito e pelo trabalho de fricção na interface (Silva, 2003). Os resíduos de madeira são bastante heterogêneos, do ponto de vista granulométrico, com partículas variando desde pós, menores que 150 µm a cavacos maiores que 850 µm, passando por fibras com alta razão de aspecto. As fibras contribuem para aumentar a energia absorvida no ensaio de impacto principalmente pelo mecanismo de extração e descolamento da interface, já que como visto nos ensaios de tração, a adesão na interface fibra/matriz é deficiente.

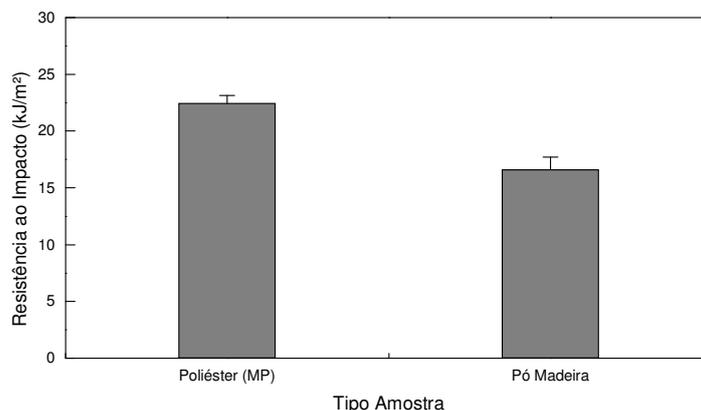
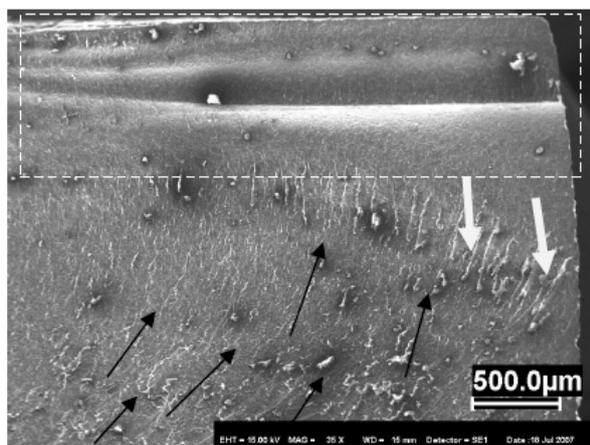
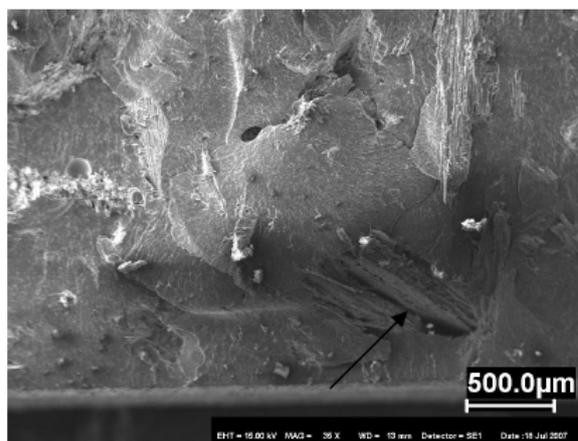


Figura 9. Gráfico comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de impacto charpy de corpos de prova de poliéster sem reforço (MP) e compósitos poliéster reforçado por pó de maçanduba.

A Fig. (10a) mostra a micrografia eletrônica da superfície de fratura de um corpo de prova de poliéster sem reforço após ensaio de impacto Charpy sem entalhe. Na imagem podemos observar que a superfície de fratura gerada é praticamente plana e apresenta estrias radiais que indicam a origem da trinca, características estas, eminentemente de fratura frágil, com propagação de trinca de forma instável. Na imagem as setas pretas indicam o sentido de propagação da trinca, as brancas indicam as estrias radiais características de fratura frágil e a região demarcada por um retângulo indica a região de elevada deformação plástica causada pelo impacto do martelo no momento do ensaio.



(a)



(b)

Figura 10. Superfícies de fratura de amostras submetidas a ensaio de impacto charpy. (a) amostra sem reforço. Setas pretas indicam o sentido de propagação da trinca e as brancas, as estrias radiais características de fratura frágil. (b) amostra de compósito. Seta indica a região em que uma fibra de madeira foi parcialmente arrancada.

A Fig. (10b) ilustra uma micrografia eletrônica da superfície de fratura de um compósito reforçado com pó de maçanduba. A imagem mostra que diferentemente da matriz pura, o compósito não apresenta uma superfície de fratura plana. Os resíduos com razão de aspecto favorável, e dispostos em posições que se aproximam da perpendicular ao plano principal de propagação da trinca, levam a matriz a fraturar, criando diferentes planos, ou degraus, na superfície de fratura, contribuindo para a elevação da quantidade de energia absorvida não só pelo mecanismo de fratura da matriz e aumento da área superficial de fratura dentro do compósito, mas também pela extração da própria fibra. Na imagem, a seta indica a região em que uma fibra foi parcialmente sacada e o degrau criado.

7. CONCLUSÕES

A metodologia de fabricação utilizada mostrou-se satisfatória principalmente em função das propriedades da matriz, porém a ausência de pressão no processo de moldagem, restringe a quantidade de reforço que pode ser inserido na matriz.

A utilização dos reforços sem tratamento mostrou-se viável, porém, para o reforço de pó de maçanduba, a predominância de partículas grosseiras afeta negativamente o desempenho dos compósitos, evidenciando a necessidade de um peneiramento prévio do material, com uma abertura de malha da bandeja que poderia ser definida a partir da análise do histograma granulométrico, para esta morfologia estudada.

O estudo fractográfico foi eficiente na determinação dos mecanismos de falha dominantes em cada composição fabricada, dando-nos indicações dos procedimentos a serem adotados no processamento dos compósitos para a melhoria das propriedades mecânicas.

8. REFERÊNCIAS

- Aziz, S. H.; Ansell, M. P.; Clarke, S. J.; Panteny, S. R. **Modified polyester resins for natural fibre composites.** Composites Science and Technology, n. 65, p. 525-535, 2005.
- D'álmeida, J. R. M. Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliméricos Decorrentes da Variação das Características Físicas e Processamento da Matriz. 1994. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.
- Gerwing, J.; Vidal, E.; Veríssimo, A.; Uhl, C. Rendimento no Processamento de Madeira no Estado do Pará. Série Amazônia No. 18. Belém: Imazon, 38 p., 2001.
- Gowda, T. M.; Naidu, A. C. B.; Chhaya, R. Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites. Composites: Part A, n. 30, p. 277-284, 1999.
- Idicula, M.; Boudenne, A.; Umadevi, L.; Ibos, L.; Candau, Y.; Thomas, S. Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. Composites Science and Technology, n. 66, p. 2719-2725, 2006.
- Jiang, H.; Kamdem, P. Development of poly(vinyl chloride)/Wood composites. A literature review. Journal of Vinyl and Additive Technology. V. 1, n. 2, p. 59-69, 2004.
- Kuruvilla, J.; Medeiros, E. S.; Carvalho, L. H. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. Polímeros: Ciência e Tecnologia, p. 136-141, out/dez, 1999.
- Levy Neto, F.; Pardini, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.
- Marcovich, N. E.; Aranguren, M. I.; Reboredo, M. M. Modified woodflour as thermoset fillers – Part I. Effect of the chemical modification and percentage of filler on the mechanical properties. Polymer, n. 42, p. 815-825, 2001.
- Martins, G. S.; Iozzi, M. A.; Martins, M. A.; Mattoso, L. H. C.; Ferreira, F. C. Caracterização mecânica e térmica de compósitos de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 14, n. 5, p. 326-333, 2004.
- Monteiro, S.N.; Aquino, R. C. M. P.; Lopes, F. P. D.; D'álmeida, J. R. M. Tenacidade ao entalhe por impacto charpy de compósitos de poliéster reforçados com fibras de piaçava. Revista Matéria, v. 11, n. 3, p. 204-210, 2006.
- Rodolfo Jr., A. Estudo da Processabilidade e das Propriedades de PVC Reforçado com Resíduos de Pinus. 2005. 247 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- Rowell, R. M. Advances and challenges of Wood polymer composites. In: Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, 8., 2006, Kuala Lumpur. Proceedings... Kepong: Forest Research Institute Malaysia, 2006.
- Selke, S. E.; Wichman, I. Wood fiber/polyolefin composites. Composites – Part A: applied science and manufacturing, Michigan, n. 35, p. 321-326, 2004.
- Silva, R. V. Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais. 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- Yamaji, F. M.; Bonduelle, A. Utilização da serragem na produção de compósitos plástico-madeira. Revista Floresta, Curitiba, n. 34, p. 59-66, abr. 2004.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

FRACTOGRAPHY ANALYSIS OF MATRIX COMPOSITE POLYESTER AND WASTE OF WOOD.

Jean da Silva Rodrigues, jeansr2@yahoo.com.br¹
Roberto Tetsuo Fujiyama, fujiyama@ufpa.br²
Dênio Raman Carvalho de Oliveira, denio@ufpa.br³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA, Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP 66093-020, Fone: 91-3201 1798, Belém - Pará – Brasil.

²Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Correa, 01, Guamá, CEP 66075-110, Fone: 91-3183-1435 - Belém - Pará – Brasil.

³Faculdade de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Correa, 01, Guamá, CEP 66075-110, Laboratório de Engenharia Civil, Sala 24, Fone: 91-3183-1435 - Belém - Pará – Brasil.

Abstract. *In this work, composites polyester matrix reinforced by wood waste were produced. The matrix of polyester used was the tereftalic pre-accelerated with cobalt naphthenate and cured at room temperature with peroxide, methyl ethyl ketone (MEK) in different proportions in relation to the resin, 0.33%, 1.66%, 3.33% and 5.00% in volume in order to evaluate the influence on the mechanical properties. The wood waste used was powder of sander maçaranduba, which was characterized as to its size, moisture, density and microstructure aspect. The composites were manufactured by molding manual, without pressure and temperature. Were manufactured specimens of pure matrix and composites reinforced by maçaranduba powder in different proportions. The mechanical properties were evaluated by tensile and fracture surfaces generated were evaluated by scanning electron microscopy. The density of each series of specimens manufactured was determined, and the volume fraction of reinforcement in composites. The results were correlated with the physical properties of reinforcement and Fractographic aspects encountered in the fracture surface.*

Keywords: *composites, polyester, wood, powder, fractography*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.