



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

JEAN DA SILVA RODRIGUES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ
POLIÉSTER REFORÇADO POR SISTEMA HÍBRIDO FIBRAS NATURAIS E
RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA.**

Belém – Pará - Brasil
Fevereiro 2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) –

Biblioteca Central / UFPA, Belém – PA

Rodrigues, Jean da Silva.

Comportamento mecânico de material compósito de matriz poliéster reforçado por sistema híbrido fibras naturais e resíduos da indústria madeireira / Jean da Silva Rodrigues; orientador Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama - 2008

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Mestrado em Engenharia Mecânica, Belém, 2008.

1. Materiais Compósitos – Comportamento Mecânico – Fractografia.
2. Engenharia Mecânica. 3. Materiais. 4. Compósitos. 5. Propriedades Mecânicas.

CDD – 22 ed. 620.23

JEAN DA SILVA RODRIGUES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ
POLIÉSTER REFORÇADO POR SISTEMA HÍBRIDO FIBRAS NATURAIS E
RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Materiais e Processos de Fabricação, da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: **Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama**

Belém – Pará - Brasil
Fevereiro 2008

JEAN DA SILVA RODRIGUES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ
POLIÉSTER REFORÇADO POR SISTEMA HÍBRIDO FIBRAS NATURAIS E
RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA.**

Belém – Pará - Brasil
Fevereiro 2008

JEAN DA SILVA RODRIGUES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ
POLIÉSTER REFORÇADO POR SISTEMA HÍBRIDO FIBRAS NATURAIS E
RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA.**

Dissertação submetida para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará.

Belém – Pará, 29 de Fevereiro de 2008.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama
Universidade Federal do Pará/PPGEM – Orientador

Prof. Dr. Fathi Aref Ibrahim Darwish
Universidade Federal Fluminense/PPGEC – Membro Externo

Prof^a. Dr^a. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias
Universidade Federal do Pará/PPGEM – Membro Interno

Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria
Universidade Federal do Pará/PPGEQ – Membro Convidado

Belém – Pará - Brasil
Fevereiro 2008

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina”

Cora Coralina

Agradecimentos

À Deus, que me permitiu estar aqui e me guarda todos os dias de minha vida;

Ao professor Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama pela orientação, amizade e paciência ao longo do trabalho;

Aos alunos de graduação em Engenharia Mecânica, Rômulo, Thiago, Joel, Marcos e Cleilton, pela colaboração na fabricação de corpos de prova e ensaios mecânicos;

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica: Prof. Dr. Fernando Sá, Prof. Dr. Cláudio Siqueira e Prof^a Dra. Carmen Gilda, pela experiência e conhecimentos transmitidos;

Ao Prof. Dr. Hilton, do Museu Paraense Emílio Goeldi, pelo apoio na análise por microscopia eletrônica;

Ao Prof. Dr. Lênio, do Departamento de Engenharia Química da UFPa, pelo apoio na realização dos ensaios nas fibras;

À Professora Dra. Carmen Gilda e alunos do Laboratório de Bio-Compósitos, em especial ao aluno Michel, pelo apoio na realização dos ensaios mecânicos;

Ao Prof. MSc. Gonçalo Rendeiro, alunos e monitores do Laboratório de Energia Biomassa e Meio Ambiente, pelo apoio no decorrer do trabalho;

Aos companheiros de trabalho Gerson, Jucenilda, Arlete e Beto, sem os quais o desenvolvimento do trabalho não seria viável.

Dedicatória

Ao meu Pai João Félix Rodrigues (in memorian) e à minha mãe Maria Lúcia;

À minha esposa Shirley Negrão e nossos filhos Rafael, Alessandro e Daniel;

Aos meus irmãos:

Gláucia, Emerson, Elizângela, Mônica e Bruno Cosme;

Aos amigos:

Ademar, Gilvandro e Edson.

RESUMO

Neste trabalho, materiais compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal, por resíduo de madeira e por sistema híbrido sisal/resíduo de madeira, dispostos aleatoriamente foram produzidos, utilizando-se o menor nível possível de processamento tecnológico nas etapas produtivas, com vistas a se produzir um compósito tecnicamente viável a pequenos produtores. 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. As fibras de sisal foram cortadas manualmente nos comprimentos de 5, 10 e 15mm e utilizadas da maneira como adquiridas, sem tratamento superficial. O resíduo de madeira utilizado foi o pó de lixadeira da madeira maçaranduba. Os compósitos foram fabricados por moldagem manual, sem pressão e a temperatura ambiente. Foram fabricados corpos de prova de matriz pura, compósitos reforçados por sisal, variando-se o comprimento das fibras, compósitos reforçados por pó de maçaranduba e compósitos de reforço híbrido, sisal/pó de madeira, em diferentes proporções entre os constituintes. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de tração e impacto charpy e as superfícies de fratura geradas foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura de modo a se correlacionar os aspectos de fratura com as propriedades mecânicas. Foi determinada a massa específica de cada série de corpos de prova fabricada, bem como a fração volumétrica dos reforços nos compósitos. Os resultados demonstraram que com o aumento do comprimento da fibra de sisal a resistência à tração e ao impacto dos compósitos foi incrementada, alcançando, o compósito com fibras de sisal de 15 mm, o melhor desempenho mecânico dentre as séries testadas. Por outro lado, a heterogeneidade granulométrica do pó de maçaranduba teve efeito negativo sobre as propriedades mecânicas dos compósitos. Os compósitos híbridos sisal/pó de madeira com maior teor de fibras, alcançaram 80% do desempenho obtido para os compósitos de fibras de sisal.

Palavras-chave: Materiais compósitos, propriedades mecânicas, poliéster, sisal, maçaranduba, resíduo de madeira.

ABSTRACT

In this work, composite materials of polyester matrix reinforced by short sisal fiber, by residue of wood and by hybrid system for sisal / residue of wood, arranged randomly, were produced using the minimum stages of technology processing in the productive step, with views to produce a composite material easy technically to produce. The polyester matrix used was a pre-accelerated tereftálica with cobalt naftenato and cured at room temperature with methyl ethyl ketone peroxide (MEK) in different proportions in relation to the resin, 0.33%, 1.66%, 3.33% and 5.00% by volume in order to evaluate the influence on mechanical properties. The sisal fibers were manually cut in lengths of 5, 10 and 15 mm and used in the way purchased and surface untreated. The residue of wood powder was used of maçaranduba wood. The composites were produced by manual moulding, without pressure and room temperature. Specimen were manufactured for evaluated matrix, composites reinforced by sisal, ranging of the length of the fibres, composites reinforced by maçaranduba residue and strengthening of hybrid composites, sisal / wood residue, in different proportions of the constituents. Mechanical properties were evaluated by tests of traction and Charpy impact and the areas of fracture generated were evaluated by scanning electron microscopy in order to correlate aspects of fracture with the mechanical properties. It was determined the specific mass of each series of specimen of each manufactured, and the volume fraction of the composite material. The results showed that the increase in the length of the sisal fiber, tensile strength and impact of composites has been increased, reaching the composite of sisal fibre, 15 mm, the best performance with the specimen series tested. The heterogeneity of size maçaranduba residue was negative effect on the mechanical properties of composites. The hybrid composites materials sisal / wood residue with higher content of fibers elevated in 80% of the mechanical properties obtained for the composite material reinforced only by sisal fiber.

Keywords: Composite Materials, mechanical properties, polyester, sisal, maçaranduba, wood flour.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Esquema da síntese de um éster insaturado.	24
Figura 2:	Estrutura básica do processo de cura da resina poliéster.	25
Figura 3:	Estrutura química básica do polímero de poliéster tereftálico.	27
Figura 4:	Mecanismos de falha em materiais compósitos reforçados por fibras (ANDERSON, 1995).	34
Figura 5:	Banco de Peneiramento utilizado para a caracterização granulométrica dos resíduos de Maçaranduba.	38
Figura 6:	Resíduo de Maçaranduba na forma de pó de lixadeira.	39
Figura 7:	Máquina utilizada para os ensaios de tração nas fibras de sisal.	40
Figura 8:	Fibras de sisal cortadas manualmente no comprimento de 5 mm para a fabricação dos compósitos.	41
Figura 9:	Molde em silicone para moldagem de corpos de prova de tração.	42
Figura 10:	Corpos de prova de matriz poliéster reforçados por fibras de sisal e pó de madeira para ensaio de impacto Charpy.	43
Figura 11:	Corpos de prova de matriz poliéster para ensaio de tração.	44
Figura 12:	Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de impacto Charpy.	44
Figura 13:	Corpo de prova no porta amostra da máquina de ensaio Charpy.	45
Figura 14:	Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaio de tração.	45
Figura 15:	Máquina de ensaio EMIC DL500 utilizada nos ensaios de tração.	46
Figura 16:	Histograma de distribuição granulométrica do pó de Maçaranduba.	48
Figura 17:	Curva de distribuição granulométrica do resíduo de Maçaranduba em função do percentual de massa retida nas peneiras.	48

Figura 18:	Curva de secagem para o pó de maçaranduba a 105° C.	50
Figura 19:	Morfologia dos resíduos de maçaranduba utilizados na produção dos compósitos.	51
Figura 20:	Seção transversal de fibra de sisal embutida na matriz de poliéster, preparada por processamento metalográfico e obtida em microscopia eletrônica de varredura.	52
Figura 21:	Aspecto da região de fratura da fibra técnica de sisal após ensaio de tração na fibra, ilustrando o rompimento das fibras elementares.	53
Figura 22:	Curva de secagem para as fibras de sisal a 105° C.	54
Figura 23:	Resultado dos ensaios de resistência à tração de corpos de prova de matriz poliéster sem reforço com diferentes proporções de agente de cura.	55
Figura 24:	Curvas força versus deslocamento de corpos de prova característicos de poliéster sem reforço com diferentes proporções agente de cura/resina, em volume.	56
Figura 25:	Micrografias eletrônicas dos 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 do polímero.	57
Figura 26:	Resultado comparativo dos ensaios de resistência à tração de amostras de poliéster sem reforço (matriz pura) e compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba.	58
Figura 27:	Curvas força versus deslocamento de corpo de prova típico de compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba comparado com uma amostra de poliéster sem reforço.	59
Figura 28:	Micrografia eletrônica de compósito poliéster reforçado com resíduos de maçaranduba. Pode-se observar a delaminação do resíduo de madeira.	60
Figura 29:	Micrografia eletrônica de compósito poliéster reforçado com resíduos de maçaranduba. As setas pretas indicam o pull out parcial das fibras de madeira e as brancas a região onde a matriz falhou.	60
Figura 30:	Resultado comparativo dos ensaios de resistência à tração de compósitos de matriz poliéster reforçado por fibras de sisal. A linha horizontal representa o comportamento em tração obtido para as amostras sem reforço (MP)	62

Figura 31:	Curvas força versus deslocamento de corpos de prova característicos de compósitos poliéster reforçado com fibras de sisal.	63
Figura 32:	Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm. As setas indicam a ponta das fibras que provavelmente nuclearam uma trinca.	64
Figura 33:	Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm. A seta indica a região em que a fibra descolou da matriz.	65
Figura 34:	Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm. As setas pretas indicam pull out de fibras e a branca o descolamento de uma fibra transversal.	65
Figura 35:	Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm. As setas pretas indicam fibras que sacaram da matriz (pull out) e as brancas fibras rompidas.	66
Figura 36:	Resultado dos ensaios de resistência à tração de compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal e pó de maçaranduba.	68
Figura 37:	Curvas força versus deslocamento de corpos de prova característicos de compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm e pó de maçaranduba.	69
Figura 38:	Superfície de fratura de compósito híbrido poliéster reforçado com fibras de sisal 5 mm / pó de maçaranduba.	70
Figura 39:	Resultado dos ensaios de resistência à tração de compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 10 mm e pó de maçaranduba.	71
Figura 40:	curva carga versus deslocamento de corpos de prova característicos de cada série fabricada com reforço híbrido sisal 10 mm / pó de maçaranduba.	72
Figura 41:	Superfície de fratura de compósito híbrido poliéster reforçado com fibras de sisal 10 mm e pó de maçaranduba.	73
Figura 42:	Resultado dos ensaios de resistência à tração de compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm e pó de maçaranduba.	74
Figura 43:	curva carga versus deslocamento de corpos de prova característicos de cada série fabricada com reforço híbrido sisal 15 mm / pó de maçaranduba.	75

Figura 44:	Superfície de fratura de compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal 15 mm e pó de maçaranduba. Na imagem podemos observar fibras rompidas praticamente no plano de propagação da trinca.	75
Figura 45:	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 maçaranduba.	77
Figura 46:	Superfície de fratura de corpo de prova de poliéster sem reforço. As setas pretas indicam o sentido de propagação da trinca, as brancas, as estrias radiais características de uma fratura frágil e o retângulo indica a região deformada pelo impacto no momento do ensaio.	78
Figura 47:	Superfície de fratura de compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba. A seta indica a região em que uma fibra de madeira foi parcialmente arrancada.	79
Figura 48:	Gráficos comparativos dos resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy de compósitos de poliéster reforçado por fibras de sisal. A linha horizontal representa o desempenho em impacto obtido para as amostras sem reforço (MP)	80
Figura 49:	Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm.	81
Figura 50:	Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm.	81
Figura 51:	Resultados obtidos nos ensaios de impacto de compósitos híbridos de matriz poliéster reforçados com fibras de sisal de 5, 10, 15 mm e pó de maçaranduba.	83
Figura 52:	Superfície de fratura de compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal 5 mm e pó de maçaranduba. As setas indicam fibras transversais descoladas da superfície de fratura.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Propriedades de algumas fibras naturais comparadas com as principais fibras sintéticas de reforçamento.	28
Tabela 2:	Propriedades da fibra de sisal encontrada por diversos autores.	30
Tabela 3:	Distribuição granulométrica do pó de lixadeira da madeira Maçaranduba.	47
Tabela 4:	Teor de umidade e massa específica aparente do pó de maçaranduba.	49
Tabela 5:	Resultados da caracterização das fibras de sisal não tratadas.	51
Tabela 6:	Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova de poliéster sem reforço com 0,33%, 1,66%, 3,33% e 5,00% (v/v) de agente de cura adicionado à matriz.	55
Tabela 7:	Resultado dos ensaios de tração dos compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba, com 0,33%, 1,66%, 3,33% e 5,00% (v/v) de agente de cura adicionado à matriz.	57
Tabela 8:	Resultado dos ensaios de tração dos compósitos poliéster reforçado com fibras de sisal de 5, 10 e 15 mm, dispostas aleatoriamente.	61
Tabela 9:	Resultado dos ensaios de tração dos compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm e pó de maçaranduba.	67
Tabela 10:	Resultado dos ensaios de tração dos compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 10 mm e pó de maçaranduba.	71
Tabela 11:	Resultado dos ensaios de tração dos compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm e pó de maçaranduba.	74
Tabela 12:	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.	76
Tabela 13:	Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy dos compósitos de matriz poliéster reforçado com fibras de sisal.	80
Tabela 14:	Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy dos compósitos híbridos de matriz poliéster reforçado com fibras de sisal e pó de maçaranduba.	82

NOMENCLATURAS

MEK	Metil Etil Cetona
ONU	Organização das Nações Unidas
WPC	Wood Plastic Composites
CoNap	naftenato de cobalto
DMA	dimetilanilina
UV	Ultra Violeta
ASTM	American Society Testing Materials
BD	bulk density (g/cm ³)
CP	Corpos de Prova
σ	Resistência à Tração Uniaxial (MPa)
P_f	Fração Mássica do Reforço (%)
MP	Matriz Pura
DP	Desvio Padrão

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
NOMENCLATURAS	xv
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	18
1.1 – ASPECTOS GERAIS	18
1.2 – OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	21
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 – MATERIAIS COMPÓSITOS	22
2.2 – RESINA POLIÉSTER	23
2.2.1 - Resina Tereftálica	26
2.3 - FIBRAS VEGETAIS	27
2.3.1 – A Fibra de Sisal	28
2.4 - OS RESÍDUOS DE MADEIRA	30
2.4.1 – A Madeira Maçaranduba	30
2.5 - COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS	31
2.6 - COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA	32
2.7 - FRATURA EM POLÍMEROS E COMPÓSITOS	33
2.7.1 – Fratura em Polímeros	33
2.7.2 - Fratura em Compósitos	33
2.8 – FRACTOGRAFIA	35
CAPÍTULO III – MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	37
3.1 – MATERIAIS	37
3.1.1 – Resina Poliéster	37
3.1.2 – Resíduos de Madeira	37
3.1.3 – Fibras de Sisal	37

3.2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
3.2.1 – Caracterização dos Resíduos de Madeira	38
3.2.2 – Caracterização das Fibras de Sisal	40
3.2.3 – Confeção dos Corpos de Prova	41
3.2.4 – Ensaio de Impacto Charpy	44
3.2.5 – Ensaio de Tração	45
3.2.6 - Análise das Superfícies de Fratura	46
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE MADEIRA	47
4.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL	51
4.3 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	54
4.3.1 – Corpos de Prova de Matriz Pura	55
4.3.2 – Compósitos Reforçados com Pó de Maçaranduba	57
4.3.3 – Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal	61
4.3.4 – Compósitos Híbridos Sisal 5 mm / Pó de Maçaranduba	67
4.3.5 – Compósitos Híbridos Sisal 10 mm / Pó de Maçaranduba	70
4.3.6 – Compósitos Híbridos Sisal 15 mm / Pó de Maçaranduba	73
4.4 – RESISTÊNCIA AO IMPACTO	76
4.4.1 – Corpos de Prova de Matriz Pura e Compósitos Reforçados com Pó de Maçaranduba	76
4.4.2 – Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal	79
4.4.3 – Compósitos Híbridos Sisal / Pó de Maçaranduba	82
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	84
CAPÍTULO VI – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1.1 – ASPECTOS GERAIS

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 sentido, a pressão exercida sobre os recursos naturais, advinda do crescimento exponencial da demanda originada principalmente nas sociedades desenvolvidas e em desenvolvimento, tem levado a comunidade acadêmica e tecnológica a buscar alternativas competitivas às matérias primas originárias de recursos não renováveis.

As alterações provocadas no clima do planeta pela atividade humana, bem como previsões sombrias sobre o esgotamento dos recursos vegetais e minerais criaram um cenário sem precedentes na economia mundial, a insustentabilidade da produção industrial e prestação de serviços. 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.

LENTINI et al (2005), estudando a produção madeireira da Amazônia Oriental e a destinação dos resíduos, concluiu que aproximadamente 45% dos resíduos produzidos pelas indústrias madeireiras acabam sendo queimados, 6% são abandonados, 24% são utilizados para produzir carvão, 5% são usados em fornos de olaria, 5% usados para gerar eletricidade e os demais 15% para usos diversos.

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).

Por outro lado, é primordial para a manutenção da sustentabilidade das cadeias produtivas a utilização de matérias primas provenientes de fontes renováveis. Indissociável ao aspecto puramente ambiental, está o aspecto humano e econômico; em outras palavras, para produzir produtos sustentáveis precisamos levar em consideração não apenas o custo das matérias primas e processos produtivos, mas sua viabilidade ambiental e social. A inserção na cadeia produtiva de produtos de viabilidade técnica e econômica acessíveis às comunidades rurais, por exemplo, reduz a pressão exercida sobre os núcleos urbanos advinda do êxodo rural, freando ou revertendo essa tendência.

Neste sentido, as fibras naturais apresentam grande potencial, em particular a fibra de sisal. No semi-árido nordestino, englobando a parte árida mais seca, que corresponde a pouco mais de 10% da área da região, praticamente não existem opções fitotécnicas, tendo somente o sisal como elemento básico de produção e de distribuição de renda no campo (SILVA; BELTRÃO, 1999). Outro importante aspecto da fibra de sisal são suas propriedades mecânicas. Atualmente numerosos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de incorporar fibras de sisal em matrizes poliméricas, gerando compósitos fibrosos.

A fibra de sisal se mostra promissora no desenvolvimento de materiais compósitos devido ao seu baixo custo, boas propriedades mecânicas e disponibilidade no mercado (SILVA, 2003).

O preço relativo da fibra de sisal tem sido aproximadamente 11% do valor das fibras de vidro e 0,07% do valor das fibras de carbono. Também apresenta

vantagens em relação a outras fibras vegetais quando se compara o desempenho mecânico e o custo unitário (CARVALHO, 2005)

As principais vantagens da utilização de fibras lignocelulósicas como reforço em polímeros podem ser resumidas em: baixa densidade, baixa abrasividade, possibilidade de incorporação de elevados teores resultando em elevada rigidez, manutenção da reciclabilidade, biodegradabilidade, ampla variedade de fibras disponíveis em todo o mundo, oferta de trabalho no campo em uma economia rural não mais dependente somente da agricultura para alimentação, baixo consumo de energia e baixo custo (ROWELL et al, 1997). Grande parte destas vantagens não são ignoradas em segmentos da economia tais como na construção civil e na indústria automobilística, somente para citar dois exemplos (RODOLFO JR, 2005).

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 a temperatura ambiente, boas propriedades mecânicas e transparência (AZIZ et al., 2005).

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. produziram compósitos de matriz poliéster e reforço híbrido fibras de sisal e banana em diferentes proporções. GOWDA; NAIDU; CHHAYA, (1999) levantaram as propriedades mecânicas de compósitos poliéster/juta. MONTEIRO et al. 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.

1.2 – OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Este trabalho tem por objetivo geral desenvolver um compósito polimérico de matriz poliéster reforçado com fibras curtas de sisal dispostas aleatoriamente e resíduos de madeira na forma de pó, utilizando-se o menor nível possível de processamento tecnológico nas etapas produtivas.

Como objetivos específicos tem-se:

- a) Promover a otimização da matriz por meio da avaliação do comportamento mecânico em função da quantidade de agente de cura adicionada à resina líquida;
- b) Avaliar a técnica de fabricação por moldagem manual à temperatura ambiente e sem pressão;
- c) Caracterizar os resíduos de madeira e fibras de sisal, tomadas da forma como usualmente são oferecidas no mercado local (Belém-PA);
- d) Avaliar o comportamento mecânico do compósito de matriz poliéster reforçado com fibras curtas de sisal, avaliando a influência do comprimento da fibra nas propriedades mecânicas do compósito;
- e) Avaliar o comportamento mecânico do compósito de matriz poliéster reforçado com resíduos de madeira na forma de pó;
- f) Avaliar o comportamento mecânico do compósito híbrido de matriz poliéster reforçado com fibras curtas de sisal e resíduos de madeira, em função do comprimento das fibras e da fração mássica de cada um dos constituintes da mistura;
- g) Estudar, por fractografia, os mecanismos de falha dominantes para cada série de compósitos produzida;
- h) Correlacionar as propriedades mecânicas dos compósitos com o aspecto fractográfico.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos podem ser definidos como materiais constituídos por uma mistura de fases macrocomponentes compostas por materiais que, geralmente, são diferentes sob os pontos de vista de composição química e forma. O aglomerante do material é chamado de matriz, que tem por função envolver os componentes, ou seja, compõe a forma do material. A matriz atua ainda como uma base que confere ductilidade e mantém a estrutura coesa e que, em resumo, contribui para que o conjunto se caracterize por boas condições de fabricação e a necessária flexibilidade. Os componentes inseridos na matriz atuam geralmente como substâncias de reforço ou enchimento da matriz, sendo as propriedades dos compósitos dependentes da natureza e das propriedades do reforço e da matriz.

De uma maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades (CALLISTER JR., 2002).

Em função dos tipos e arranjos dos reforços existentes, os compósitos podem ser classificados em duas grandes áreas: os de reforço particulado e os de reforço fibroso.

Caso o reforço seja na forma de fibras, pode-se dispô-las em feixes paralelos entre si, de modo a formar e orientar o reforço em multidireções, multicamadas ou na forma de camadas isoladas ou lâminas. Os compósitos com camadas isoladas podem ser subdivididos em compósitos com fibras contínuas ou fibras curtas (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Embora possuam propriedades mecânicas inferiores quando comparados aos compósitos com fibras contínuas, os compósitos com fibras descontínuas oferecem maior facilidade de processamento a um menor custo. Nos compósitos com fibras descontínuas o carregamento na fibra é função de seu comprimento e geralmente segue a distribuição de Weibull. Os extremos das fibras são geralmente pontos concentradores de tensões, que induzem tensões cisalhantes na interface (SILVA, 2003). As propriedades mecânicas dos materiais compósitos podem ser

determinadas através de modelos como a regra das misturas e outros modelos de aproximação.

O interesse dos materiais compósitos está ligado a dois fatores: econômico e performance. O fator econômico vem do fato do material compósito ser muito mais leve que os materiais metálicos, o que implica numa economia de combustível e conseqüentemente, num aumento de carga útil (aeronáutica e aeroespacial). A redução na massa total do produto pode chegar a 30 % ou mais, em função da aplicação dada ao material compósito. O custo de fabricação de algumas peças em material compósito pode ser também sensivelmente menor se comparado com os materiais metálicos. O fator performance está ligado a procura por um melhor desempenho de componentes estruturais, sobretudo no que diz respeito às características mecânicas (resistência a ruptura, resistência à ambientes agressivos, etc.). O caráter anisotrópico dos materiais compósito é o fator primordial para a obtenção das propriedades mecânicas requeridas pelo componente. A leveza juntamente com as excelentes características mecânicas faz com que os materiais compósito sejam cada vez mais utilizados dentro de atividades esportivas (PEREIRA, 2000).

2.2 – 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). A figura 1 mostra a representação esquemática da síntese de um éster insaturado.

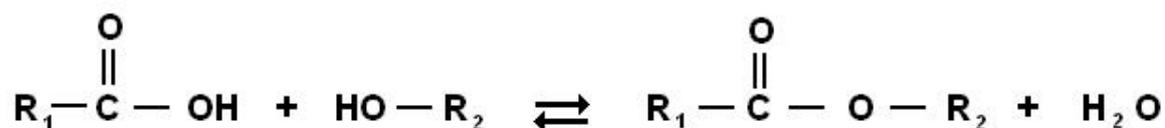


Figura 1: Esquema da síntese de um éster insaturado.

A estrutura de um poliéster insaturado é composta geralmente de três componentes básicos: ácidos saturados, ácidos insaturados e glicóis. O ácido insaturado, geralmente ácido maleico ou ácido fumárico, proporciona insaturações dentro da cadeia polimérica, as quais serão pontos reativos durante o processo de cura da resina. O ácido saturado é responsável pela distância entre as insaturações ao longo da cadeia poliéster, e o glicol proporciona o meio para a reação de esterificação e a formação de ligação entre ácidos saturados e insaturados (PEDROSO, 2002).

O polímero de cadeia linear formado é dissolvido em um monômero polimerizável, geralmente o estireno, e o material resultante é a chamada resina poliéster. A resina pode ser curada, formando um polímero termofixo reticulado, através de um processo de poliadição, com o auxílio de um iniciador. Às vezes, o iniciador é ativado por um composto chamado ativador. É usual (embora incorreto) chamar o iniciador usado para curar a resina de “catalisador”. Similarmente, o ativador é chamado de “acelerador” (PEDROSO, 2002). No início da reação, é necessário que as duplas ligações (insaturações) sejam rompidas para que as interligações ocorram. Esse problema pode ser resolvido pelo aquecimento da resina, pela aplicação de radiações eletromagnéticas, ou pela adição dos catalisadores e aceleradores de reação. Os radicais livres do catalisador atacam as insaturações no poliéster ou no estireno, para iniciar a reação de polimerização em cadeia, a qual dá origem a um copolímero estireno-poliéster, formando assim uma rede tridimensional termorrígida (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Como é uma reação de adição em cadeia, não há formação de produtos adicionais. Para cura à temperatura ambiente, o catalisador mais utilizado é o peróxido de metil-etil-cetona (MEKP), utilizado juntamente com os aceleradores

naftenato de cobalto (CoNap), ou dimetilnilina (DMA), na proporção de 0 a 0,3% em massa. As resinas de poliéster insaturado são comercializadas com acelerador de tal forma que o sistema reativo seja obtido pela mistura pré-acelerada com o catalisador. A quantidade de catalisador e acelerador controla a velocidade de reação e, portanto, o tempo de gel e a temperatura máxima atingida durante a reação.

Para moldagem sob pressão a quente, são utilizados catalisadores sem a utilização de aceleradores, e a mistura é estável por um tempo relativamente longo à baixas temperaturas. Uma vez iniciada a reação, por meio de um acréscimo de temperatura, a mistura tem um tempo de gel, pois a reação de polimerização é exotérmica. Curas realizadas à temperatura elevada têm usualmente pouco tempo de duração.

Como há um grande número de ácidos e glicóis disponíveis, há possibilidade de se obter um grande número de variações de resina. Se empregados apenas biácidos insaturados na fabricação das resinas de poliéster, o espaçamento entre as duplas ligações seria curto, resultando em um material frágil e quebradiço. Sendo assim, é necessário que a formação básica do poliéster tenha em sua composição biácidos saturados que atuam como extensores de cadeia. Quanto maior a quantidade e quanto maior a proporção de ácido saturado, mais tenaz será a resina de poliéster após polimerizada, e menor encolhimento na cura será observado. A figura 2 ilustra esquematicamente a estrutura básica do processo de cura da resina poliéster.

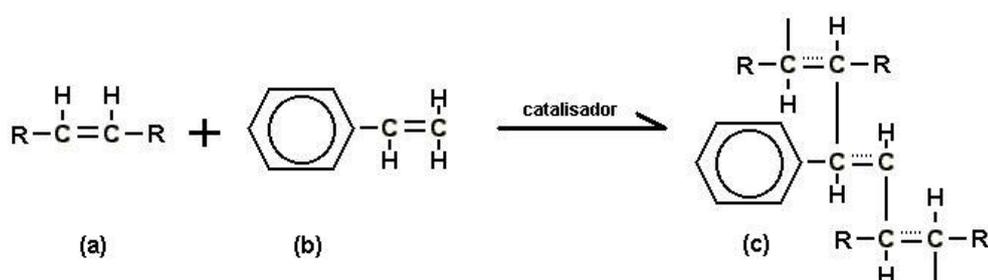


Figura 2: Estrutura básica do processo de cura da resina poliéster. (a) poliéster insaturado; (b) monômero de estireno; (c) poliéster curado.

As principais resinas poliéster são as ortoftálicas, as tereftálicas, as isoftálicas e as bisfenólicas. Existem ainda algumas outras variações que são desenvolvidas periodicamente para necessidades específicas como as de ácido HET (melhor resistência química), bromadas (características anti-chamas), low-profile (baixa contração), emulsionadas (baixo teor de estireno-ecológica), etc.

As resinas ortoftálicas são aquelas que, na sua composição, são utilizadas como ácidos modificadores o ftálico ou seu anidrido. Suas propriedades mecânicas e químicas são inferiores às demais, devido à dificuldade de se obter polímeros de alto peso molecular. A anidrido ftálico tem forte tendência de se regenerar a partir dos meios ésteres do ácido ftálico (reação reversível), fato que incrementa a presença de espécies de baixo peso molecular, altamente sensíveis ao ataque químico.

Nas resinas isoftálicas, o ácido isoftálico não forma anidrido cíclico e não sofre desvantagem de regeneração, como no caso das ortoftálicas e conseqüentemente, podem ser obtidos poliésteres de alto peso molecular, ou seja, com cadeias mais longas. Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica pois absorvem melhor impactos, conseqüentemente tornam-se polímeros de maior resistência química e térmica.

As resinas bisfenólicas são produtos da reação simplificada do óxido de propileno e o bisfenol A, resultando no bisfenol A propoxilado que depois reagirá com o ácido insaturado. Por isso este tipo de resina possui poucos pontos sujeitos a hidrólise. Sua estrutura com anéis aromáticos deixa o polímero com uma estrutura mais fechada, tornando-a mais resistente térmica e quimicamente com uma alta dureza. Recomendada principalmente para peças que vão sofrer ataques químicos.

2.2.1 - Resina Tereftálica

São resinas onde parte dos ácidos são substituídos por ácido tereftálico, apresentando desempenho similar às resinas isoftálicas, quanto à resistência

química, hidrólise e térmica, porém possuem baixa resistência a UV. A figura 3 ilustra esquematicamente a estrutura química básica do polímero de poliéster tereftálico.

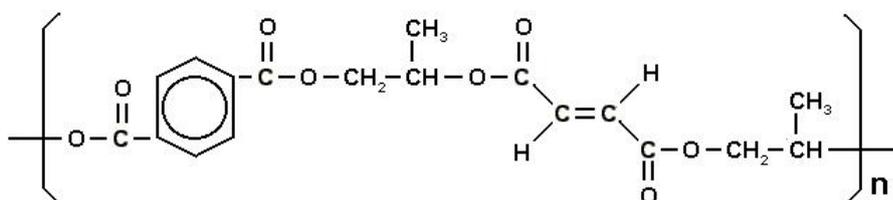


Figura 3: Estrutura química básica do polímero de poliéster tereftálico.

2.3 - FIBRAS VEGETAIS

As fibras vegetais são classificadas de acordo com a sua origem e podem ser agrupadas em fibras de semente (algodão), fibras de caule (juta, linho, cânhamo), fibras de folhas (bananeira, sisal, piaçava, curauá, abacá, henequém), fibras de fruto (côco) e fibras de raiz (zacatão). As fibras oriundas do caule ou das folhas são chamadas fibras duras e são mais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos (SILVA, 2003).

De forma sucinta, podemos enumerar as principais vantagens das fibras vegetais, que são as seguintes: baixa massa específica; maciez e abrasividade reduzida; recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis; baixo custo; estimulam emprego na zona rural e baixo consumo de energia na produção. Já entre as desvantagens e limitações podemos citar: acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas e baixa estabilidade dimensional; alta sensibilidade a efeitos ambientais, tais como variações de temperatura e umidade; as de origem vegetal sofrem significativa influência referentes ao solo, época da colheita, ao processamento após a colheita e à localização relativa no corpo da planta; baixas temperaturas de processamento, isto é, não toleram mais que 200° C durante a consolidação no interior da matriz de um compósito (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Para os compósitos com resinas termorrígidas essa característica não é limitante, uma vez que a cura das resinas ocorre, geralmente, em temperaturas inferiores a 200° C (SILVA, 2003). Outras desvantagens são a falta de uniformidade de propriedades, que dependem da

origem das fibras, da região do plantio e da habilidade manual durante a colheita e a alta absorção de umidade, que pode causar o inchaço das fibras. A absorção de umidade pode ser drasticamente reduzida pela modificação química das fibras e pela boa adesão na interface fibra/matriz. Na tabela 1 são apresentados dados comparativos das propriedades mecânicas e características de fibras vegetais e fibras de reforçamento convencionais.

Tabela 1: Propriedades de algumas fibras naturais comparadas com as principais fibras sintéticas de reforçamento.

Fonte	Fibra	Diâmetro médio (µm)	M. Específica (g/cm ³)	Res. Tração (média) (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Along. (%)
SOYKEABKAEW; SUPAPHOL; RUJIRAVANIT, (2004)	Juta	69,60	0,268	425,40	-	1,9
SOYKEABKAEW; SUPAPHOL; RUJIRAVANIT, (2004)	Linho	210,30	0,294	663,00	-	5,0
OKUBO; FUJII; YAMAMOTO, (2004)	Bambu	106	-	441,00	35,90	1,3
SHIBATA; CAO; FUKUMOTO, (2005)	Kenaf	140	0,749	223,00	14,49	-
SHIBATA; CAO; FUKUMOTO, (2005)	Bagaço de Cana	394	0,344	89,00	4,52	-
TORRES; CUBILLAS, (2005)	Sisal	223,53	-	234,30	-	-
IDICULA et al., (2006)	Banana	120	1,35	550	20	5 - 6
IDICULA et al., (2006)	Abacaxi	50	1,526	413	-	3 - 4
WAMBUA; IVENS; VERPOEST, (2003)	Algodão	-	1,51	400	12	3-10
IDICULA et al., (2006)	Vidro	15	2,54	2500	64	3
SILVA et al., (2006)	Carbono	7,00	1,76	3650	231	1,4
SILVA et al., (2006)	Kevlar 49	12	1,44	3600	112,4	2,4

2.3.1 – A Fibra de Sisal

O sisal é um vegetal eminentemente tropical e por isso existem tão poucos plantios comerciais com a fibrosa fora desse ambiente. Pertence ao gênero *Agave*, que engloba um grupo bem definido de plantas de consistência herbácea e escapo floral saliente, que podem atingir 12 ou mais metros de altura. O arranjo regular de suas folhas, aliado à posição altaneira do seu escapo floral, confere-lhe aparência de invulgar beleza onde quer que seja cultivada. A denominação *Agave* dada ao gênero é derivada, apropriadamente, de *agavos* que em grego, significa admirável,

magnífico. O sisal pertence à classe Monocotiledônea, série Liliiflôrea, família Agavaceae, subfamília Agavoidea, gênero *Agave*, espécie *A. sisalana* (SILVA; BELTRÃO, 1999).

A extração de fibras a partir das folhas de sisal envolve o corte e a descorticação das mesmas, seguidos de lavagem, secagem e da limpeza das fibras. As folhas de sisal são estruturas tipo sanduíche, e a partir de cada uma delas pode-se extrair de 700 a 1400 fibras, que variam de 0,5 a 1 metro em comprimento (OLKSMAN apud LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Cada fibra de sisal (fibra técnica) é constituída por uma centena de fibras elementares ligadas entre si. Possuem um alto teor de celulose, excelentes propriedades de resistência à ruptura e alongamento e boa resistência à ação da água salgada (SILVA, 2003).

As fibras de sisal, assim como as fibras vegetais em geral, constituem-se, basicamente, de celulose, hemicelulose e lignina, sendo por isso chamadas alternativamente de fibras lignocelulósicas (SILVA; BELTRÃO, 1999).

A fibra de sisal possui seção transversal arredondada, porém irregular e variável, decrescendo em direção às extremidades livres das folhas. Além disso, a resistência à tração das fibras de sisal não é uniforme ao longo das mesmas. Todos estes fatores contribuem para elevar a variação das propriedades mecânicas das fibras, influenciando, conseqüentemente, na qualidade dos compósitos (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

A tabela 2 apresenta algumas propriedades mecânicas e físicas das fibras de sisal encontradas por diversos autores.

Tabela 2: Propriedades da fibra de sisal encontrada por diversos autores.

Autor	Diâmetro (μm)	M. Específica (g/cm^3)	Resist. Tração (MPa)	Alongamento (%)
CARVALHO (2005)	482,16	1,591	218,3 (\pm 51,2)	7,07% (\pm 3,95)
SAVASTANO JR. (2004)	204	1,387	-	-
SILVA (2003)	194	-	176 (\pm 63,36)	2,2% (\pm 0,04)
TORRES; CUBILLAS (2005)	223,53	-	234,30 (\pm 75,10)	-
SILVA; BELTRÃO (1999)	223,50	-	268,11	2,08%
IDICULA et al. (2005)	205 (\pm 4,3)	1,41	350 (\pm 7)	6 – 7%
WAMBUA et al. (2003)	-	1,33	600 – 700	2 – 3%
MISHRA et al. (2003)	50 – 200	1,45	468 – 640	3 – 7%

2.4 - OS RESÍDUOS DE MADEIRA

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, daí a importância da utilização de madeira na construção civil (RODOLFO JR., 2005).

A madeira é um composto polimérico natural e consiste principalmente de celulose, hemicelulose e lignina. Estes polímeros constituem as paredes de célula de madeira e fornecem a maioria de suas propriedades; até mesmo as indesejáveis, como a natureza hidrófila e a polaridade inerente. As propriedades da madeira, incluindo sua estrutura física, propriedades mecânicas, densidade e relação de aspecto (comprimento médio de fibras e diâmetro) mudam de espécie para espécie (CARASCHI, 2002).

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).

2.4.1 – A Madeira Maçaranduba

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.

Em inglês, a madeira de espécies de *Manilkara* é conhecida como beefwood, ou mais comumente bulletwood, e a árvore é chamada de bully-tree. Em países com influência francesa o nome é sapotille ou sapotilla. Outro nome freqüente nos países do Noroeste da América do Sul é níspero.

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.

2.5 - COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS

A utilização de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais não é recente e as primeiras patentes datam da década de 60. A partir da década de 90, uma visão mais realística e ecológica do processo industrial fez ressurgir o interesse em materiais renováveis, tais como as fibras e os óleos vegetais, principalmente na indústria automotiva. Associado aos aspectos ecológicos, há também os aspectos tecnológicos e as vantagens econômicas no uso destes materiais. A questão social é também um forte argumento para o incentivo da produção destes compósitos, uma vez que estes materiais são geralmente oriundos de regiões economicamente pobres (SILVA, 2003).

Fibras vegetais já foram largamente empregadas no passado na indústria automobilística, como foi o caso de compósitos de látex de borracha natural reforçados com fibra de coco para uso em estofamentos de automóveis. No entanto, a partir da década de 60 estes começaram a ser gradativamente substituídos pelas espumas de poliuretano. Essa substituição se deve, puramente, a maior produtividade e menor custo da espuma, sem levar em conta o seu menor desempenho e questões ambientais e sociais. A fibra vegetal apresenta maior perspirabilidade (capacidade de absorver umidade da transpiração humana), o que proporciona maior conforto, essencial para os motoristas profissionais de táxi, ônibus e caminhões, que ficam longos períodos de tempo sentados. A geração de

empregos rurais é outro aspecto importante do uso de fibras vegetais. Ainda hoje, veículos de primeira linha de empresas no exterior, tais como Mercedes Benz da Alemanha, utilizam estofamentos com fibras vegetais. Outra vantagem do uso de fibras vegetais é a sua não toxidez. A espuma de poliuretano à base de isocianato libera durante a sua combustão o gás cianídrico, altamente tóxico (MATTOSO et al., 1996).

As fibras vegetais mais utilizadas como material de reforço em compósitos poliméricos são as fibras de sisal, côco, juta e banana, além de fibras de madeira, bagaço e bambu (ROWELL et al., 1997).

As matrizes termorrígidas apresentam um enorme potencial para utilização das fibras vegetais, pois neste caso, podem-se utilizar métodos de processamento bastante simples e de baixo custo, além de utilizar com vantagem fibras contínuas, sem a necessidade de se promover alterações nos procedimentos e/ou equipamentos de processamento (SILVA, 2003).

2.6 - COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA

Os compósitos plástico-madeira ou WPC (Wood Plastic Composites) começaram a ser produzidos na Europa e estão sendo fabricados nos Estados Unidos há décadas. Entretanto, o maior crescimento vem ocorrendo a partir da última década (CLEMONS, 2002).

Devido à incompatibilidade da madeira, material polar, com alguns polímeros, como as poliolefinas (PP, PE) materiais apolares, é necessário induzir a compatibilidade na interface plástico-madeira no compósito para que o produto apresente boas propriedades mecânicas. Em geral é utilizado um compatibilizante polimérico para fazer a modificação superficial da madeira ou da matriz plástica para efetivamente haver um reforço da matriz polimérica (YAMAJI; BONDUELLE, 2004).

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).

2.7 - FRATURA EM POLÍMEROS E COMPÓSITOS

2.7.1 – Fratura em Polímeros

A iniciação e extensão de uma trinca em polímeros requer a ruptura de ligações inter e/ou intra-moleculares. Entretanto, este não é o único mecanismo absorvedor de energia em operação. De fato, existem outros mecanismos absorvedores de energia no processo de fratura dos polímeros e que são, na maioria das vezes, processos viscoelásticos e/ou plásticos de dissipação de energia que ocorrem na região da ponta da trinca (D'ÁLMEIDA, 1994).

Nos polímeros vítreos existem dois mecanismos básicos de absorção de energia. Ambos requerem processos localizados de deformação plástica na ponta da trinca, a saber: i) fibrilamento ou craze (crazing) e ii) escoamento (shear yielding). A diferença entre estes mecanismos é que o fibrilamento ocorre com aumento de volume, enquanto o escoamento generalizado ocorre essencialmente a volume constante e requer movimento cooperativo de segmentos moleculares.

2.7.2 - Fratura em Compósitos

A caracterização das propriedades dos materiais compósitos não é uma tarefa simples. A primeira questão que surge é como aplicar os métodos padrões,

desenvolvidos para materiais homogêneos, aos materiais compósitos. Este é especialmente o caso das propriedades locais, como os parâmetros de resistência ao impacto e tenacidade à fratura (SILVA, 2003).

A figura 4 mostra os vários mecanismos de falha que podem ocorrer em compósitos reforçados por fibras. A fratura raramente ocorre de modo catastrófico, mas tende a ser progressiva, com falhas subcríticas dispersas através do material, o que constitui uma vantagem.

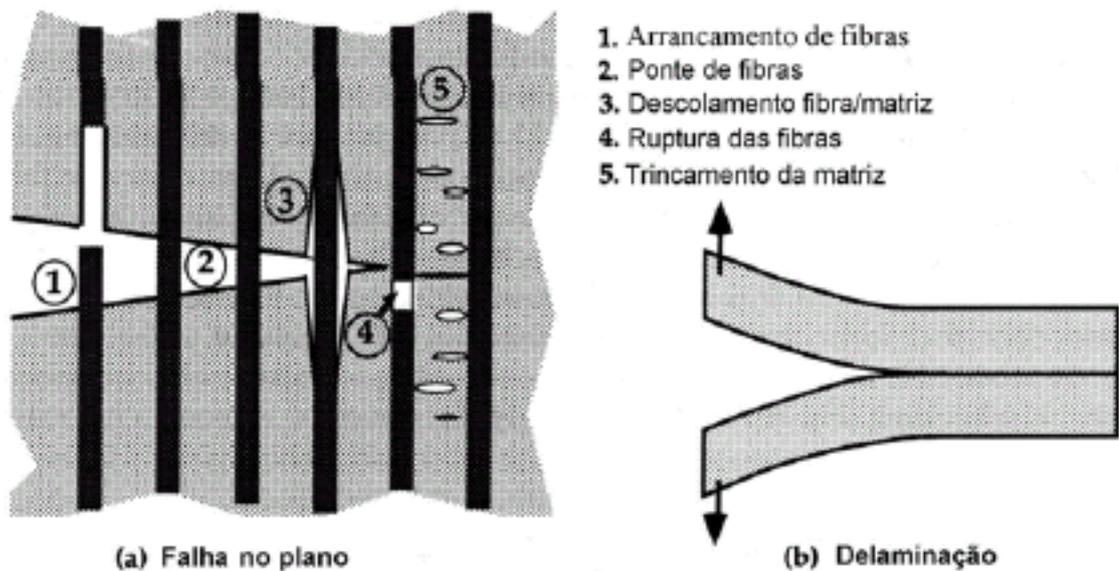


Figura 4: Mecanismos de falha em materiais compósitos reforçados por fibras (ANDERSON, 1995).

Os mecanismos de falha que podem ocorrer durante a fratura de um compósito fibrado são: a ruptura das fibras, a deformação e o trincamento da matriz, o descolamento das fibras, o deslizamento interfacial seguido da ruptura das fibras (*pull out*) e ainda o efeito denominado de pontes de fibras (*fiber bridging*), onde as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras. Vários destes mecanismos podem atuar simultaneamente durante o processo de fratura de um compósito.

2.8 – FRACTOGRAFIA

A fractografia é uma das principais técnicas utilizadas no processo de análise de materiais após falha. Consiste em identificar aspectos fractográficos e estabelecer as relações entre a presença ou ausência desses aspectos com a seqüência de eventos da fratura, podendo levar à determinação do carregamento e das condições dos esforços no momento da falha (SOHN; HU, 1995). A fractografia é a chave para se determinar a seqüência dos eventos ocorridos durante o processo de fratura e identificar o estado de tensões atuantes no momento da falha. Outros fatores como condições ambientais e defeitos do material podem contribuir para o início e crescimento da fratura e também podem ser avaliados por esta técnica (FRANCO, 2003).

O método de observação utilizado na investigação fractográfica, visual, por microscopia estereoscópica, óptica ou eletrônica, deve atentar não só para a identificação e documentação da morfologia da falha, mas também para informações que ajudem a determinar as causas da falha. Assim três operações básicas devem ser seguidas: (1) classificação do tipo de falha, (2) mapeamento da trinca e (3) análise química da superfície de fratura.

A primeira classificação, envolvendo o tipo de falha, conduz a duas definições: falhas interlaminares e translaminares. Esta classificação ajuda muito, pois orienta na utilização de diferentes métodos para melhor estudar cada um dos diferentes tipos de fratura. Fraturas interlaminares ou delaminações são melhor analisadas pela direção de propagação da trinca utilizando-se microscopia óptica estereoscópica, enquanto que as fraturas translaminares, onde ocorre o rompimento das fibras, são melhor analisadas por microscopia eletrônica de varredura.

Com uma peça fraturada em serviço, a responsabilidade inicial do investigador é documentar a fratura, tanto com fotos dos aspectos gerais quanto aos detalhes. Neste estágio, informações críticas importantes podem ser asseguradas localizando-se todos os tipos de fratura ocorridos, dando ao investigador um sentimento de quais foram as cargas primárias no evento, qual a seqüência de acontecimentos, e que fatos poderiam ter influenciado o início ou durante a falha. Após a definição do tipo de falha ocorrida, vem a etapa mais trabalhosa do processo, que é o exame detalhado da fratura por meio de análises macro e

microscópicas. Essas análises requerem que o investigador use técnicas fractográficas específicas para determinar a direção da fratura, o modo como ocorreu e as condições ambientais em que a fratura se processou. Para fraturas translaminares, a ênfase é dada na fratura das fibras, enquanto que na fratura interlaminar a resina recebe mais atenção (FRANCO, 2003). Determinada a origem, deve-se tentar determinar que condições favoreceram o surgimento da trinca.

CAPÍTULO III – MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 – MATERIAIS

3.1.1 – Resina Poliéster

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.

3.1.2 – Resíduos de Madeira

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 da Maçaranduba, de forma a garantir a uniformidade (em relação à espécie) da amostra.

3.1.3 – Fibras de Sisal

As fibras de sisal foram obtidas no comércio da cidade de Belém-PA e foram cortadas em três comprimentos diferentes: 5 mm, 10 mm e 15 mm. As fibras foram utilizadas na forma como foram adquiridas, sem tratamento superficial e em condições ambientais. Os comprimentos desejados foram obtidos através do corte manual (com tesoura) a partir dos feixes de fibra.

3.2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 – Caracterização dos Resíduos de Madeira

Os resíduos de madeira foram caracterizados quanto à sua granulometria, seu 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 figura 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 um histograma de distribuição das partículas.



Figura 5: Conjunto de peneiras padronizado utilizado para a caracterização granulométrica dos resíduos de Maçaranduba.

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 de secagem. A figura 6 ilustra o pó de maçaranduba utilizado para a produção dos compósitos.



Figura 6: Resíduo de Maçaranduba na forma de pó de lixadeira.

Os resíduos de madeira foram ainda caracterizados quanto à sua massa específica aparente. A massa específica aparente ou *bulk density* (BD) de um pó 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.

O teor de umidade das fibras de sisal foi determinado de forma análoga ao realizado para os resíduos de madeira. Foram secadas 6 amostras contendo fibras por 24 h a 105° C, monitorando-se o decréscimo da massa em função do tempo em intervalos pré-estabelecidos.

3.2.2 – Caracterização das Fibras de Sisal

As fibras de sisal (fibra técnica) foram caracterizadas quanto à sua resistência à tração, diâmetro médio, alongamento, aspecto superficial e teor de umidade.

Os ensaios de resistência à tração foram realizados em uma máquina de ensaio de tração específica para este tipo de procedimento. Foram ensaiadas 50 amostras da chamada fibra técnica, de forma a dar confiabilidade nos resultados. Complementarmente ao ensaio de tração, foi definido o diâmetro médio das fibras, por microscopia óptica, admitindo-se as fibras com uma seção circular, sendo realizadas três medidas ao longo do sentido longitudinal de 50 amostras de sisal, por microscopia óptica. A figura 7 ilustra a máquina de ensaio utilizada para determinar a resistência à tração das fibras.



Figura 7: Máquina utilizada para os ensaios de tração nas fibras de sisal.

A microestrutura das fibras foi analisada por microscopia eletrônica de varredura, onde foi verificado seu aspecto superficial e seção transversal a partir de amostras ensaiadas em tração e amostras embutidas na matriz de poliéster e preparadas segundo os procedimentos metalográficos.

A massa específica das fibras de sisal foi admitida a partir de uma média de valores encontrados por vários autores. CARVALHO (2005), determinou a massa específica das fibras de sisal por picnometria de gás hélio, chegando ao valor de $1,591 \text{ g/cm}^3$. SAVASTANO JR. (2004), utilizou os procedimentos da norma NBR 9778 e encontrou o valor de $1,387 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica de fibras de sisal usadas para a produção de *baler twine* (cordoaria). MISHRA, (2003), apresenta um valor de massa específica do sisal de $1,45 \text{ g/cm}^3$. Destes valores, definiu-se o valor médio para a massa específica da fibra de sisal em $1,48 \text{ g/cm}^3$. Na figura 8 tem-se uma ilustração das fibras de sisal utilizadas.



Figura 8: Fibras de sisal cortadas manualmente no comprimento de 5 mm para a fabricação dos compósitos.

3.2.3 – Confeção dos Corpos de Prova

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 a partir da matriz já otimizada 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 e fibras de sisal, em um becker, sendo a mistura homogeneizada por cerca de cinco minutos e vazada, à temperatura ambiente nos moldes. A figura 9 mostra o molde de silicone utilizado para a fabricação de corpos de prova de tração.

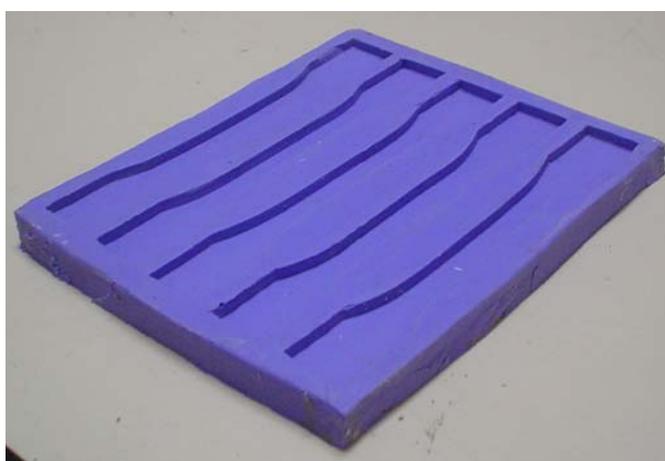


Figura 9: Molde em silicone para moldagem de corpos de prova de tração.

A fração mássica de cada tipo de reforço utilizado na fabricação dos corpos de prova desta pesquisa foi definida pela capacidade volumétrica do molde em acomodar o reforço sem pressão ou compactação e na ausência da matriz. Para cada tipo de reforço, fibra de sisal de 5, 10 e 15 mm e ainda o pó de madeira, os moldes de tração e impacto foram enchidos com o reforço até o limite de sua capacidade volumétrica, sem pressão ou vibração mecânica. Em seguida, cada reforço foi devidamente pesado e o valor da massa obtida, convertida em fração mássica, 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 de reforço híbrido, sisal/pó de madeira. Todo o procedimento foi repetido três vezes.

Estabelecidos os valores de referência para a fração mássica, foram fabricados corpos de prova para a avaliação da trabalhabilidade da mistura no estado líquido, avaliando-se sua moldabilidade e a molhabilidade da matriz sobre os reforços envolvidos, sendo ratificados os valores de referência. A partir deste procedimento, foram estabelecidas as proporções do compósito de reforço híbrido na seguinte relação sisal/pó de madeira: 75/25, 50/50 e 25/75. As proporções foram repetidas três vezes para cada um dos comprimentos da fibra de sisal escolhidos, 5, 10 e 15 mm. Na figura 10 pode-se observar corpos de prova de compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal e pó de maçanduba para ensaio de impacto Charpy. A figura 11 ilustra corpos de prova de poliéster sem reforço para ensaio de resistência à tração.



Figura 10: Corpos de prova de matriz poliéster reforçados por fibras de sisal e pó de madeira para ensaio de impacto Charpy.

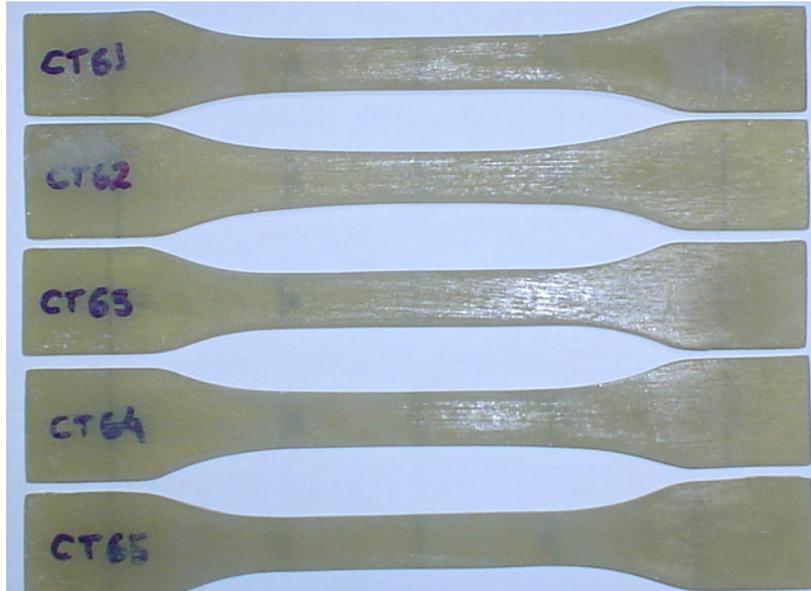


Figura 11: Corpos de prova de matriz poliéster para ensaio de tração.

3.2.4 – Ensaios de Impacto Charpy

Os ensaios de impacto foram realizados conforme os procedimentos da norma ASTM D 5942 com as dimensões de acordo com o demonstrado esquematicamente na figura 12. 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. A figura 13 ilustra um corpo de prova no porta amostra da máquina de ensaio Charpy.

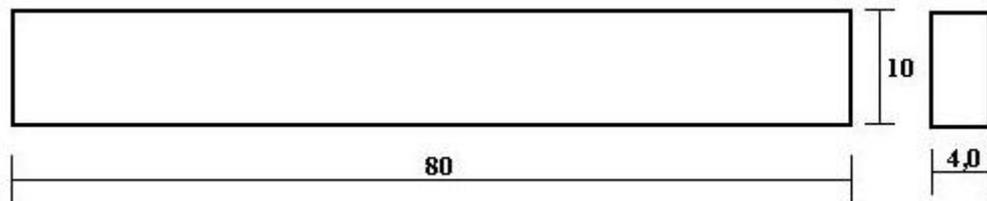


Figura 12: Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de impacto Charpy (sem escala).

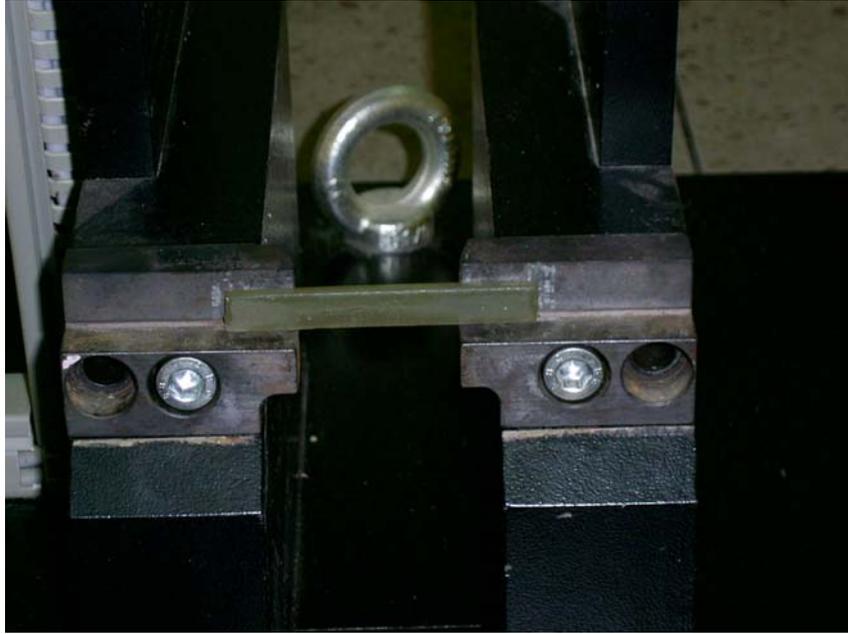


Figura 13: Corpo de prova no porta amostra da máquina de ensaio Charpy.

3.2.5 – Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D 638M e seguiram as medidas como demonstrado esquematicamente na figura 14.

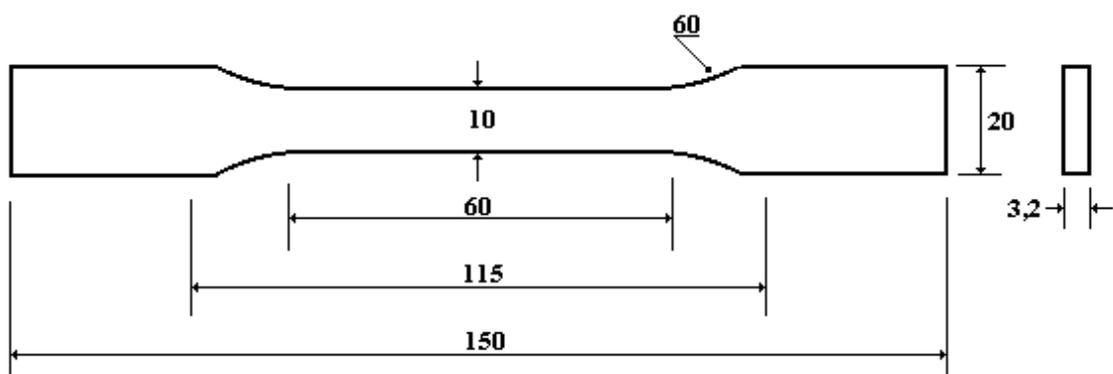


Figura 14: Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaio de tração (sem escala).

Os corpos de prova foram fabricados a partir de moldes de silicone em número mínimo de 6 para os ensaios com matriz pura, matriz reforçada com fibras

curtas, matriz com resíduos de madeira e híbridos. 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. A figura 15 ilustra a máquina de ensaio utilizada para a realização dos ensaios de resistência à tração.



Figura 15: Máquina de ensaio EMIC DL500 utilizada nos ensaios de tração.

3.2.6 - Análise das Superfícies de Fratura

Após a realização dos ensaios mecânicos, a superfície de fratura dos corpos de prova foram analisadas de forma a se estudar os mecanismos de falha de cada composição fabricada. A morfologia da superfície de fratura foi analisada por microscopia eletrônica de varredura.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE MADEIRA

A tabela 3 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).

Tabela 3: Distribuição granulométrica do pó de lixadeira da madeira Maçaranduba.

Peneira (Mesh)	Abertura (μm)	% Retido
20	850	22,63
40	425	36,22
60	250	17,55
100	150	12,09
Bandeja Coletora (BC)	0	11,51

Os dados demonstram que o pó de Maçaranduba é bastante heterogêneo, com percentuais de massa retida bastante significativos em cada peneira e bandeja coletora. O histograma demonstrado na figura 16 mostra que a maior parte da amostra, 58,85%, ficou retida nas peneiras de mesh 20 e 40.

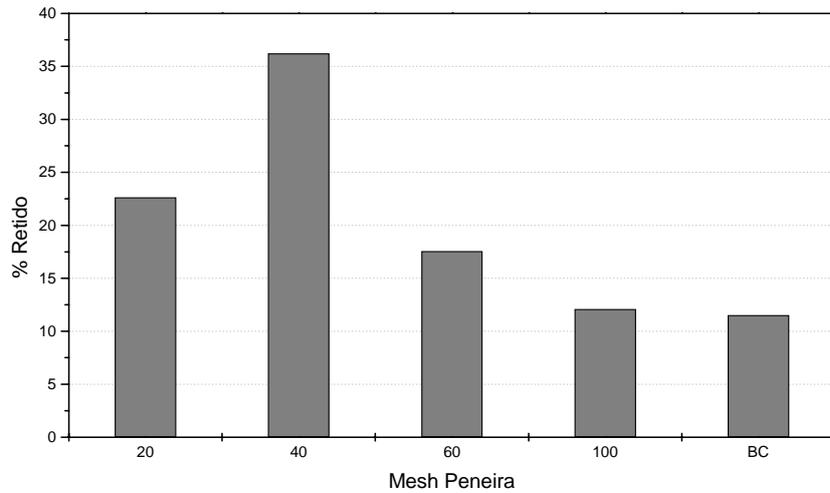


Figura 16: Histograma de distribuição granulométrica do pó de Maçaranduba.

A figura 17 apresenta a curva de distribuição granulométrica obtida através do peneiramento da amostra de Maçaranduba. A curva demonstra muito claramente a predominância de partículas na faixa de dimensões entre 425 e 850 μm , mas com quantidades significativas de massa retida nas demais peneiras, mostrando assim a heterogeneidade granulométrica da amostra.

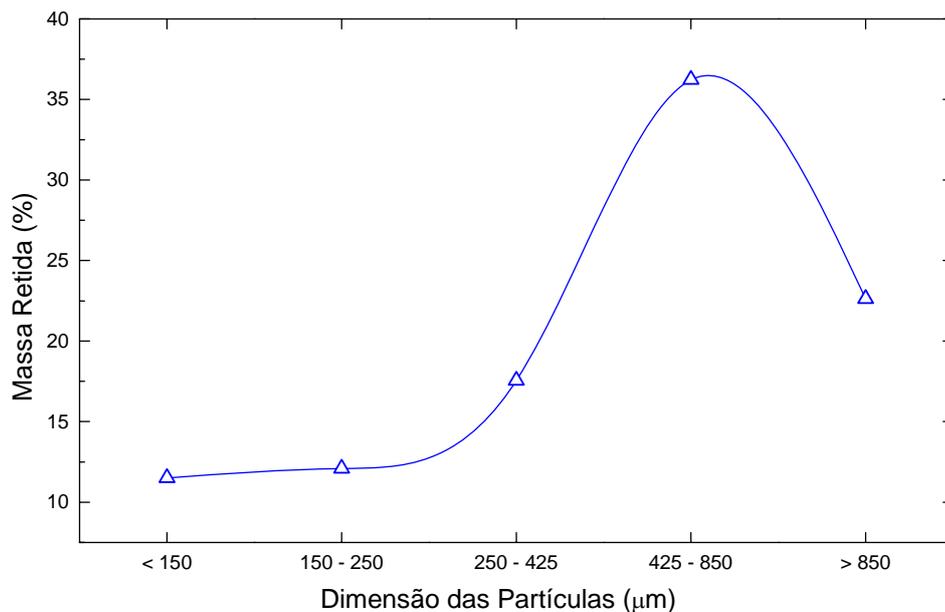


Figura 17: Curva de distribuição granulométrica do resíduo de Maçaranduba em função do percentual de massa retida nas peneiras.

A massa específica aparente, ou Bulk Density (BD), do pó de Maçaranduba foi determinada pela relação massa/volume de 3 amostras no estado não compactado. O resultado está demonstrado na tabela 4.

Tabela 4: Teor de umidade e massa específica aparente do pó de maçaranduba.

Material	Massa Específica Aparente (g/cm³)	Umidade (base úmida) (%) (Desvio Padrão)
Pó de Maçaranduba	0,23	20,02 (± 0,19)

O teor de umidade do pó 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 tabela 4. Adicionalmente foi obtida a curva de secagem para estas amostras monitorando-se o decréscimo da massa em função do tempo. O gráfico ilustrado na figura 18 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%.

O pó 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, ou seja, como produzido pelo equipamento de lixamento.

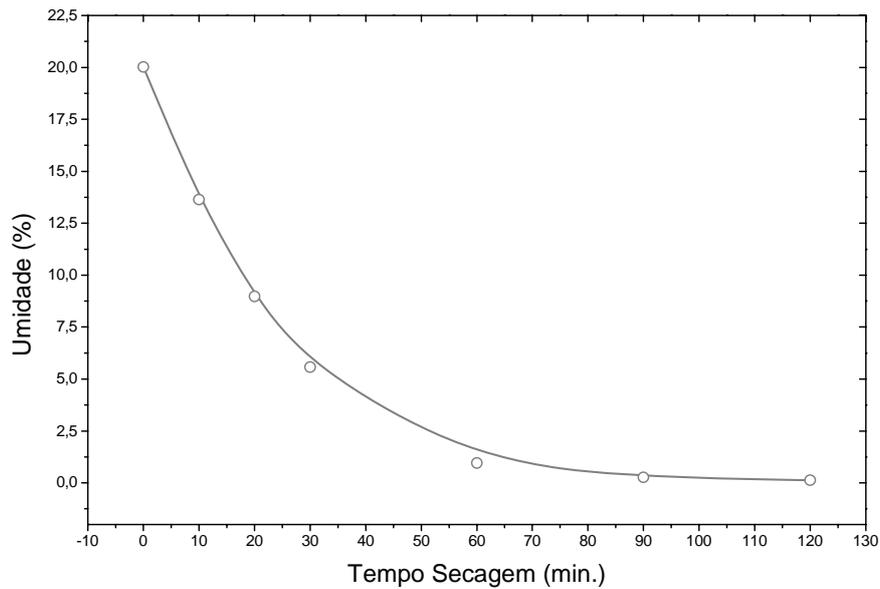


Figura 18: Curva de secagem para o pó de Maçaranduba a 105° C.

A análise do pó de madeira ao microscópio eletrônico de varredura, figura 19, mostra 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.

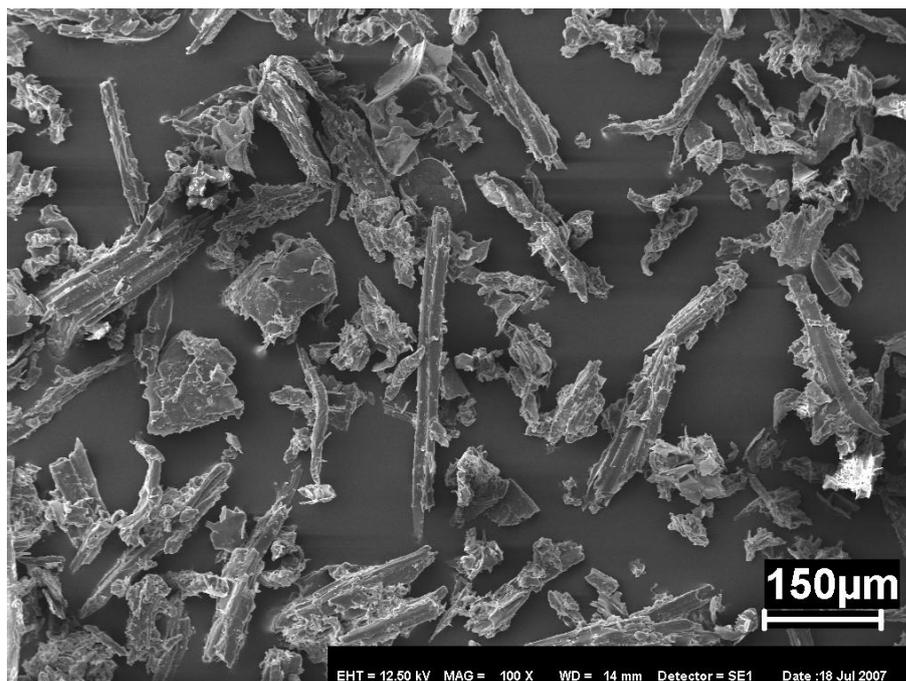


Figura 19: Morfologia dos resíduos de maçaranduba utilizados na produção dos compósitos.

4.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL

As fibras de sisal (fibra técnica) foram caracterizadas quanto à sua resistência à tração, diâmetro médio, alongamento, aspecto superficial e umidade. Os resultados estão demonstrados na tabela 5. As fibras foram caracterizadas e utilizadas na produção dos compósitos da forma como foram recebidas, sem tratamento superficial.

Tabela 5: Resultados da caracterização das fibras de sisal não tratadas.

Reforço	Diâmetro(μm)	Resist. Tração (MPa)	Alongamento (%)
	Média (Desvio Padrão)	Média (Desvio Padrão)	Média (Desvio Padrão)
Fibra de Sisal	260 (\pm 49,40)	304,55 (\pm 115,73)	5,80 (\pm 1,97)

Os resultados encontrados estão dentro da média dos valores obtidos por outros pesquisadores, listados anteriormente na tabela 2. O limite de resistência à tração foi 36% superior à média dos valores encontrados por SILVA (2003); TORRES; CUBILLAS (2005); SILVA; BELTRÃO (1999) e CARVALHO (2005). Por outro lado, foi 41% inferior à média dos valores encontrados por IDICULA et al. (2005); WAMBUA et al. (2003) e MISHRA et al. (2003), comprovando o que tem sido reportado por diversos autores sobre a variabilidade das propriedades das fibras naturais.

As propriedades em tração das fibras foram encontradas admitindo-as com uma seção circular. De forma a se comprovar essa tese, foram preparadas, seguindo os procedimentos metalográficos, amostras para serem observadas ao microscópio eletrônico de varredura. A figura 20 mostra a micrografia eletrônica de uma amostra de sisal na qual podemos verificar a geometria quase circular da seção da fibra.

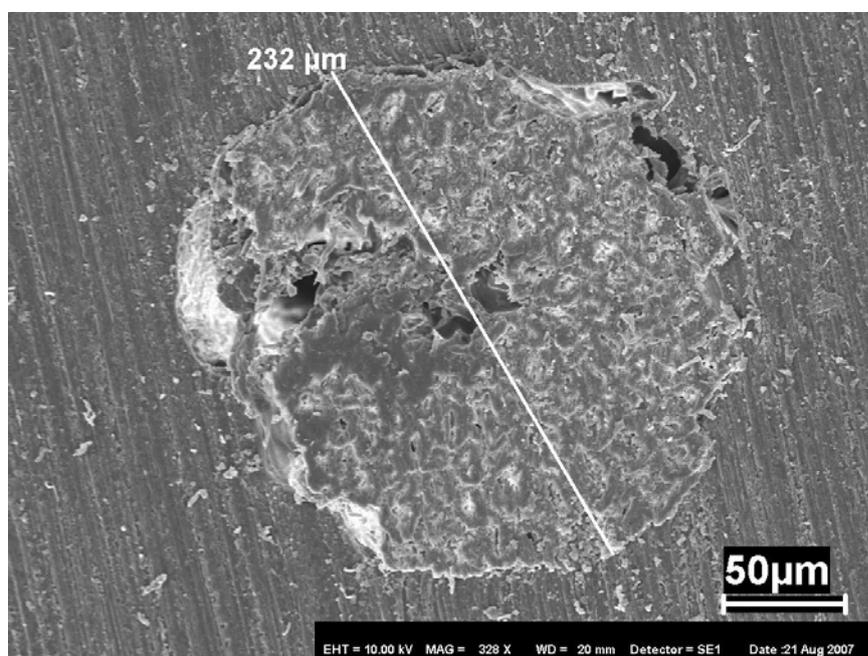


Figura 20: Seção transversal de fibra de sisal embutida na matriz de poliéster, preparada por processamento metalográfico e obtida em microscopia eletrônica de varredura.

Como foi citado anteriormente, a fibra de sisal ensaiada em tração foi a chamada fibra técnica, que na verdade é constituída por diversas fibras elementares

ligadas entre si. A figura 21 mostra a região de fratura de uma fibra de sisal ensaiada em tração, onde podemos observar as fibras elementares rompidas.



Figura 21: Aspecto da região de fratura da fibra técnica de sisal após ensaio de tração na fibra, ilustrando o rompimento das fibras elementares.

A análise do teor de umidade das fibras de sisal demonstrou que estas possuem uma umidade inicial de 12,50% em base úmida. A curva de secagem das fibras de sisal a 105° C, ilustrada na figura 22, obtida a partir da secagem de amostras com 4 gramas de massa, mostra que as fibras de sisal possuem um teor de umidade inicial mais baixo que o teor de umidade do pó de maçaranduba.

Para a produção dos compósitos foram utilizadas fibras em condições ambientais, com teor de umidade inicial de 12,50%, sem secagem ou tratamento superficial.

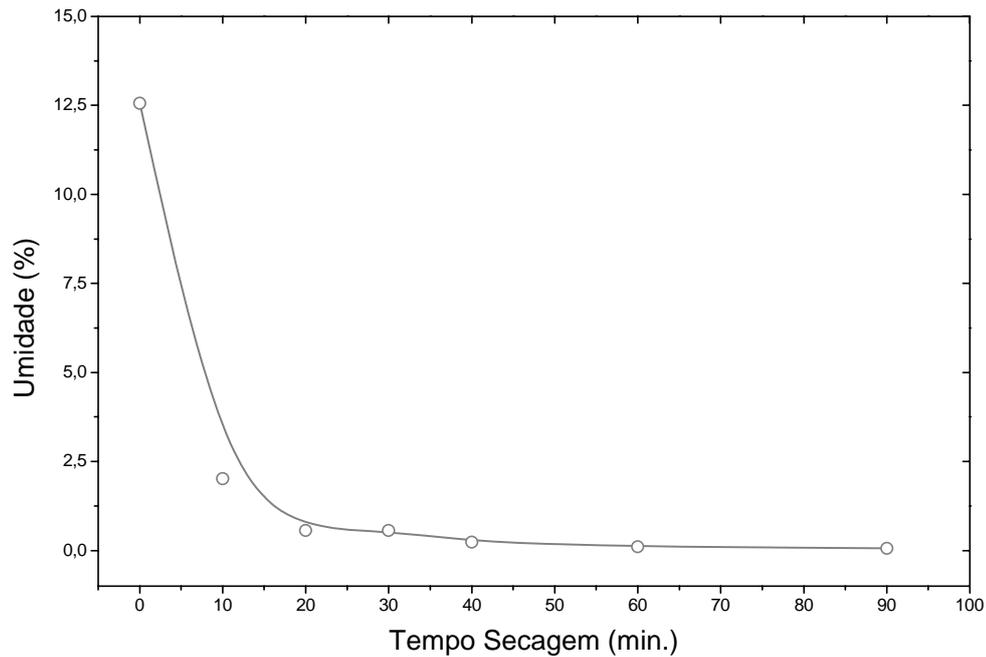


Figura 22: Curva de secagem para as fibras de sisal a 105° C.

4.3 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os compósitos produzidos bem como os corpos de prova de matriz pura foram ensaiados em tração seguindo os procedimentos descritos na norma ASTM D 638: 1996. Inicialmente foi realizada a otimização da matriz com a variação da relação, em volume, resina/agente de cura nas proporções citadas na seção 3.2.3, para os corpos de prova de matriz pura e compósitos reforçados com pó de madeira. A partir da avaliação dos resultados obtidos nos ensaios de tração foi definida a composição da matriz a ser usada para a fabricação dos compósitos fibrosos e dos híbridos. Como veremos a seguir a matriz com a menor quantidade de agente de cura, 0,33% (v/v) apresentou melhor desempenho entre as composições testadas, sendo, portanto utilizada na fabricação dos demais compósitos e como padrão de comparação entre todas as séries fabricadas.

4.3.1 – Corpos de Prova de Matriz Pura

A tabela 6 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 6: Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova de poliéster sem reforço com 0,33%, 1,66%, 3,33% e 5,00% (v/v) de agente de cura adicionado à matriz.

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

A figura 23 mostra os resultados de resistência à tração obtidos para cada composição de matriz de poliéster sem reforço em diferentes proporções de agente de cura.

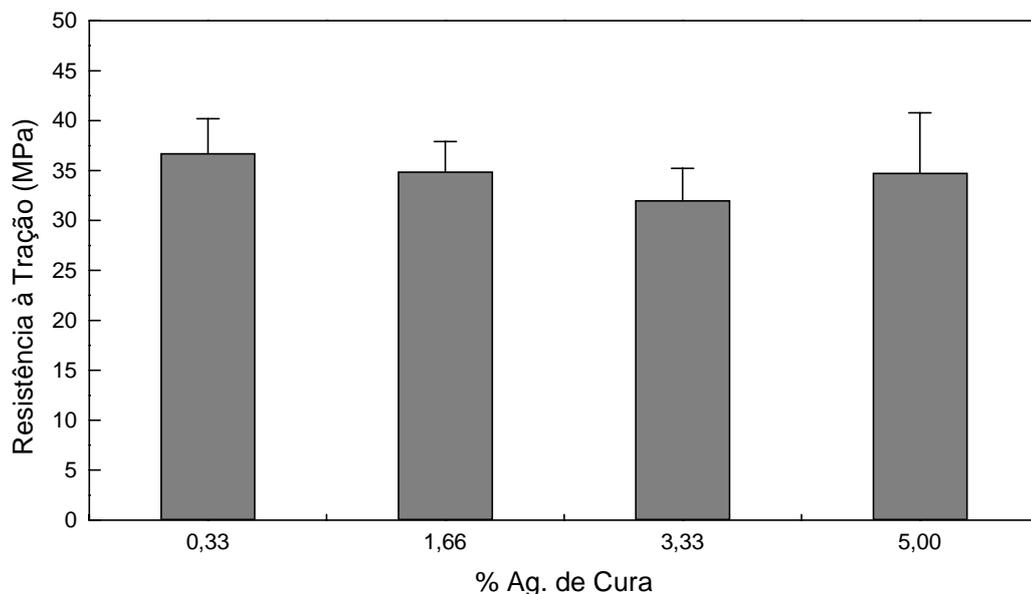


Figura 23: Resultado dos ensaios de resistência à tração de corpos de prova de matriz poliéster sem reforço com diferentes proporções de agente de cura.

A figura 23 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 figura 24 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).

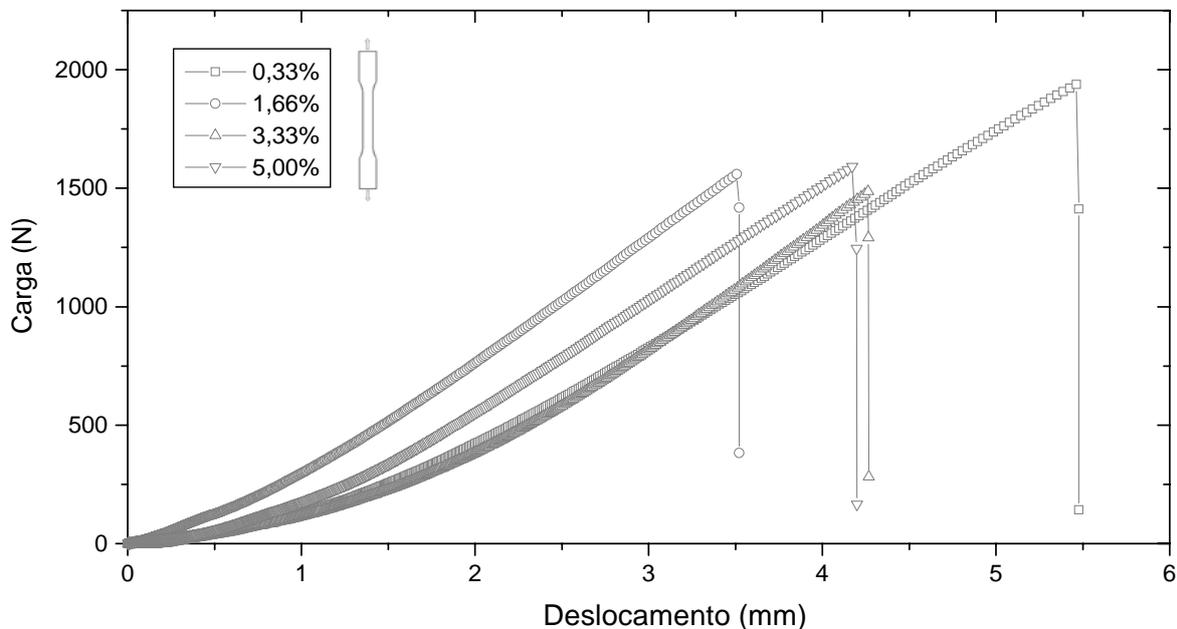


Figura 24: Curvas força versus deslocamento de corpos de prova característicos de poliéster sem reforço com diferentes proporções agente de cura/resina, em volume.

As curvas apresentadas na figura 24 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 figura 25, 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 figura 25(a) podemos observar a micrografia eletrônica de uma amostra da série com 0,33% agente de cura, isenta de bolhas; já a micrografia mostrada na figura 25(b), 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.

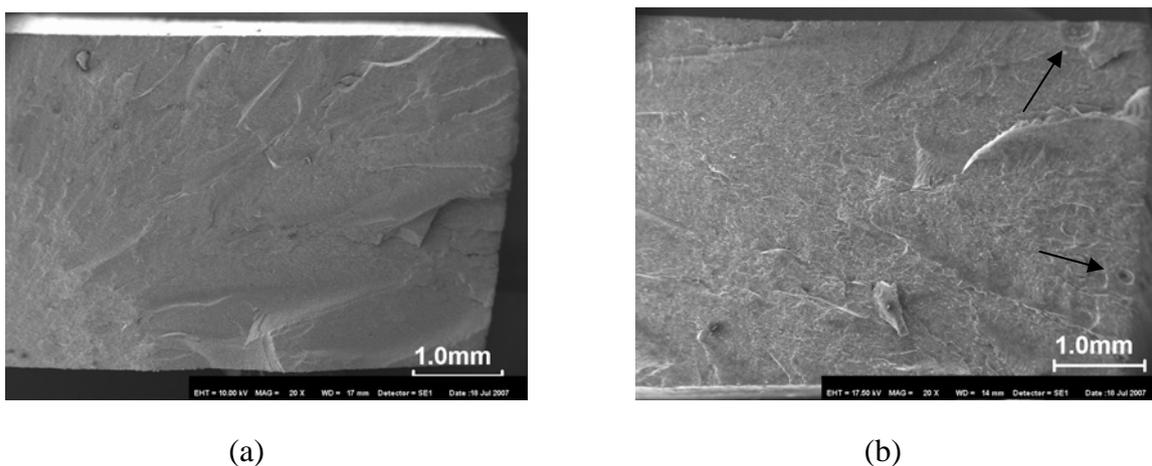


Figura 25: Micrografias eletrônicas dos corpos de prova (CP) de poliéster sem reforço. (a) CP com 0,33% (v/v) de agente de cura. (b) CP com 3,33% (v/v) de agente de cura. As setas em (b) mostram bolhas geradas no processo de cura do polímero

4.3.2 – Compósitos Reforçados com Pó de Maçaranduba

A tabela 7 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração nos compósitos reforçados com pó de maçaranduba.

Tabela 7: Resultado dos ensaios de tração dos compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba com 9,64%, em massa de madeira.

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

Os resultados, demonstrados na tabela 7 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 figura 26 mostra a comparação entre os resultados obtidos para os compósitos reforçados com pó de maçaranduba e os corpos de prova de poliéster sem reforço. 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.

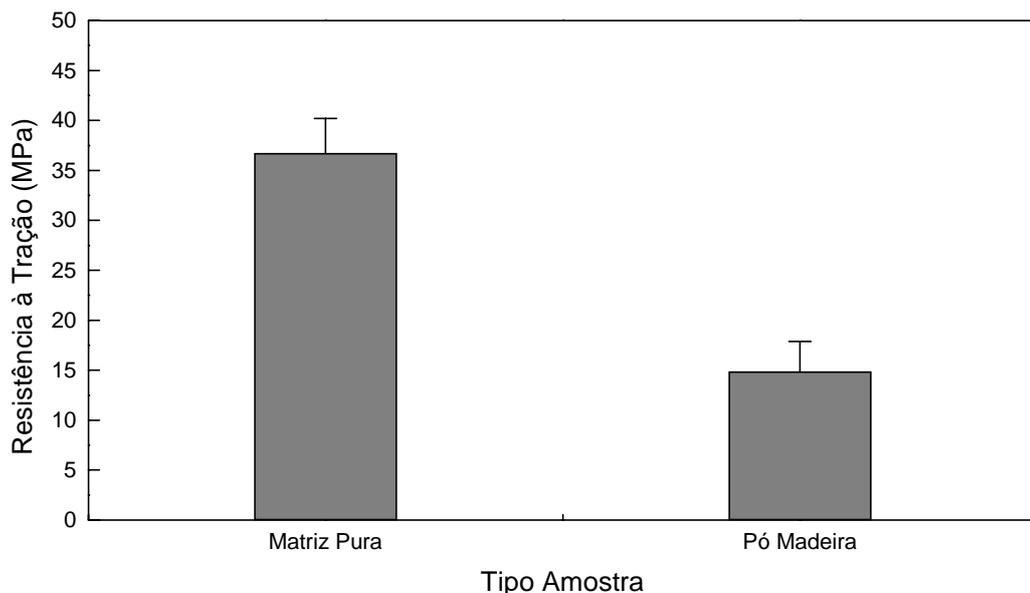


Figura 26: Resultado comparativo dos ensaios de resistência à tração de amostras de poliéster sem reforço (matriz pura) e compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba.

A figura 27 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.

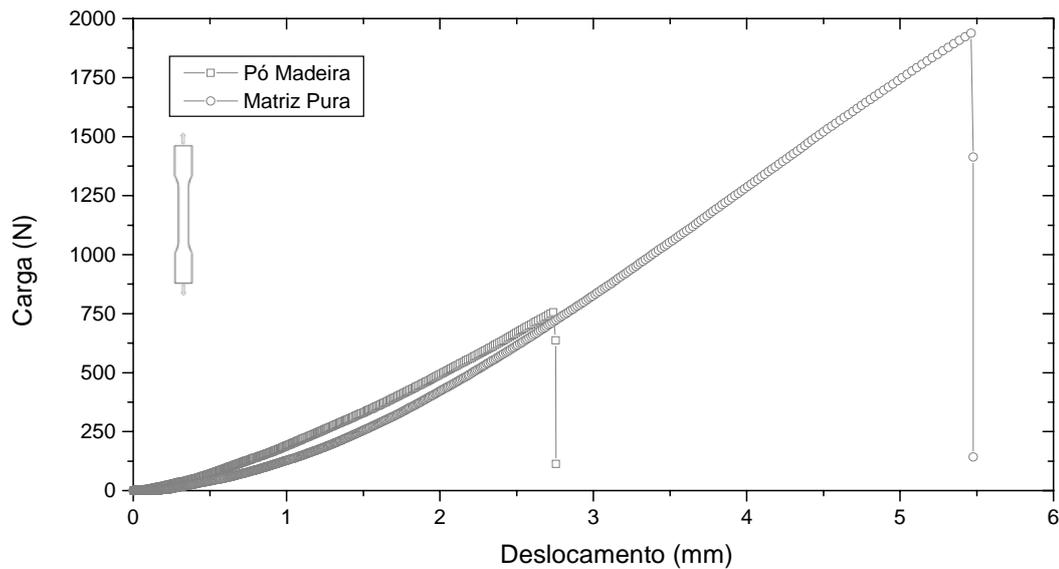


Figura 27: Curvas força versus deslocamento de corpo de prova típico de compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba comparado com uma amostra de poliéster sem reforço.

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, já discutida na seção 4.1, 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; JOSEPH; 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 figura 28. 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 figura 29, 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.

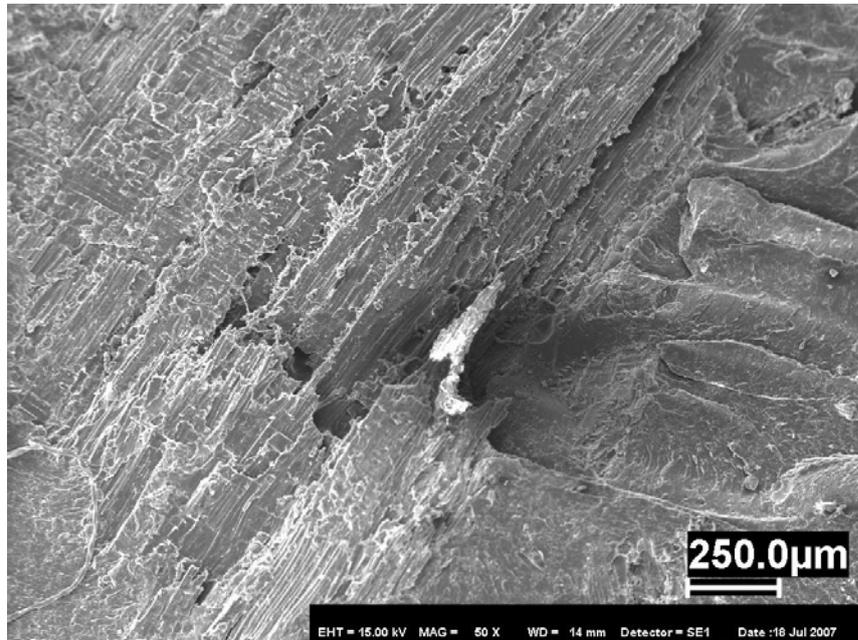


Figura 28: Micrografia eletrônica de compósito poliéster reforçado com resíduos de maçaranduba. Pode-se observar a delaminação do resíduo de madeira.

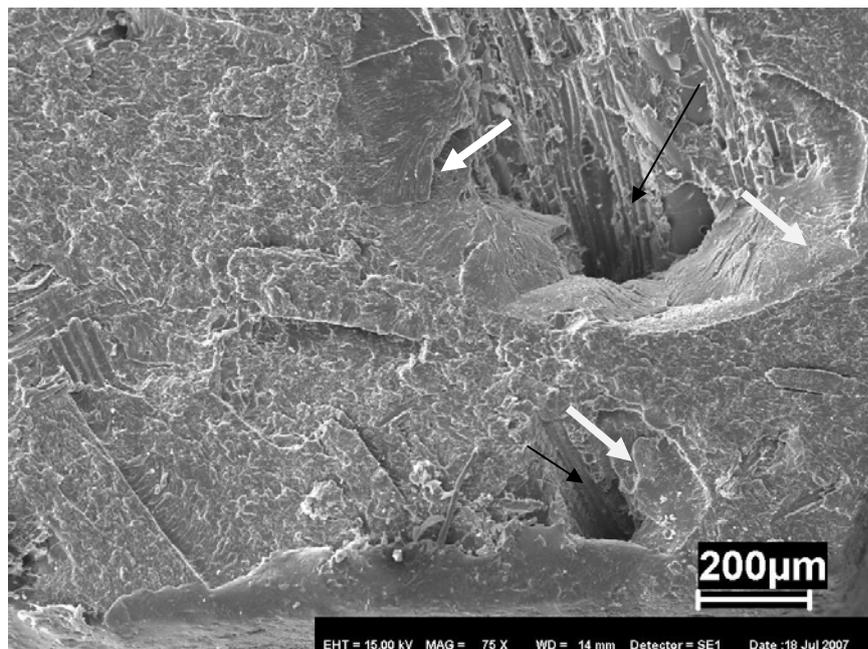


Figura 29: Micrografia eletrônica de compósito poliéster reforçado com resíduos de maçaranduba. As setas pretas indicam o pull out parcial das fibras de madeira e as brancas a região onde a matriz falhou.

4.3.3 – Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal

A tabela 8 mostra os resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos poliéster reforçados com fibras de sisal nos comprimentos de 5, 10 e 15 mm.

Tabela 8: Resultado dos ensaios de tração dos compósitos poliéster reforçado com fibras de sisal de 5, 10 e 15 mm, dispostas aleatoriamente.

Reforço	F. Mássica Reforço (P_f) (%)	Resist. Tração(σ) (MPa) Média (Desvio Padrão)
Sisal 5 mm	5,41	15,27 ($\pm 0,91$)
Sisal 10 mm	4,87	23,48 ($\pm 2,11$)
Sisal 15 mm	3,90	26,16 ($\pm 2,15$)

O gráfico ilustrado na figura 30 mostra um comparativo entre os resultados obtidos com o aumento do comprimento das fibras de sisal. As propriedades mecânicas em tração obtidas pelas amostras sem reforço, ou seja, matriz pura (MP), estão representadas por uma linha horizontal. Os dados indicam que a resistência do compósito produzido aumentou com o aumento do comprimento da fibra, confirmando o que tem sido reportado por outros pesquisadores. Apesar da melhoria das propriedades do compósito com o aumento do comprimento da fibra, o compósito reforçado com fibras de 15 mm teve desempenho 28% inferior à matriz pura, o que provavelmente ocorreu pela concentração de tensão que ocorre na ponta das fibras, nucleando trincas. Nos compósitos com fibras curtas, a maior concentração de tensão ao longo da interface fibra/matriz ocorre nas extremidades das fibras e quanto menor o comprimento das fibras, maior o número destas extremidades, o que acarreta depreciação das propriedades mecânicas de tração do compósito (SILVA, 2003).

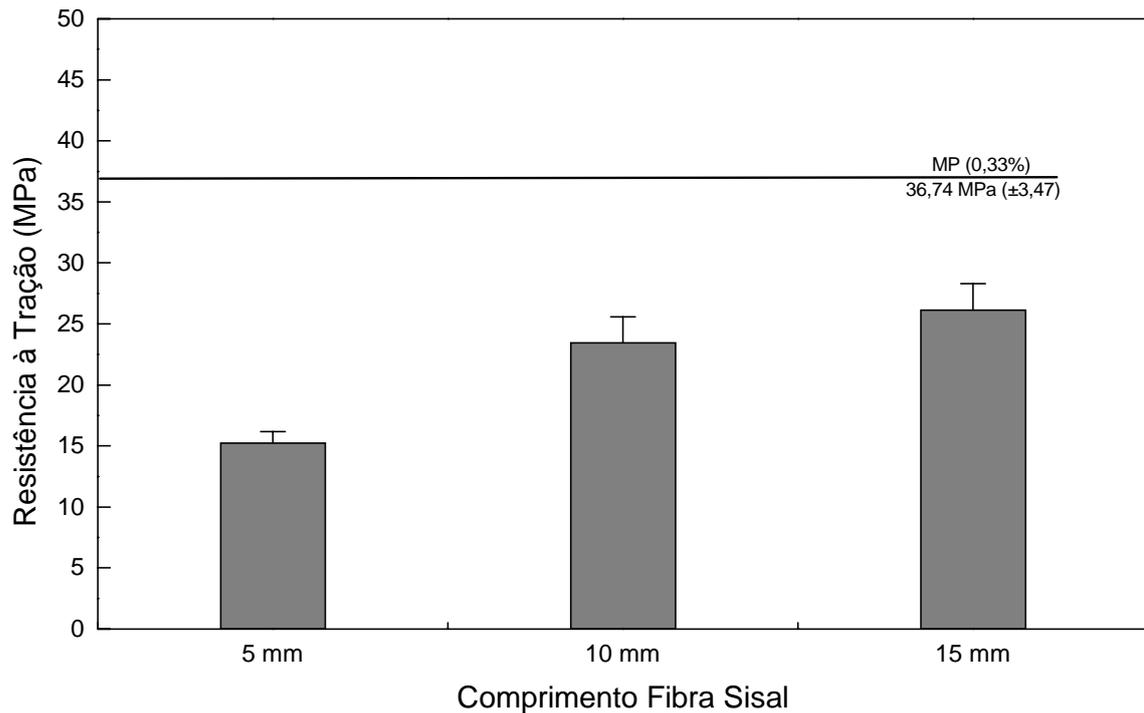


Figura 30: Resultado comparativo dos ensaios de resistência à tração de compósitos de matriz poliéster reforçado por fibras de sisal. A linha horizontal representa o comportamento em tração obtido para as amostras sem reforço (MP).

A figura 31 ilustra o comportamento típico carga versus deslocamento de corpos de prova característicos das séries de compósitos reforçadas por fibras de sisal fabricados. Nele podemos observar que os compósitos reforçados com fibras de 10 e 15 mm obtiveram desempenho semelhante, enquanto que os reforçados com fibras de 5 mm tiveram desempenho significativamente inferior.

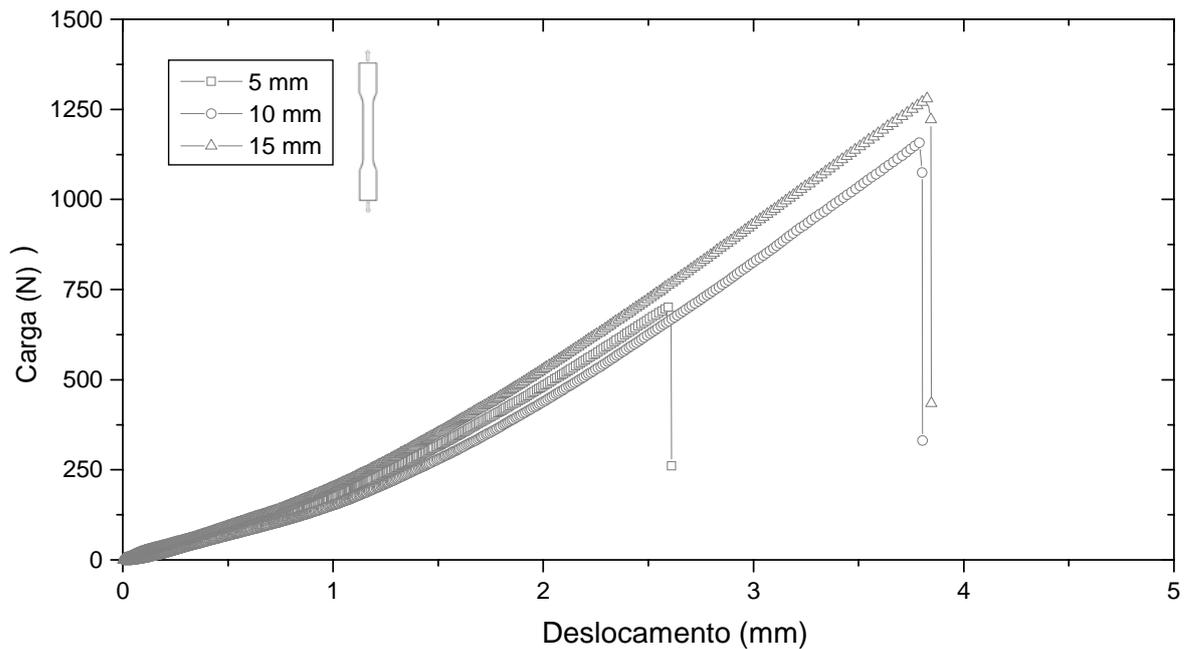


Figura 31: Curvas força versus deslocamento de corpos de prova característicos de compósitos poliéster reforçado com fibras de sisal.

A figura 32 mostra a micrografia de um compósito poliéster reforçado por fibras de sisal de 5 mm. Podem-se observar pontas de trinca que nuclearam uma trinca que se propagou ao longo da seção do corpo de prova, o que pode ser comprovado pela observação das estrias que irradiam da ponta das fibras. A presença de resina no topo da seção das fibras comprova que estas não foram rompidas, se tratando conseqüentemente de extremidades.

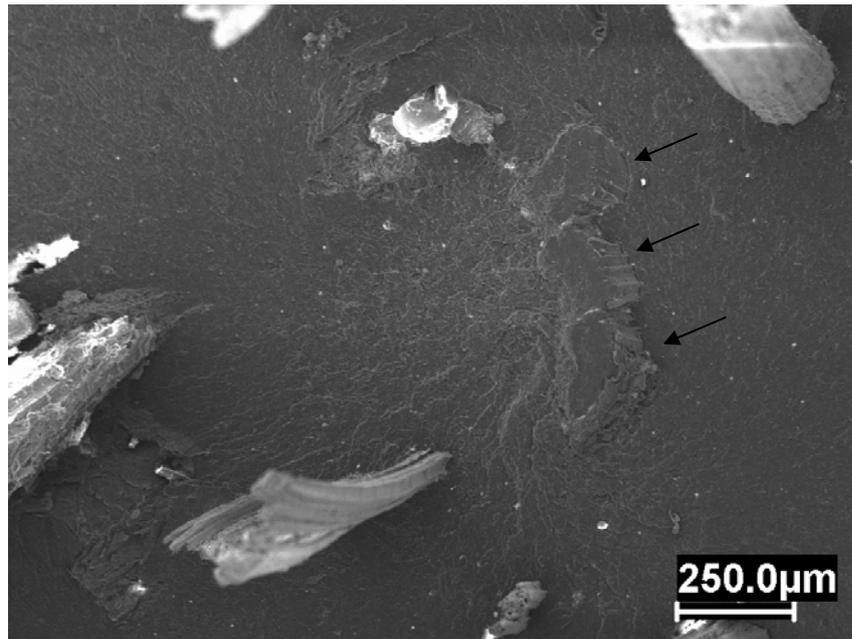


Figura 32: Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm. As setas indicam a ponta das fibras que provavelmente nuclearam uma trinca.

O principal fator que contribuiu para reduzir o desempenho dos compósitos com sisal 5 mm foi a baixa adesão na interface fibra/matriz, como pode ser comprovado pela análise da figura 33. Na figura 34 podemos observar que o mecanismo de falha dominante no compósito foi o pull out, evidenciando também a baixa adesão fibra/matriz. A presença de fibras dispostas na matriz transversalmente à direção do carregamento é outro fator importante que contribui para a redução do desempenho do compósito, como reportado por SILVA (2003), atuando negativamente na resistência do compósito. Com o aumento do comprimento das fibras, o efeito de reforçamento foi mais efetivo e a resistência do compósito aumentou. A figura 35, mostra um compósito reforçado com fibras de 15 mm onde podemos observar que apesar de o mecanismo de pull out ainda ser recorrente, começamos a perceber a presença de fibras rompidas próximo ao plano de propagação da trinca.

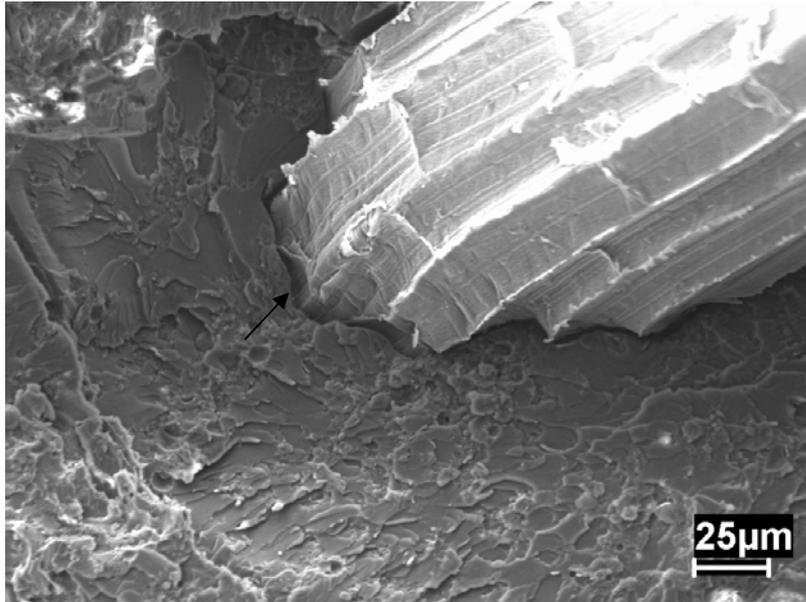


Figura 33: Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm. A seta indica a região em que a fibra descolou da matriz.

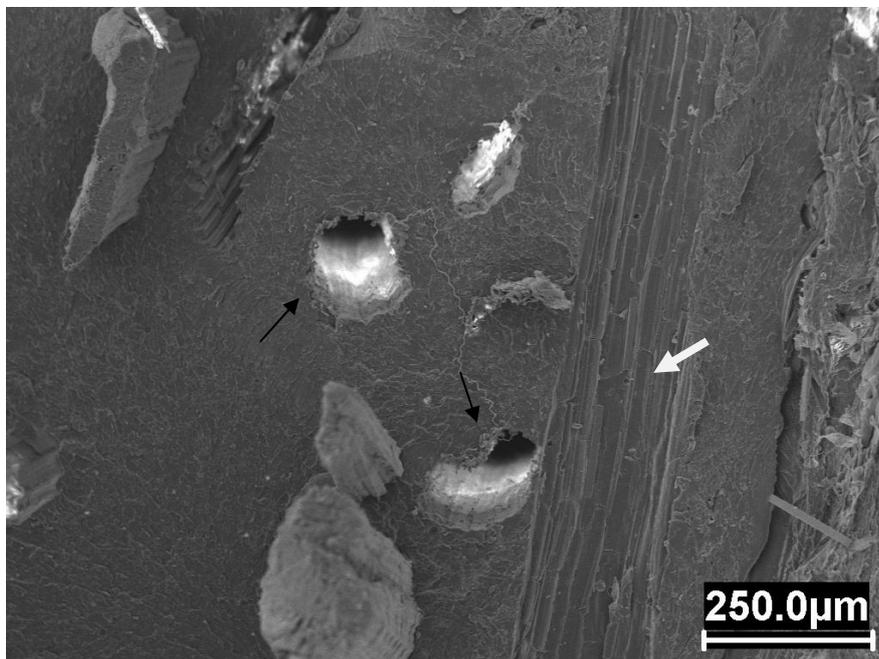


Figura 34: Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm. As setas pretas indicam pull out de fibras e a branca o descolamento de uma fibra transversal.

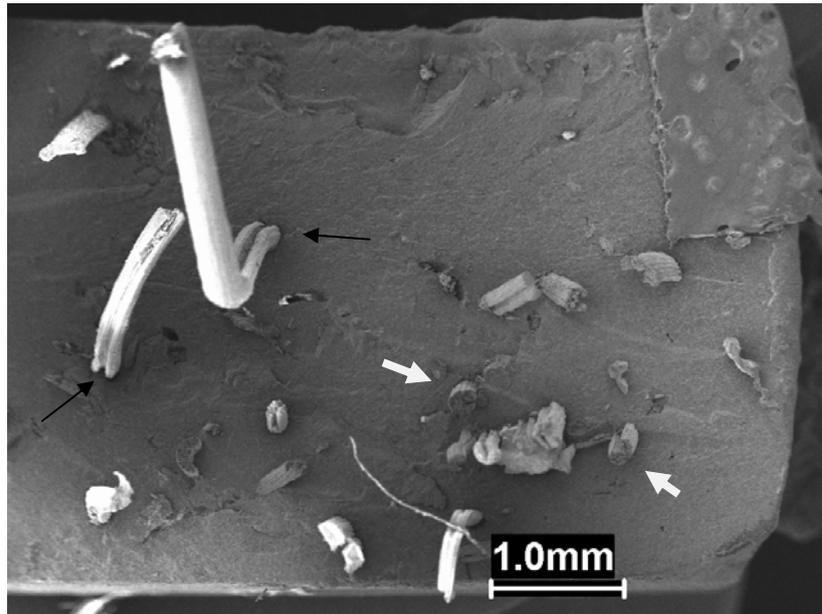


Figura 35: Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm. As setas pretas indicam fibras que sacaram da matriz (pull out) e as brancas fibras rompidas.

Esses resultados são equivalentes aos encontrados na literatura. KURUVILLA; MEDEIROS; CARVALHO, (1999), produziram placas por moldagem sobre pressão (266,67 tf/m² por 8 horas) pós curadas por 8 hs a 80° C de matriz poliéster reforçados por fibras de sisal lavadas com água e secas ao ar, variando os comprimentos da fibra de 5 a 75 mm e as frações mássicas de 0 a 60%. Obtiveram compósitos com resistência à tração de 26,68 MPa, para as fibras de 5 mm, e 37,25 MPa para os compósitos com fibras de 15 mm, ambos com 30% em massa de fibra. Esses resultados são apenas 55%, em média, superiores aos resultados alcançados neste trabalho, o que pode ser considerado bastante satisfatório, considerando que a fração mássica das fibras nos compósitos fibrosos não chegou a 6% neste trabalho, e ainda o fato de que KURUVILLA; MEDEIROS; CARVALHO (1999), terem alcançado um incremento de 72% em relação à sua matriz pura, com o aumento da fração mássica das fibras até 50%, dando um indicativo de que trabalhando com frações mássicas maiores, pode-se superar o desempenho apresentado pela matriz, neste trabalho.

4.3.4 – Compósitos Híbridos Sisal 5 mm / Pó de Maçaranduba

A tabela 9 mostra os resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos híbridos poliéster reforçados com fibras de sisal 5 mm e pó de madeira.

Tabela 9: Resultado dos ensaios de tração dos compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm e pó de maçaranduba.

Tipo Amostra	Proporção entre Reforços (%)	F. Mássica Reforço (P_f)		Resist. Tração(σ) (MPa)
		Fibra/pó de mad.	Sisal	Madeira
Comp. Híbrido Sisal 5mm/Pó Maçaranduba	(75/25)	4,07	2,40	17,35 (\pm 1,73)
	(50/50)	2,72	4,80	17,57 (\pm 1,33)
	(25/75)	1,36	7,22	16,92 (\pm 2,62)

A análise do gráfico ilustrado na figura 36 indica que, como já verificado na seção anterior, as fibras de sisal com comprimento de 5 mm tem pouca efetividade no reforçamento do compósito, atuando normalmente como defeito. Assim sendo, os compósitos híbridos com fibras de sisal de 5 mm/madeira obtiveram desempenho muito próximo do apresentado pelos compósitos reforçados por pó de madeira, com acréscimo médio no desempenho de 16%, em relação ao último, com a mesma composição (0,33% ag. cura) que pode ser credenciado à presença das fibras. Já em relação ao compósito reforçado com fibras de sisal de 5 mm, o híbrido teve desempenho incrementado em 13%. Os dados indicam que o compósito híbrido sisal/pó de maçaranduba obteve desempenho superior ao alcançado pelos compósitos fabricados utilizando os reforços individualmente.

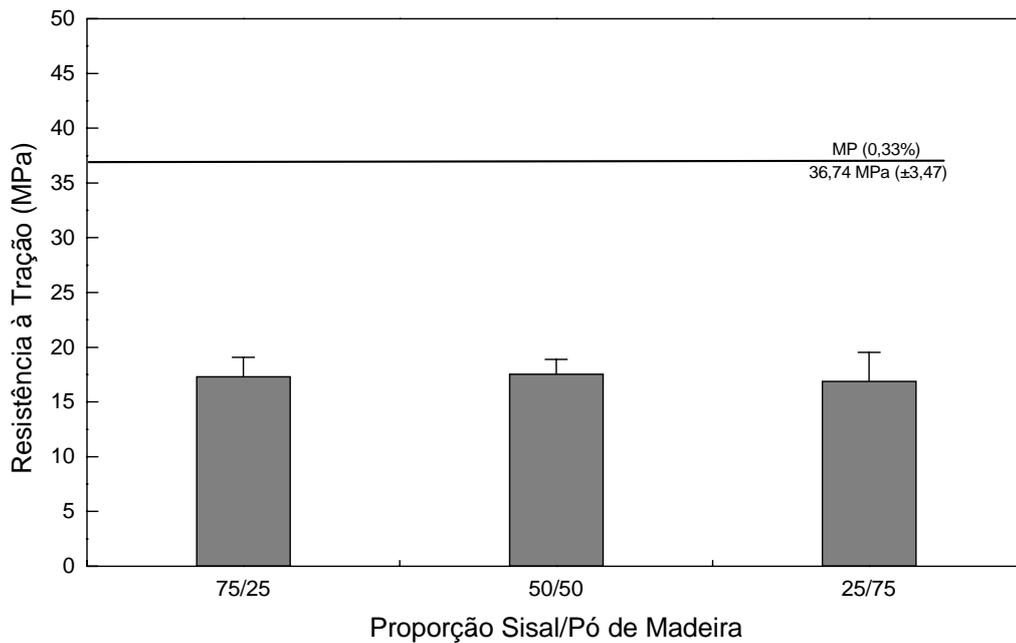


Figura 36: Resultado dos ensaios de resistência à tração de compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal e pó de maçaranduba. A linha horizontal representa o comportamento em tração obtido para as amostras sem reforço (MP).

A figura 37 ilustra o comportamento típico carga versus deslocamento de corpos de prova característicos das séries de compósitos híbridos sisal 5 mm / pó de maçaranduba. Nele podemos observar que as três séries fabricadas apresentaram comportamentos semelhantes entre si quanto ao nível de carregamento máximo em tração e alongamento. Como era esperado, quanto maior a proporção de fibra inserida no híbrido, menor foi a deformação sofrida pelo compósito.

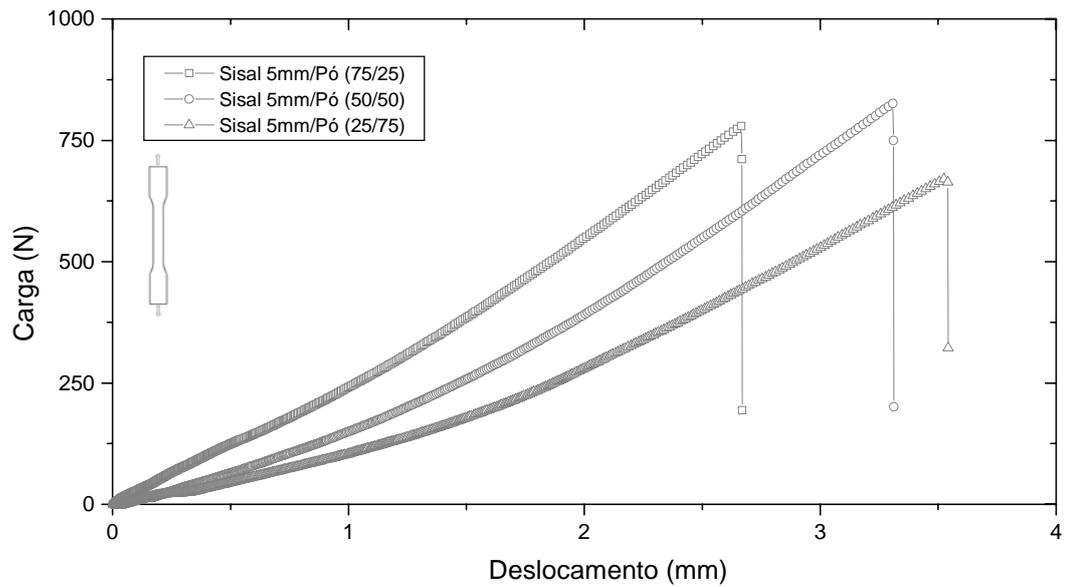


Figura 37: Curvas força versus deslocamento de corpos de prova característicos de compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm e pó de maçaranduba.

A figura 38 mostra uma micrografia eletrônica de um compósito de reforço híbrido sisal 5 mm / pó de maçaranduba. Pode-se observar que a superfície de fratura mostra os mesmos mecanismos de falha apresentados pelos compósitos reforçados com sisal 5 mm e com pó de maçaranduba, individualmente, pull out pronunciado das fibras e arrancamento dos resíduos de madeira.

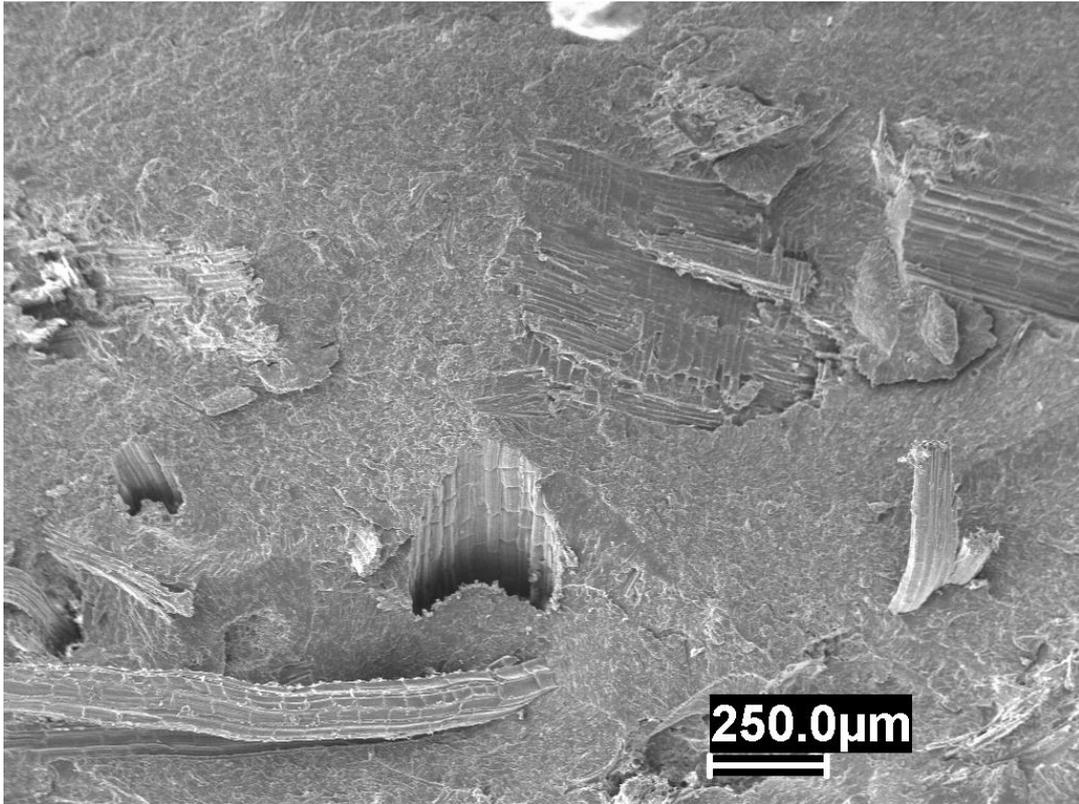


Figura 38: Superfície de fratura de compósito híbrido poliéster reforçado com fibras de sisal 5 mm / pó de maçaranduba.

4.3.5 – Compósitos Híbridos Sisal 10 mm / Pó de Maçaranduba

A tabela 10 apresenta os resultados obtidos para os compósitos de reforço híbrido sisal 10 mm / pó de maçaranduba. Os dados mostram que a resistência do compósito caiu na medida em que diminuiu a proporção de fibra. O compósito com maior teor de fibra (75/25), obteve um desempenho 14,50% superior ao compósito em que os reforços foram equivalentes (50/50) e este foi 25,30% superior ao compósito com menor teor de fibra (25/75). O gráfico ilustrado na figura 39 mostra os resultados do ensaio de resistência à tração dos compósitos híbridos sisal 10 mm / pó de maçaranduba. A exemplo do que aconteceu nos compósitos reforçados com sisal, os híbridos com fibras de 10 mm já apresentam uma melhoria na capacidade de reforçamento da fibra, elevando a resistência do compósito em 23%, considerando a série de melhor desempenho, em relação ao melhor desempenho obtido na série do híbrido com sisal 5 mm.

Tabela 10: Resultado dos ensaios de tração dos compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 10 mm e pó de maçaranduba.

Tipo Amostra	Proporção entre Reforços (%)	F. Mássica Reforço (P_f)		Resist. Tração(σ) (MPa)
		Fibra/pó de mad.	Sisal	Madeira
Comp. Híbrido Sisal 10mm/Pó Maçaranduba	(75/25)	3,66	2,40	21,58 (\pm 1,78)
	(50/50)	2,44	4,80	18,84 (\pm 1,43)
	(25/75)	1,22	7,21	15,03 (\pm 1,54)

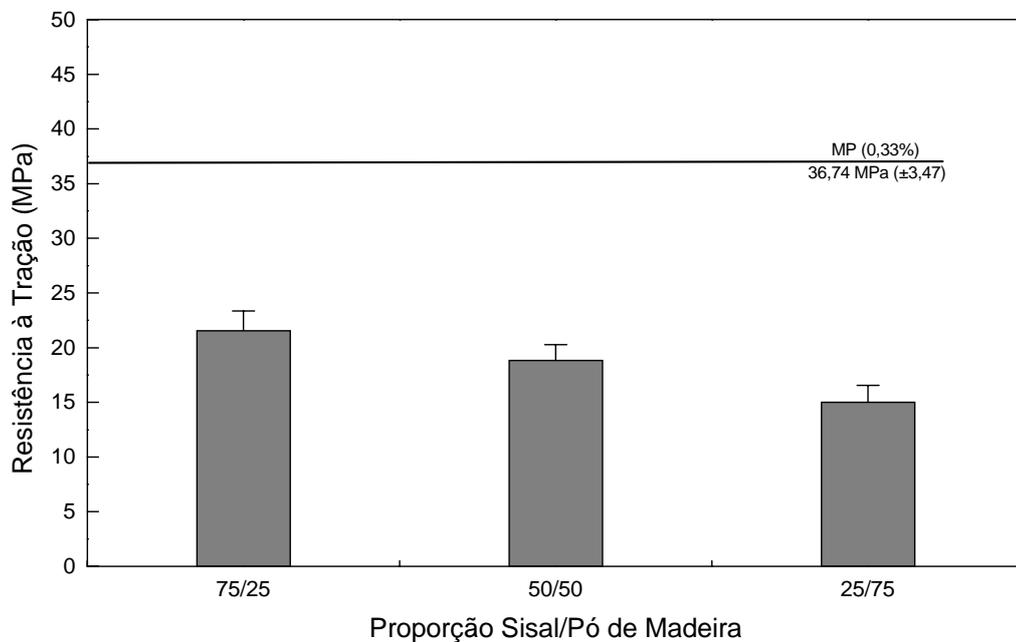


Figura 39: Resultado dos ensaios de resistência à tração de compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 10 mm e pó de maçaranduba. A linha horizontal representa o comportamento em tração obtido para as amostras sem reforço (MP).

O híbrido sisal 10 mm / pó de composição 75/25, apesar de possuir somente 75% da fração mássica de fibra do compósito reforçado com fibras de sisal de 10 mm, apresentou uma redução de apenas 8,10% em sua resistência à tração, demonstrando que para esta composição (75/25) e com este comprimento de fibra, o efeito de reforçamento da fibra é preponderante sobre os efeitos causados pelo pó

de maçaranduba. A figura 40 ilustra a curva típica carga versus deslocamento de corpos de prova característicos de cada série fabricada com reforço híbrido sisal 10 mm / pó de maçaranduba.

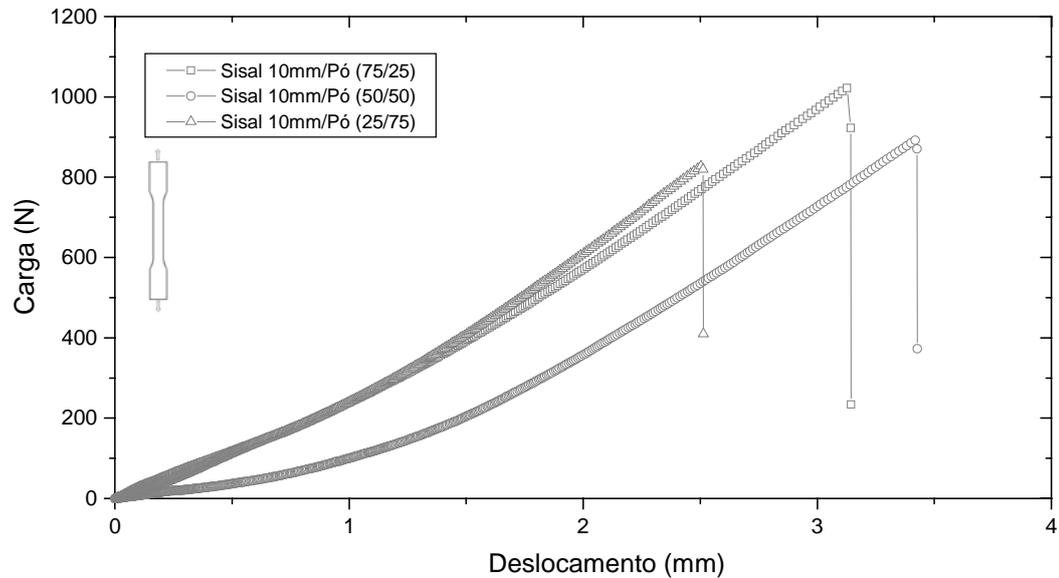


Figura 40: curva carga versus deslocamento de corpos de prova característicos de cada série fabricada com reforço híbrido sisal 10 mm / pó de maçaranduba.

A avaliação das superfícies de fratura desta série de compósitos híbridos mostrou que os mecanismos de falha apresentados são análogos aos encontrados nos compósitos reforçados com sisal de 10 mm, e nos compósitos reforçados com pó de maçaranduba, apresentando pull out pronunciado das fibras, como pode ser observado na figura 41.

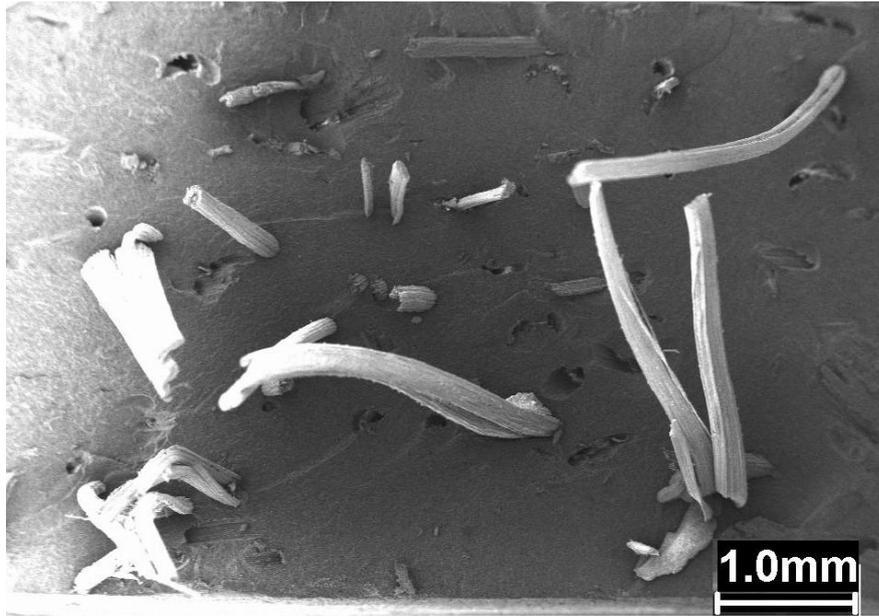


Figura 41: Superfície de fratura de compósito híbrido poliéster reforçado com fibras de sisal 10 mm e pó de maçaranduba.

4.3.6 – Compósitos Híbridos Sisal 15 mm / Pó de Maçaranduba

A tabela 11 apresenta os resultados obtidos para os compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm e pó de maçaranduba. Os dados mostram que o desempenho em tração alcançados por esta série são muito semelhantes aos resultados obtidos na série anterior, com os mesmos níveis de resistência e deformação. A resistência dos compósitos, análogo ao que aconteceu nos híbridos com sisal 10 mm, caiu com a diminuição da proporção de fibra inserida na matriz. A composição com maior proporção de fibras (75/25) apresentou resultados 19,40% superiores à composição 50/50, e esta foi apenas 1,37% mais resistente que a composição 25/75.

Tabela 11: Resultado dos ensaios de tração dos compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm e pó de maçaranduba.

Tipo Amostra	Proporção entre Reforços (%)	F. Mássica Reforço (P_f)		Resist. Tração(σ) (MPa)
		Fibra/pó de mad.	Sisal	Madeira
Comp. Híbrido Sisal 15mm/Pó Maçaranduba	(75/25)	2,93	2,40	21,62 (\pm 2,17)
	(50/50)	1,96	4,80	18,11 (\pm 1,14)
	(25/75)	0,98	7,21	17,87 (\pm 1,21)

A figura 42 apresenta graficamente os resultados de resistência à tração alcançados pelos compósitos híbridos com sisal 15 mm / pó de maçaranduba, onde podemos observar que, diferentemente da série anterior, não houve diferença significativa entre a composição 50/50 e a composição 25/75. A figura 43 ilustra a curva carga versus deslocamento de corpos de prova característicos cada uma das séries fabricadas com reforço híbrido sisal 15 mm / pó de maçaranduba.

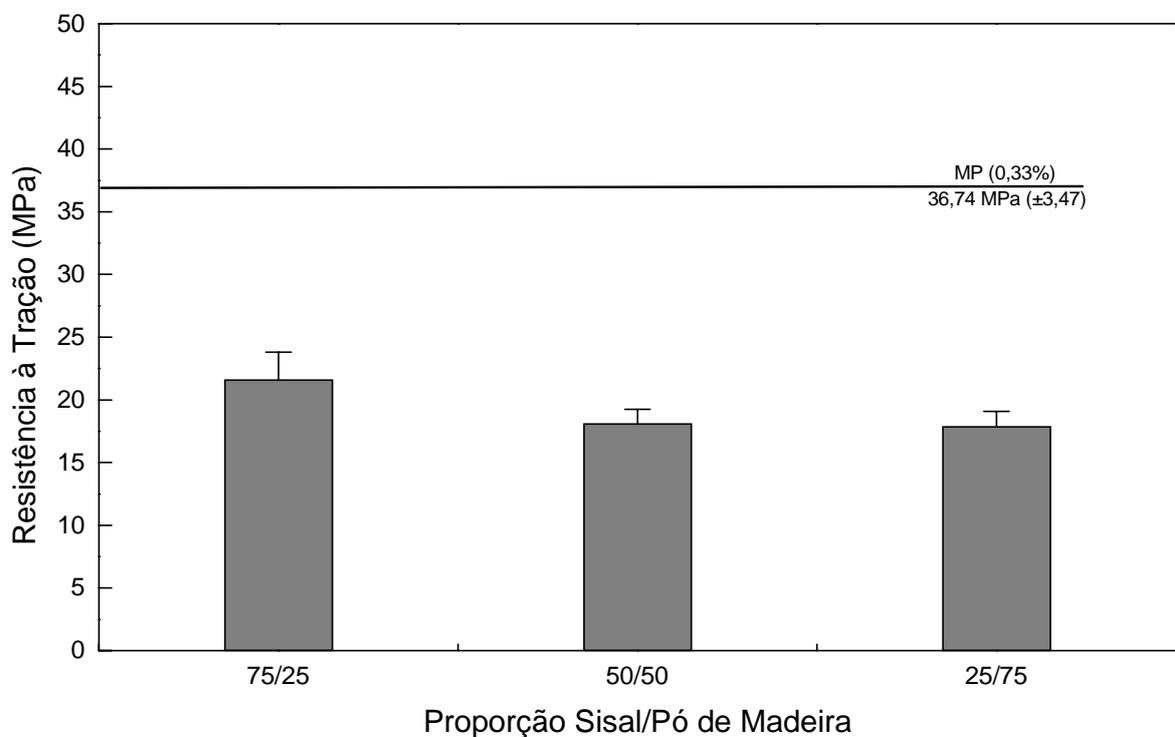


Figura 42: Resultado dos ensaios de resistência à tração de compósitos híbridos poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm e pó de maçaranduba. A linha horizontal representa o comportamento em tração obtido para as amostras sem reforço (MP).

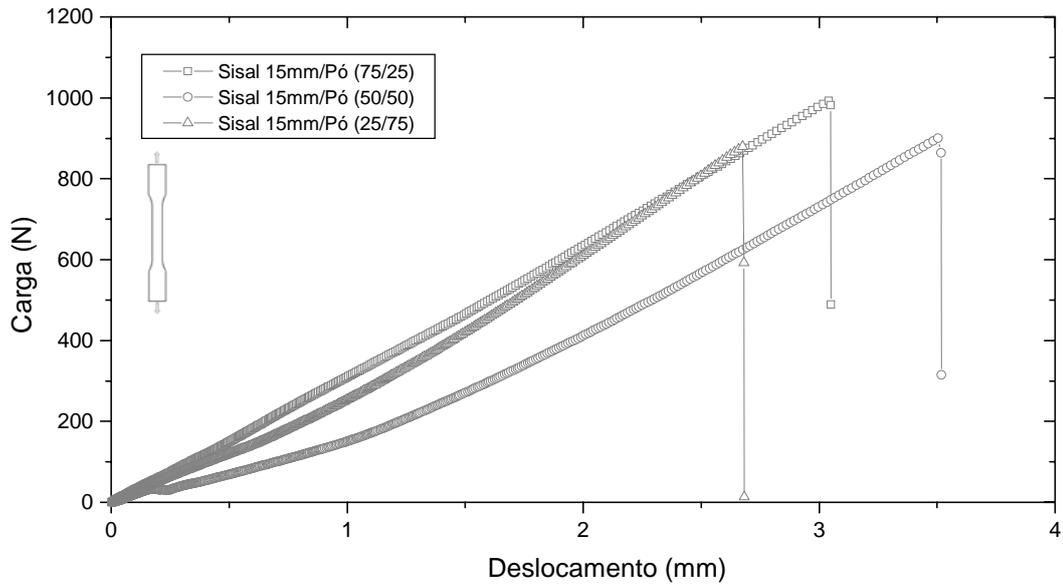


Figura 43: curva carga versus deslocamento de corpos de prova característicos de cada série fabricada com reforço híbrido sisal 15 mm / pó de maçanduba.

A análise das superfícies de fratura mostra que apesar de o mecanismo de falha dominante do compósito ainda ser o pull out, já podemos observar fibras rompidas, indicando uma maior efetividade do reforço. Na figura 44 podemos observar uma fibra de fraturou próximo ao plano de propagação da trinca.

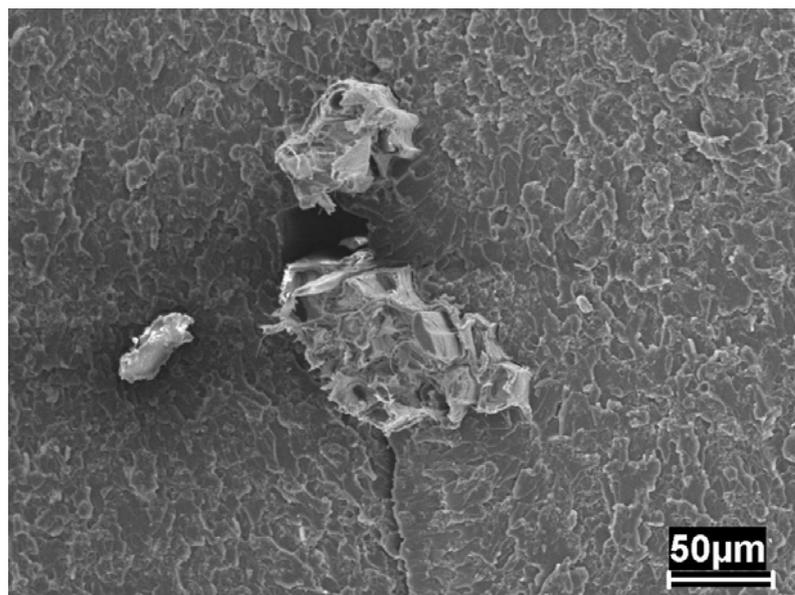


Figura 44: Superfície de fratura de compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal 15 mm e pó de maçanduba. Na imagem podemos observar fibras rompidas praticamente no plano de propagação da trinca.

4.4 – RESISTÊNCIA AO IMPACTO

4.4.1 – Corpos de Prova de Matriz Pura e Compósitos Reforçados com Pó de Maçaranduba

A tabela 12 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 figura 45 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 12: 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 (P_f) (%)	Resist. Impacto Charpy (kJ/m²) 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). Como foi discutido na seção 4.1 e na seção 4.5.2, 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.

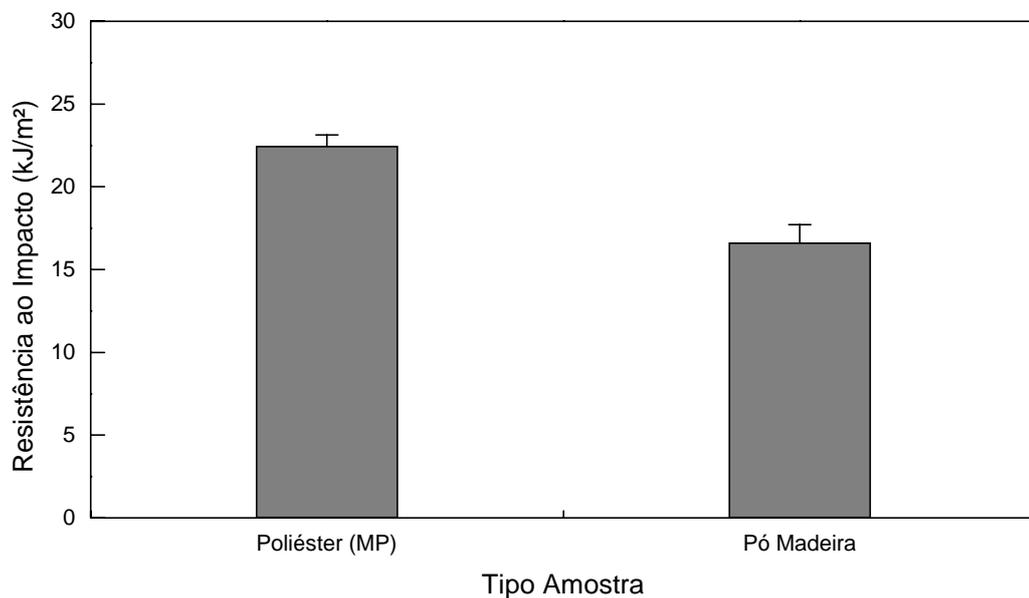


Figura 45: Gráfico comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de impacto charpy de corpos de prova de poliéster sem reforço (MP) e compósitos poliéster reforçado por pó de maçaranduba.

A figura 46 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.

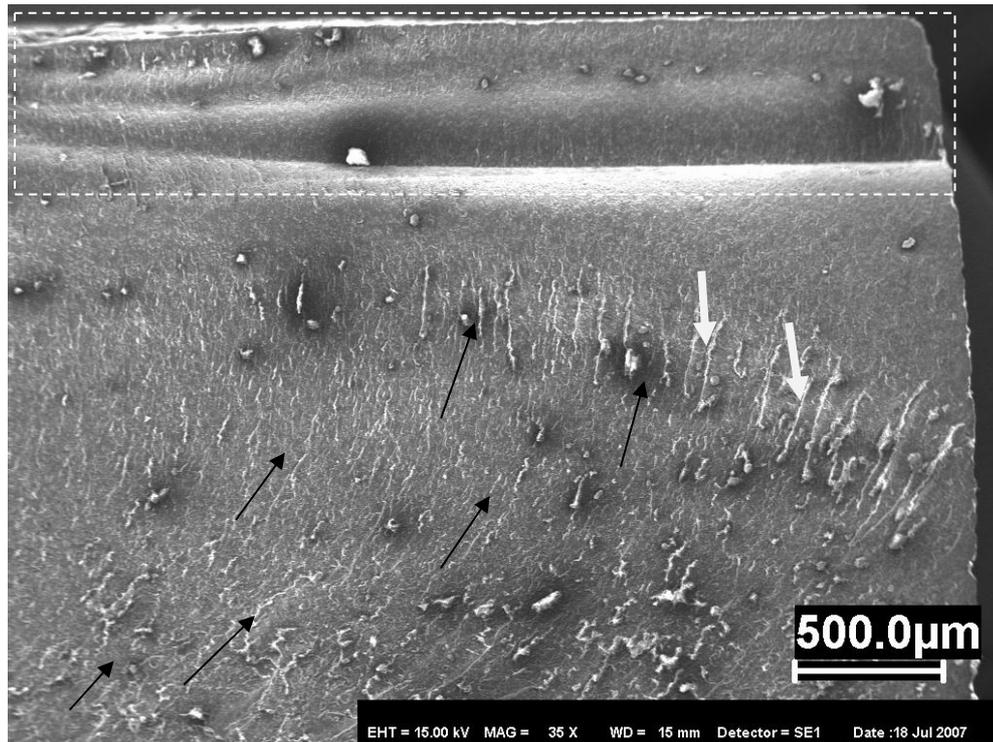


Figura 46: Superfície de fratura de corpo de prova de poliéster sem reforço. As setas pretas indicam o sentido de propagação da trinca, as brancas, as estrias radiais características de uma fratura frágil e o retângulo indica a região deformada pelo impacto no momento do ensaio.

A figura 47 ilustra uma micrografia eletrônica da superfície de fratura de um compósito reforçado com pó de maçaranduba. 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.

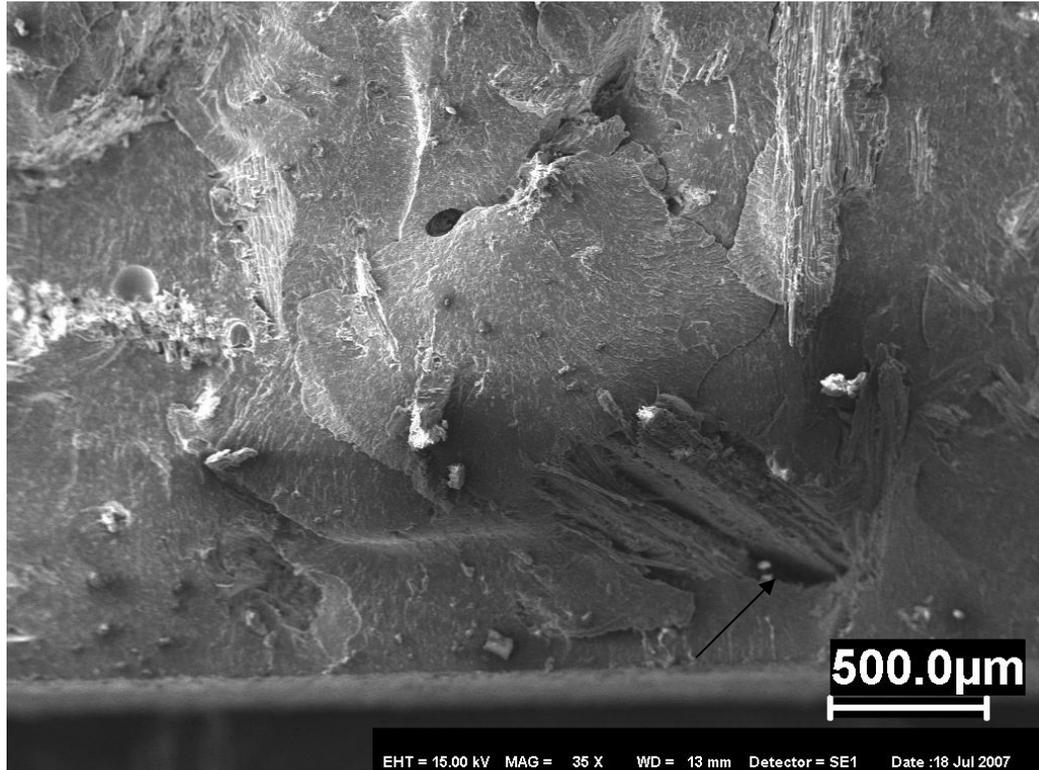


Figura 47: Superfície de fratura de compósitos poliéster reforçado com pó de maçaranduba. A seta indica a região em que uma fibra de madeira foi parcialmente arrancada.

4.4.2 – Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal

A tabela 13 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de impacto Charpy sem entalhe para os compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de sisal de 5, 10 e 15 mm. Os dados mostram que a resistência ao impacto do compósito aumentou com o aumento do comprimento da fibra, chegando a atingir, para o compósito com fibras de sisal de 15 mm, o mesmo nível de energia que a matriz de poliéster sem reforço. Como visto na seção anterior, nos 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, mecanismos este que consomem energia pela criação de uma maior área superficial de fratura dentro do compósito e pelo trabalho de fricção na interface. Com o aumento do comprimento da fibra inserida à matriz de poliéster, a área da interface fibra/matriz cresce proporcionalmente, incrementando a

área de fricção na interface e o comprimento de fibra a ser extraído. A figura 48 mostra graficamente os resultados obtidos para os compósitos reforçados com fibras de sisal.

Tabela 13: Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy dos compósitos de matriz poliéster reforçado com fibras de sisal.

Tipo Amostra	Reforço	F. Mássica	Resist. Impacto
		Reforço (P_f) (%)	Charpy (kJ/m ²) Média (Desvio Padrão)
Comp. Poliéster/ Sisal	Sisal 5 mm	5,41	16,84 (± 2,94)
	Sisal 10 mm	4,87	18,56 (± 5,53)
	Sisal 15 mm	3,90	22,36 (± 4,72)

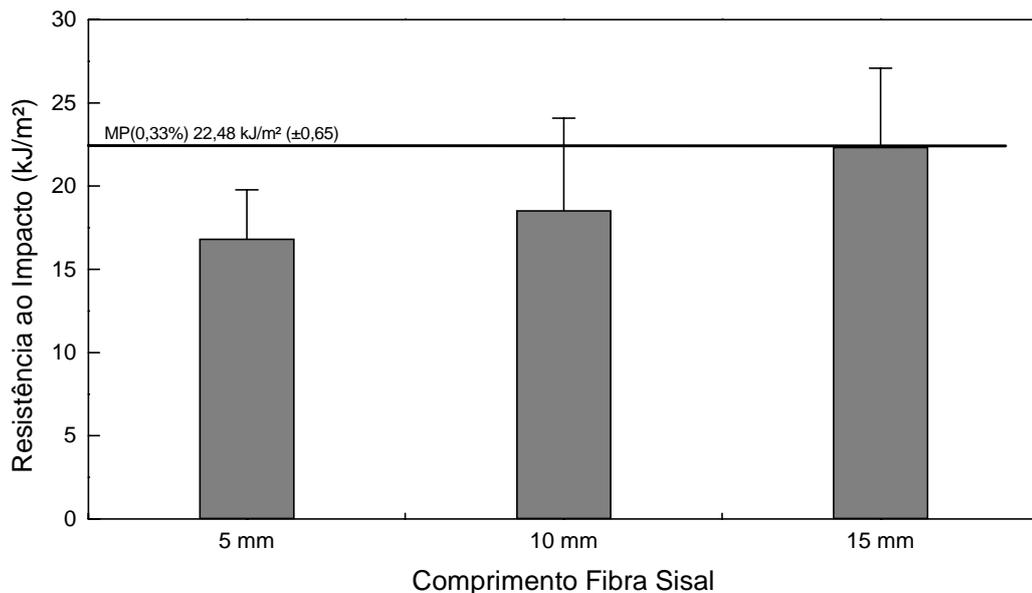


Figura 48: Gráficos comparativos dos resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy de compósitos de poliéster reforçado por fibras de sisal. A linha horizontal representa o desempenho em impacto obtido para as amostras sem reforço (MP).

As micrografias eletrônicas apresentadas nas figuras 49 e 50 apresentam a superfície de fratura de compósitos poliéster reforçados com fibras de sisal de 5 e 15 mm, respectivamente. A análise das micrografias eletrônicas mostram que quanto maior o comprimento da fibra inserida na matriz, maior foi o comprimento sacado das fibras, o que contribui para aumentar a resistência ao impacto. Outro fator a ser considerado, é a presença de bolhas no interior do compósito, decorrentes,

provavelmente, da maior dificuldade em eliminação destas causada pela inserção do reforço.

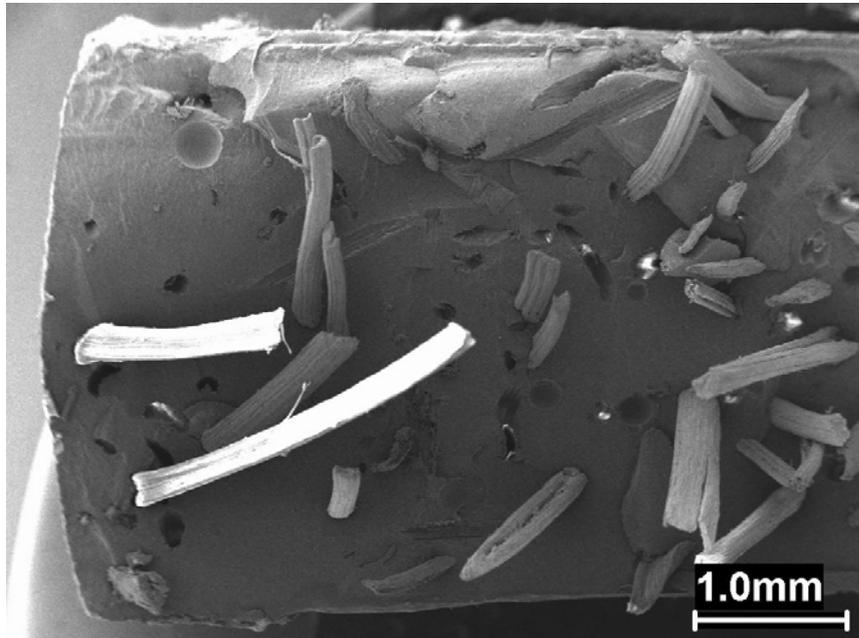


Figura 49: Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 5 mm.

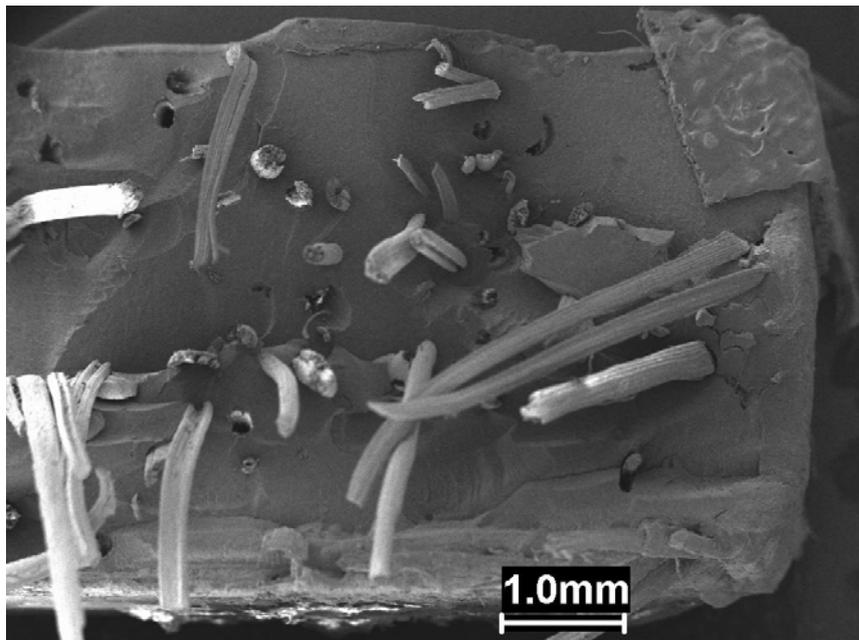


Figura 50: Superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de sisal de 15 mm.

4.4.3 – Compósitos Híbridos Sisal / Pó de Maçaranduba

A tabela 14 apresenta os resultados obtidos para os compósitos híbridos de matriz poliéster reforçados com fibras de sisal e pó de maçaranduba. Os dados mostram que os híbridos com fibras de sisal de 10 e 15 mm apresentaram desempenho semelhante e bastante superior ao híbrido com fibras de sisal de 5 mm. Tal como observado nos ensaios de tração, os compósitos apresentaram uma diminuição no desempenho em impacto com o aumento da proporção de madeira. A figura 51 apresenta graficamente os resultados obtidos para os compósitos híbridos.

Tabela 14: Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy dos compósitos híbridos de matriz poliéster reforçado com fibras de sisal e pó de maçaranduba.

Tipo Amostra	Proporção entre Reforços (%)	F. Mássica Reforço (P_f)		Resist. Impacto Charpy (kJ/m ²) Média (Desvio Padrão)
		Fibra/pó de mad.	Sisal	
Comp. Híbrido Sisal 5mm/Pó Maçaranduba	(75/25)	4,07	2,40	5,42 (± 0,27)
	(50/50)	2,72	4,80	5,17 (± 0,40)
	(25/75)	1,36	7,22	5,80 (± 0,55)
Comp. Híbrido Sisal 10mm/Pó Maçaranduba	(75/25)	3,66	2,40	15,83 (± 1,13)
	(50/50)	2,44	4,80	13,01 (± 1,73)
	(25/75)	1,22	7,21	5,36 (± 0,30)
Comp. Híbrido Sisal 15mm/Pó Maçaranduba	(75/25)	2,93	2,40	16,15 (± 1,46)
	(50/50)	1,96	4,80	13,65 (± 3,01)
	(25/75)	0,98	7,21	10,32 (± 0,54)

A avaliação das superfícies de fratura ao microscópio eletrônico mostra que no compósito híbrido com fibras de sisal de 5 mm, a fibra não teve efetividade como reforço e sacou da matriz a baixa tensão. O comprimento menor das fibras também levou ao surgimento com maior frequência de fibras dispostas transversalmente à direção do carregamento, que neste caso, não tem qualquer efetividade como reforço, agindo como defeito e reduzindo assim a resistência do compósito.

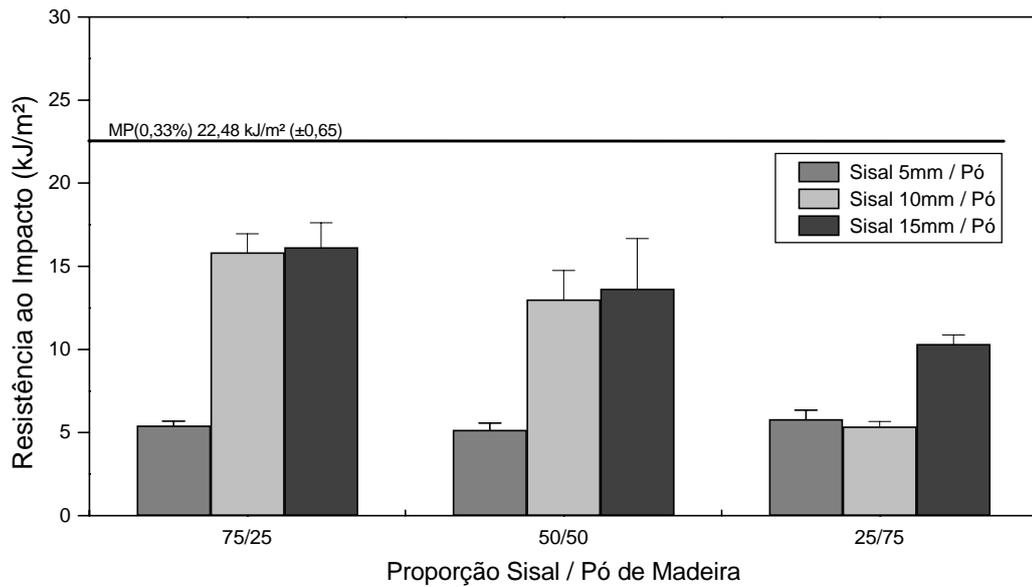


Figura 51: Resultados obtidos nos ensaios de impacto de compósitos híbridos de matriz poliéster reforçados com fibras de sisal de 5, 10, 15 mm e pó de maçaranduba.

A figura 52 ilustra uma microscopia eletrônica da superfície de fratura de um compósito híbrido sisal 5 mm e pó de maçaranduba. As setas indicam a ocorrência de fibras transversais no plano de fratura, que não contribuem para elevar a absorção de energia, agindo somente como defeito.

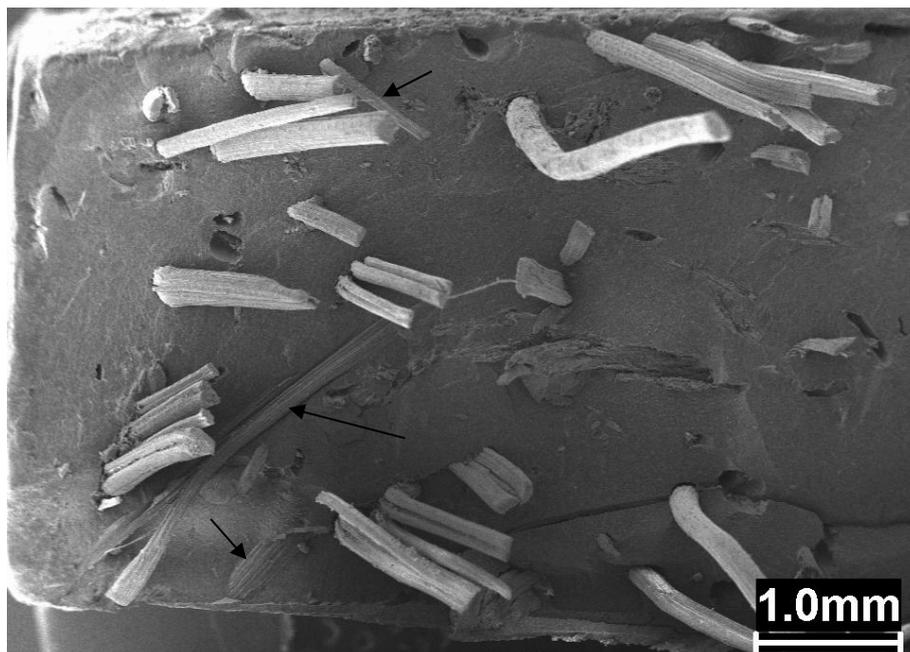


Figura 52: Superfície de fratura de compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal 5 mm e pó de maçaranduba. As setas indicam fibras transversais descoladas da superfície de fratura.

CAPÍTULO V - 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.

A caracterização mecânica das fibras de sisal mostrou que estas, apesar de não terem sofrido qualquer tratamento, apresentaram bons níveis de resistência à tração, níveis intermediários dentre os resultados encontrados na literatura.

Os compósitos reforçados com pó de maçanduba não apresentaram um desempenho mecânico satisfatório, principalmente em função da predominância de partículas grosseiras nos resíduos de madeira.

Os compósitos reforçados com fibras de sisal apresentaram desempenho mecânico bastante satisfatório, apesar da baixa fração mássica conseguida com a técnica de processamento.

O aumento do comprimento das fibras de sisal incrementou a resistência à tração dos compósitos fibrosos o que, em parte, se dá pelo maior efeito de alinhamento das fibras alcançado à medida que se aumenta seu comprimento.

Os compósitos híbridos, à exceção dos reforçados com fibras de sisal de 5 mm, mostraram desempenho mecânico que chegou, em média, à mais de 80% do desempenho alcançado pelos compósitos fabricados com os reforços individualmente, superando os compósitos reforçados com pó de maçanduba, para as composições 75/25 e 50/50.

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.

As propriedades mecânicas em tração mostraram coerência com as propriedades mecânicas em impacto, principalmente para os compósitos fibrosos e os híbridos com maior teor de fibra.

CAPÍTULO VI – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Aplicar técnicas de planejamento de experimento para avaliar, de modo global e com interação, todas as variáveis de entrada, quantificando seus efeitos nas respostas consideradas. Para isso:

- 1 – Realizar o peneiramento dos resíduos de madeira em peneira de mesh 40;
- 2 – Utilizar compatibilizantes madeira/resina sobre os resíduos de maçaranduba;
- 3 – Realizar tratamento superficial das fibras de sisal;
- 4 – Utilizar fibras de sisal em comprimentos maiores e menores dos utilizados neste trabalho para se definir o comprimento efetivo de reforçamento;
- 5 – Aumentar a fração mássica dos reforços utilizados;
- 6 – Determinar o módulo de elasticidade em tração dos elementos de reforço e dos compósitos produzidos de forma a se aplicar as equações da micromecânica para a predição das propriedades dos compósitos;
- 7 – Submeter os compósitos produzidos a uma pós cura;
- 8 - Utilização de outras fibras regionais como reforço, como a fibra de curauá e a fibra de côco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: Fundamentals and applications**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 1995.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO ESTADO DO PARÁ. Belém: IBGE, 2005.

AQUINO, R. C. M. P.; D'ÁLMEIDA, J. R. M.; MONTEIRO, S. N. **Desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica e piaçava, como substitutivo de produtos de madeira**. Vértices, Rio de Janeiro, n. 1, jan. 2002.

ASTM D 5045 - 99, "**Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness Release Rate of Plastic Materials**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 5942 - 96, "**Standard Test Method for Determining Charpy Impact Strength of Plastic**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 638 - 89, "**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (Metric)**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 790-90, "**Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

AVCI, A.; ARIKAN, H.; AKDEMIR, A. **Fracture behavior of glass reinforced polymer composite**. Cement and Concrete Research, Konya, n. 34, p. 429-434, 2004.

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.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais - uma introdução**. Utah: LTC, 2002. 602 p.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. **Wood flour as reinforcement of polypropylene**. Materials Research, v. 5, n. 4, p. 405-409, 2002.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 119 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M. **Resistência ao cisalhamento interlaminar de compositos com resina epóxi com diferentes arranjos das fibras na presença de vazios**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, v. 11, n. 4, p. 182-189, 2001.

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.

FRANCO, L. A. L. **Análise fractográfica de compósitos poliméricos estruturais.** Dissertação (Mestrado em Física e Química de Materiais Aeroespaciais) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

FRANCO, P. J. H.; GONZÁLEZ, A. V. **A study of the mechanical properties of short natural fiber reinforced composites.** Composites: Part B, Yucatán, n. 36, p. 597-608, 2005.

GEARY, W.; DUTTON, J.; SHUTER, D. M. **The influence of size and dynamic loading on the fracture toughness of commercial GRP materials.** Composites Science and Technology, Sheffield, n. 60, p. 633-638, 2000.

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.

HILLIG, E. **Viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados das indústrias moveleiras.** Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

HUANG, D. D. **The application of fracture mechanics to short fiber composites.** Polymer Composites, Delaware, v. 16, n. 1, p. 10-16, Feb. 1995.

ICHAZO, M. N.; ALBANO, C.; GONZÁLEZ, J.; PERERA, R.; CANDAL, M. V. **Polypropylene/Wood flour composites: treatments and properties.** Composite Structures, n. 54, p. 207-214, 2001.

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.

IDICULA, M.; MALHOTRA, S. K.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. **Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites.** Composites Science and Technology, n. 65, p. 1077-1087, 2005.

JAYARAMAN, K. **Manufacturing sisal polypropilene composites with minimum fibre degradation.** Composites Science and Technology, Auckland, n. 63, p. 367-374, 2003.

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.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. **Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, out/dez, p. 136-141, 1999.

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.

LENTINI, M.; PEREIRA, D.; CELENTANO, D.; PEREIRA, R. **Fatos Florestais da Amazônia 2005.** IMAZON, 2005.

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 (cloro de vinila) reforçados com fibras de sisal.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 14, n. 5, p. 326-333, 2004.

MATTOSO, L. H. C.; PEREIRA, N.; SOUZA, M. L.; AGNELLI, J. A. M. **Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos.** EMBRAPA, n. 3, p. 1-4, Nov, 1996.

MISHRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK, S. K.; TRIPATHY, S. S. **Studies on mechanical performance of biofibreglass reinforced polyester hybrid composites.** Composites Science and Technology, n. 63, p. 1377-1385, 2003.

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 d poliéster reforçados com fibras de piaçava.** Revista Matéria, v. 11, n. 3, p. 204-210, 2006.

MORA, J. J. S. **Comportamiento Térmico y Mecánico del Poli (Etilén Tereftalato) (PET) Modificado con Resinas Poliméricas Basadas em Bisfenol-A.** 2003. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2003.

OKUBO, K.; FUJII, T.; YAMAMOTO, Y. **Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties.** Composites: Part A, Kyo-tanabe, n. 35, p. 377-383, 2004.

PAIVA, J. M. F.; TRINDADE, W. D.; FROLLINI, E. **Compósitos de matriz termofixa fenólica reforçadas com fibras vegetais**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, p. 170-176, Dec. 1999.

PEDROSO, A. G. **Desenvolvimento de um processo de manufatura de placas de compósitos de poliéster insaturado/fibras de vidro pós-consumo e resina de poliéster insaturado**. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

PEREIRA, J. C. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. UFSC, 99 p., 2000.

RODOLFO JR., A. **Estudo da Processibilidade 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. et al. (1997). **Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities**. In: LEÃO, A.; CARVALHO, F. X.; FROLLINI, E., eds. *Lignocellulosic - plastics composites*, São Paulo: USP; UNESP. p. 23-51.

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.

SAVASTANO JR, H. **Sistemas de cobertura para construções de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais**. *Coletânea Habitare - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional*, v. 4, p. 94-123, 2004.

SELKE, S. E.; WICHMAN, I. **Wood fiber/polyolefin composites**. *Composites – Part A: applied science and manufacturing*, Michigan, n. 35, p. 321-326, 2004.

SHIBATA, S.; CAO, Y.; FUKUMOTO, I. **Press forming of short natural fiber-reinforced biodegradable resin: effects of fiber and length on flexural properties**. *Polymer Testing*, Okinawa, n. 24, p. 1005-1011, July 2005.

SILVA, N. M.; LIMA, L. F. C. P.; FARIA, R. N.; ROSSI, J. L. **Influência da pós-cura na temperatura de transição vítrea em compósitos de fibra de carbono e de poliaramida com matriz de polímero termofixo**. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais-CBECIMAT*, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006. p. 3055-3066.

SILVA, O. R. R. F.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do sisal no Brasil**. Brasília: Embrapa-SPI, 1999.

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.

SOHN, M. S.; HU, X. Z. **Comparative study of dynamic and static delamination behavior of carbon/epoxy composite laminates.** Composites, v. 26, n. 12, p. 849-858, 1995.

SOYKEABKAEW, N.; SUPAPHOL, P.; RUJIRAVANIT, R. **Preparation and characterization of jute and flax reinforced starch-based composite foams.** Carbohydrate Polymers, n. 58, p. 53-63, 2004.

SUI, G. X.; WONG, S. C.; YUE, C. Y. **The effect of fiber inclusions in toughened plastics - part I: fracture characterization by essential fracture work.** Composites Science and Technology, Singapore, n. 61, p. 2481-2490, 2001.

TJONG, S.C.; XU, S. A.; MAI, Y. W. **Impact fracture toughness of short glass fiber-reinforced polyamide 6,6 hybrid composites containing elastomer particles using essential work of fracture concept.** Materials Science & Engineering, Sydney, v. A 347, p. 338-345, Aug. 2002.

TORRES, F. G.; CUBILLAS, M. L. **Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene.** Polymer Testing, n. 24, p. 694-698, 2005.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. **Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics ?.** Composites Science and Technology, n. 63, p. 1259-1264, 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.