



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ROSSANA MARTINS MIRANDA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UM ECO-COMPÓSITO PARA APLICAÇÃO
COMO PAINÉIS DIVISÓRIOS DE AMBIENTES**

Belém
2007



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ROSSANA MARTINS MIRANDA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM ECO-COMPÓSITO PARA APLICAÇÃO COMO PAINÉIS DIVISÓRIOS DE AMBIENTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção civil.

Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo
Co-orientadora: Prof^a Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias

Belém
2007



ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM ECO-COMPÓSITO PARA APLICAÇÃO COMO PAINÉIS DIVISÓRIOS DE AMBIENTES

Autora:

ROSSANA MARTINS MIRANDA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DO CENTRO TECNOLÓGICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA EM:de.....de.....

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ALCEBÍADES NEGRÃO MACÊDO
Presidente e Orientador / UFPA

Prof^ª Dra. CARMEN GILDA BARROSO TAVARES DIAS
Co-orientadora / UFPA

Prof. Dr. BERNARDO BORGES POMPEU NETO / UFPA
Membro / UFPA

Prof. Dr. JOSÉ MARIA DO VALE QUARESMA
Membro / UFPA

Visto:

Prof. Dr. ALCEBÍADES NEGRÃO MACÊDO
Coordenador do PPGEC / CT / UFPA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central da UFPA

Miranda, Rossana Martins

Estudo do comportamento mecânico de um eco-compósito para aplicação como painéis divisórios de ambientes / Rossana Martins Miranda; orientador, Alcebíades Negrão Macedo; co-orientadora Carmen Gilda Barroso Tavares Dias. — 2007

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2007.

1. Materiais compósitos. 2. Mamona. 3. Juta I. Título.

CDD - 22. ed. 620.118

RESUMO

Miranda, Rossana Martins. Estudo do comportamento mecânico de um eco-compósito para aplicação como painéis divisórios de ambientes. Belém, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, 2007. 386p. Dissertação de Mestrado.

Esta pesquisa teve como objetivo o estudo do comportamento mecânico de um eco-compósito em estrutura laminada para aplicação como painéis divisórios de ambientes utilizando uma resina comercial poliuretana a base natural de óleo de mamona, uma resina comercial de poliéster insaturada e um tecido de juta como reforço, obtido de sacarias. A fração em massa de produto natural (juta) ou de base natural (poliuretana a base de óleo de mamona) totalizou 44,32%, habilitando sua denominação como eco-compósito. Foram realizados os ensaios de tração, de compressão, de flexão, de impacto Charpy e de impacto por queda de dardo nos materiais constituintes do compósito para verificação da contribuição de cada material para as propriedades do compósito. Os ensaios de tração foram realizados na matriz de poliuretana, na matriz de poliéster, no tecido de juta, na matriz híbrida (resina de poliuretana e resina de poliéster) e no compósito. Os ensaios de compressão foram realizados na matriz de poliuretana, na matriz de poliéster, na matriz híbrida e no compósito. Os ensaios de flexão foram realizados na matriz de poliéster, na matriz híbrida e no compósito. Os ensaios de impacto foram realizados na matriz de poliuretana, na matriz de poliéster, na matriz híbrida e no compósito. Os resultados obtidos mostram que o compósito apresenta bom comportamento quando submetido a impacto e a esforços de tração.

Palavras-chave: poliuretana derivada do óleo de mamona, poliéster insaturada, tecido de juta.

ABSTRACT

Miranda, Rossana Martins. Study of eco-composite mechanical behavior for application as divisional panels of ambients. Belém, Post-graduation course on Civil Engineering, Pará Federal University, 2007. 386p. Mastership's dissertation.

The purpose of this research was to study the mechanical behavior of a laminated structural eco-composite applied as divisional panels of ambients, constructed by commercial resin polyurethane based on castor oil, another commercial resin of unsaturated polyester and jute fabric, from sacks. The weight content of 44,32% of natural fiber (jute) and of natural based resin (castor oil) enable this material to be called eco-composite. It were realized tensile, compressive, flexural, Charpy impact and falling dart impact tests on components of composite to verify their contribution to the properties of composite. The tensile tests were realized on polyurethane matrix, on jute fabrics, on hybrid matrix (polyurethane resin and polyester resin) and on composite. The compressive tests were realized on polyurethane matrix, on polyester matrix, on hybrid matrix and on composite. The flexural tests were realized on polyester matrix, on hybrid matrix and on composite. The impact tests were realized on polyurethane matrix, on polyester matrix, on hybrid matrix and on composite. The results showed the composite has good impact and tensile behaviors.

Keywords: polyurethane derived from castor oil, insaturated polyester, jute fabric

Dedico este trabalho a minha
família pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter permitido a realização deste trabalho;

À Prof^a Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias pelo apoio intelectual, material (Laboratório de Eco-compósitos, máquinas e equipamentos) e pessoal (bolsistas deste laboratório);

Ao Prof. Msc. Mauro José Guerreiro Veloso, pelo apoio moral, material e intelectual;

Ao Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma, pela intermediação com o CPQD, de Campinas, para a realização dos ensaios de tração, pelo apoio material (Laboratório de Metalurgia, máquinas e equipamentos) e pessoal (bolsistas do laboratório) para os ensaios de compressão e flexão;

Ao Prof. Dr. Carlos Edílson de Almeida Maneschy, pela colaboração para a realização dos ensaios mecânicos no CPQD;

Ao Engenheiro Químico Paulo Roberto Ribeiro Marques, pela colaboração na realização dos ensaios de compressão e flexão;

A Engenheira Química Aline Corecha Santos, pela colaboração na realização dos ensaios de impacto por queda de dardo;

A Engenheira Química e Química Industrial Vera Lúcia Dias da Silva, pela colaboração na realização dos ensaios de impacto Charpy;

A Engenheira Química Olinda Elleres Neves, pela colaboração na realização dos primeiros ensaios de tração e compressão;

Aos técnicos Carlos Joab (externo) e Odilon Oliveira (Laboratório de Engenharia Mecânica), pelos recortes dos corpos de prova;

Ao aluno de Engenharia Mecânica Michel J. Caldas Carvalho, pela colaboração na realização dos ensaios de tração nos tecidos de juta e no reforço;

A todos estes profissionais, e aos outros que não tiveram seus nomes mencionados aqui, pela amizade, apoio e carinho nessa empreitada.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Combinação de materiais para constituir compósitos.....	8
Figura 2 - Organograma de classificação dos materiais compósitos.....	9
Figura 3 - Exemplos de compósitos reforçados: (a) por partículas aleatórias (<i>fillers</i>); (b) por fibras descontínuas (ou whiskers) unidirecionais; (c) por fibras descontínuas (ou <i>whiskers</i>) aleatórias; (d) por fibras contínuas unidirecionais; (e) por tecido bi-direcional e (f) por tecido multidirecional.....	10
Figura 4 - Processo manual (<i>hand lay-up</i>) de fabricação de compósitos.....	18
Figura 5 - Processo de bobinamento (<i>filament winding</i>) de fabricação de compósitos.....	18
Figura 6 - Processo de trefilação (<i>pultrusion</i>) de fabricação de compósitos.....	19
Figura 7 - Processo de moldagem por membrana para fabricação de compósitos.....	20
Figura 8 - Processo com preformados: (a) blocos (BMC) e (b) chapas (SMC) para fabricação de compósitos.....	21
Figura 9 - Processo com preformados: uso de fita prepreg para fabricação de compósitos.....	21
Figura 10 - Processo por centrifugação para fabricação de compósitos.....	22
Figura 11 - Compósito de estrutura laminada.....	23
Figura 12 - Compósito de estrutura tipo sanduíche.....	23
Figura 13 - Classificação das fibras naturais.....	24
Figura 14 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal.....	26

Figura 15 - Rigidez específica e resistência à tração específica de diferentes fibras vegetais comparadas às fibras de vidro-E e aramida.....	30
Figura 16 - Tensão x alongamento em compósitos reforçados por fibras.....	30
Figura 17 - Árvore da espécie <i>Chorchorus Capsularis</i>	32
Figura 18 - Juta de melhor qualidade: cor branca e brilhante do talo.....	33
Figura 19 - Filamentos contínuos, unidos e torcidos para constituir o fio torcido.....	35
Figura 20 - Desenho esquemático de alguns tipos de tecidos: (a) colados; (b) tricotados; (c) tramados em duas direções ortogonalmente e (d) tramados em mais de duas direções.....	36
Figura 21 - Produção e classificação da tela de juta: (a) tear industrial para fabricação da tela de juta e (b) rolo identificado pelo tipo de tela de juta.....	37
Figura 22 - Reação química para se obter uma uretana.....	40
Figura 23 - Reação química para se obter a polimerização da poliuretana.....	40
Figura 24 - Óleo e a planta da mamona.....	42
Figura 25 - Mecanismos de falha em materiais compósitos.....	53
Figura 26 - Divisórias para ambientes sem umidade (escritórios).....	56
Figura 27 - Divisórias empregadas em hospitais.....	56
Figura 28 - Divisórias sanitárias empregadas como tapa vistas.....	57
Figura 29 - Divisórias empregadas como biombos.....	57
Figura 30 - Portas e divisórias sanitárias.....	58
Figura 31 - Divisórias <i>DryWall Gypsum</i>	58
Figura 32 - Paineis <i>Gypsum Eternit</i>	59
Figura 33 - Casa ecológica: tecido de juta e poliéster.....	60

Figura 34 – Perfis e tubos em material compósito.....	61
Figura 35 – Resistência à tração para compósitos com diferentes materiais fibrosos e o PP puro em comparação à resistência à tração das fibras isoladamente (barras brancas).....	62
Figura 36 – Módulo de Young para compósitos com diferentes materiais fibrosos e o PP puro em comparação ao módulo de Young das fibras isoladamente (barras brancas).....	63
Figura 37 – Resistência ao impacto para compósitos com diferentes materiais fibrosos e o PP puro.....	64
Figura 38 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos de aniação com fibra lavada / Biopol, sugerindo o arrancamento das fibras em forma de feixes, provando que houve uma pobre interação fibra/matriz.....	65
Figura 39 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos de aniação com fibra com tratamento alcalino / Biopol, sugerindo uma interação fibra / matriz superior ao do sistema da FIG. 38, comprovando que o tratamento alcalino melhorou as propriedades mecânicas dos compósitos.....	66
Figura 40 – Resistências à tração dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.....	69
Figura 41 – Alongamentos à tração dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.....	70

Figura 42 – Módulos de elasticidade à tração dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.....	71
Figura 43 – Resistências à flexão dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.....	73
Figura 44 – Módulos de elasticidade à flexão dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.....	74
Figura 45 – Resistência ao impacto dos compósitos e do PU.....	75
Figura 46 – Corpos de prova após ensaio Charpy: (a) compósitos com fibras curtas de sisal, (b) compósitos com fibras curtas de coco e (c) compósitos com tecido de sisal. NT – fibras não-tratadas, T – fibras tratadas.....	77
Figura 47 – Curva do ensaio de tração da amostra do poliuretano.....	80
Figura 48 – Curva do ensaio de flexão da amostra do poliuretano.....	81
Figura 49 – Curva do ensaio de compressão da amostra do poliuretano.....	82
Figura 50 – Alguns materiais utilizados: acetona, cera de carnaúba, rolo com ranhuras, trincha, misturador plástico, espátula e vidro temperado.....	94
Figura 51 - Máquina de ensaio universal EMIC.....	95
Figura 52 - Balança digital BG1000.....	96
Figura 53 – Equipamento para o ensaio de impacto Charpy.....	96
Figura 54 - Equipamento para o ensaio de impacto por queda de dardo.....	97
Figura 55 – Prensa de 1 tonelada.....	97

Figura 56 – Máquina de ensaio universal KRATOS, modelo KE 3000MP, capacidade 3000Kgf com software aplicativo.....	98
Figura 57 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	99
Figura 58 – Fluxograma do experimento.....	100
Figura 59 – Tecido de juta F9.....	101
Figura 60 – Embalagem da resina RESCON 301-40.....	102
Figura 61 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de tração.....	106
Figura 62 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de compressão.....	108
Figura 63 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de flexão.....	110
Figura 64 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de impacto Charpy.....	112
Figura 65 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de impacto por queda de dardo.....	114
Figura 66 – Placa do compósito com a distribuição dos corpos de prova de tração, de compressão, de flexão, de impacto Charpy e de impacto por queda de dardo.....	116
Figura 67 - Os três pedaços de tecido de juta do compósito: o interno, a 90° e, os externos, a 45° com os fios da trama do tecido.....	117
Figura 68 – Lâmina de tecido de juta a 90° com a resina de óleo de mamona...120	
Figura 69 – Aplicação da resina de poliéster com trincha.....	122
Figura 70 – Espalhamento da resina de poliéster com rolo para melhorar a molhabilidade do tecido.....	123
Figura 71 – Lâmina de tecido de juta a 45° com a resina de poliéster.....	124
Figura 72 – As três lâminas prontas do compósito: a interna, de poliuretana e as duas externas, de poliéster.....	126
Figura 73 – Compósito pronto.....	126

Figura 74 – Matriz de poliuretana a base de óleo de mamona.....	128
Figura 75 – Matriz de poliéster.....	129
Figura 76 – As três laminas de 2 mm de matriz: a do meio, matriz de poliuretana e as duas externas, matrizes de poliéster.....	132
Figura 77 – Placa da matriz híbrida: duas externas de poliéster e a interna de poliuretana.....	132
Figura 78 - Placa de compósito com a marcação dos corpos de prova.....	138
Figura 79 - Placa de matriz híbrida com a marcação e identificação dos corpos de prova. Foi marcado o centro do corpo de prova quadrado para o ensaio de impacto por queda de dardo.....	138
Figura 80 – Corpos de prova de tração: (a) do compósito, (b) da matriz de poliéster, (c) da matriz de poliuretana e (d) da matriz híbrida.....	140
Figura 81 – Corpo de prova nº2 da matriz de poliuretana após ensaio de tração: partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro.....	142
Figura 82 – Corpo de prova nº1 da matriz de poliéster após ensaio de tração: partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro.....	144
Figura 83 – Corpo de prova nº9 da matriz híbrida após ensaio de tração: partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro. As ranhuras nas extremidades foram feitas para melhorar a aderência para a garra não escorregar.....	147
Figura 84 - Corpo de prova nº 4 do tecido de juta com fios da trama a 45°: por não estarem paralelos à solicitação dos esforços apresentou pequena resistência à tração.....	149

- Figura 85 – Corpo de prova n° 5 com tecido de juta com fios da trama a 90°: fios paralelos à solicitação dos esforços, atuam como reforço e os transversais, não.....150
- Figura 86 – Corpo de prova n° 2 do reforço: essa sobreposição foi efetiva para melhorar o módulo de elasticidade do reforço.....152
- Figura 87 - Corpo de prova do compósito sob ensaio de tração com extensômetro.....155
- Figura 88 - Corpo de prova n°15 do compósito após ensaio de tração: em (a) uma das lâminas externas e a interna não romperam e em (b) o rompimento de uma das lâminas externas de poliéster e juta.....155
- Figura 89 – Morfologia da fratura do corpo de prova do compósito submetido ao ensaio de tração: presença de bolhas de ar (a) e pobre molhabilidade das fibras, com extração de fibras da matriz (b).....165
- Figura 90 – Bolhas de ar na superfície do corpo de prova de tração: são pontos de concentração de tensão, que diminuem a resistência quando solicitados aos esforços. Nesta mesma figura pode-se observar o entrelaçamento dos fios para constituir o tecido de juta que também dificultam a transferência de esforços.....165
- Figura 91 – As duas partes que foram coladas para obter a espessura do corpo de prova do ensaio de compressão: (a) do compósito, (b) da matriz de poliéster, (c) da matriz de poliuretana e (d) da matriz híbrida.....168

- Figura 92 - Corpo de prova n° 5 da matriz de poliuretana após ensaio de compressão: o corpo de prova não descolou, porém, partiu ao meio na sua dimensão paralela à força aplicada.....169
- Figura 93 - Corpo de prova n° 2 da matriz de poliéster após ensaio de compressão: o corpo de prova foi quebrado em várias partes.....171
- Figura 94 - Corpo de prova n° 3 da matriz híbrida após ensaio de compressão: o corpo de prova foi separado em duas partes somente, na cola de poliuretana.....173
- Figura 95 – Corpo de prova do compósito sendo submetido ao ensaio de compressão.....174
- Figura 96 – Corpo de prova n° 2 do compósito após o ensaio de compressão: delaminações, rompimento das lâminas de poliéster e juta e as lâminas de poliuretana e juta intactas.....175
- Figura 97 – Dimensões do vão do ensaio de flexão.....180
- Figura 98 – Corpos de prova para o ensaio de flexão: (a) do compósito, (b) da matriz de poliéster e (c) da matriz híbrida.....180
- Figura 99 – Corpo de prova n°10 da matriz de poliéster após ensaio de flexão: quebra no meio e nos apoios, caracterizando um material frágil.....183
- Figura 100 – Corpo de prova n°2 da matriz híbrida após ensaio de flexão: devido a lâmina interna de poliuretana o corpo de prova apresentou apenas trincas nas lâminas de poliéster.....186
- Figura 101 – Corpo de prova do compósito sendo submetido ao ensaio de flexão.....188

Figura 102 – Corpo de prova n° 7 do compósito após ensaio de flexão: delaminação total.....	188
Figura 103 - Direção do impacto do pêndulo: (a) normal ao plano do laminado e (b) paralelo ao plano do laminado.....	195
Figura 104 – Corpo de prova n°6 (normal e paralelo) após ensaio de impacto Charpy: quebraram em duas partes e os resultados foram quase iguais quanto a energia absorvida e quanto a resistência ao impacto.....	199
Figura 105 – Corpo de prova n°3 da matriz híbrida após ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado: rompimento em duas partes e delaminações das lâminas de poliéster nos pontos de apoio.....	202
Figura 106 – Corpo de prova do compósito sendo submetido ao ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado.....	203
Figura 107 – Corpo de prova do compósito sendo submetido ao ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado.....	205
Figura 108 – Corpo de prova n°19 do compósito após ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado: as lâminas externas de poliéster e juta foram rompidas e a interna de poliuretana e juta permaneceu intacta.....	206
Figura 109 – Corpo de prova n°10 do compósito após ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado: separação em duas partes e delaminação da lâmina de poliéster e juta. Nesta imagem, pode-se observar a exposição dos fios do tecido de juta.....	207

- Figura 110 – Morfologia da fratura do corpo de prova do compósito submetido ao ensaio Charpy paralelo: observam-se bolhas de ar (a) e extração de fibras (b), demonstrando fraca adesão na interface.....213
- Figura 111 – Corpo de prova de poliuretana ensaiado: nenhuma falha e nem deformação permanente até a massa de 0,90kg.....215
- Figura 112 – Corpo de prova da matriz de poliéster: material frágil e quebradiço.....219
- Figura 113 - Corpo de prova de poliéster nº 3 sujeito à massa de 0,30kg: trincas primária quase ortogonais e uma trinca secundária devido a presença de uma bolha de ar aprisionada na direção de uma trinca principal.....221
- Figura 114 – Corpo de prova de matriz híbrida: trincas primárias (radiais) provocadas pela queda do dardo sobre a 1ª camada de poliéster e trincas secundárias (circulares) provocadas pela elasticidade da camada interna de poliuretana.....225
- Figura 115 – Corpos de prova do compósito ensaiados: CP 1: (a) (região comprimida) e (b) (região tracionada), submetido a massa de 0,10kg: área de dano superficial pequena; CP 16: (c) (reg. comp.) e (d) (reg. Trac.), submetido a massa de 0,70kg: área superficial de dano mais concentrada, porém com quase traspasse do mesmo e CP 20: (e) (reg. Comp.) e (f) (reg. Trac.), submetido a massa de 0,90kg: concentração da área danificada com traspasse do mesmo.....231

- Gráfico 1 - Resistências à tração dos tecidos e do reforço: a melhor resposta foi a do tecido a 90°, por apresentar fios orientados na direção dos esforços solicitantes.....158
- Gráfico 2 – Módulos de elasticidade à tração dos tecidos e do reforço: a sobreposição dos tecidos foi significativa para o resultado muito maior do reforço.....159
- Gráfico 3 – Alongamentos dos tecidos e do reforço: o reforço apresentou o menor valor devido à sobreposição das três lâminas de tecido.....160
- Gráfico 4 – Resistências à tração dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o reforço, ao ser inserido na matriz híbrida, não contribuiu para aumentar a resistência do compósito.....161
- Gráfico 5 – Módulos de elasticidade à tração dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o reforço contribuiu para aumentar o módulo do compósito, em relação à matriz híbrida.....162
- Gráfico 6 – Alongamentos dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o compósito foi fortemente influenciado pelos alongamentos da resina de poliéster e do reforço.....163
- Gráfico 7 – Resistências à compressão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: a menor resistência foi da matriz de poliuretana e a maior resistência foi da matriz de poliéster. O compósito apresentou praticamente a metade da resistência da matriz híbrida, devido à fibra funcionar como um defeito.....176

- Gráfico 8 – Módulos de elasticidade à compressão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: foram bastante semelhantes, excetuando o da matriz de poliéster, que foi um pouco maior.....177
- Gráfico 9 – Deformações à compressão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: a matriz híbrida e o compósito apresentaram deformações praticamente iguais, demonstrando que a fibra no compósito não influenciou em nada quanto à essa propriedade.....178
- Gráfico 10 – Resistências à flexão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o melhor resultado foi da matriz de poliéster, seguida da matriz híbrida e o menor resultado foi o do compósito, comprovando a ineficiência do reforço.....191
- Gráfico 11 – Módulos de elasticidade à flexão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o melhor resultado foi da matriz de poliéster. O resultado da matriz híbrida foi muito influenciado pela lâmina de poliuretana e o resultado do compósito foi praticamente a metade do módulo da matriz híbrida, comprovando a ineficiência do reforço.....192
- Gráfico 12 – Deflexões dos materiais constituintes do compósito e do compósito: valores bastante semelhantes, excetuando a da matriz híbrida, que foi menor em consequência da camada mais espessa de poliuretana internamente.....193
- Gráfico 13 – Energia de impacto absorvida pelos diferentes materiais: com exceção da matriz de poliéster, a energia absorvida foi muito maior no ensaio paralelo do que no ensaio normal.....210

- Gráfico 14 – Resistência ao impacto nos diferentes materiais: com exceção da matriz de poliéster, a resistência foi muito maior no ensaio paralelo do que no ensaio normal.....211
- Gráfico 15 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,10kg:
- Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (1,87%).
 - Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (2,27%).....234
- Gráfico 16 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,30kg:
- Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (7,39%).
 - Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (9,93%).....235
- Gráfico 17 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,50kg:
- Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (15,84%).

- Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (11,48%).....236

Gráfico 18 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,70kg:

- Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (8,41%).

- Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (22,74%).....237

Gráfico 19 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,90kg:

- Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (5,06%).

- Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (28,24%).....238

Gráfico 20 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliuretana no ensaio de tração: não teve.....262

Gráfico 21 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliéster no ensaio de tração: não teve.....265

Gráfico 22 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz híbrida no ensaio de tração: não teve.....268

Gráfico 23 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do tecido de juta a 45° no ensaio de tração: não teve.....	271
Gráfico 24 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do tecido de juta a 45° no ensaio de tração: corpos de prova n ^{os} 2 e 5.....	272
Gráfico 25 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do tecido de juta a 90° no ensaio de tração: não teve.....	275
Gráfico 26 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do tecido de juta a 90° no ensaio de tração: corpo de prova n° 5.....	276
Gráfico 27 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do reforço no ensaio de tração: corpo de prova n° 3.....	279
Gráfico 28 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do compósito no ensaio de tração: não teve.....	282
Gráfico 29 – Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliuretana no ensaio de compressão: não teve.....	285
Gráfico 30 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliéster no ensaio de compressão: não teve.....	288
Gráfico 31 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz híbrida no ensaio de compressão: não teve.....	291
Gráfico 32 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do compósito no ensaio de compressão: não teve.....	295
Gráfico 33 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliéster no ensaio de flexão: não teve.....	301
Gráfico 34 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz híbrida no ensaio de flexão: corpos de prova n ^{os} 1 e 2. Pelos valores similares a	

esses módulos, os corpos de prova n ^{os} 6 e 7 também devem ser descartados.....	304
Gráfico 35 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do compósito no ensaio de flexão: não teve.....	308
Gráfico 36 - Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz de poliuretana no ensaio Charpy normal: não teve.....	314
Gráfico 37 - Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz de poliuretana no ensaio Charpy paralelo: não teve.....	317
Gráfico 38 - Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz de poliéster no ensaio Charpy normal: não teve.....	320
Gráfico 39 - Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz de poliéster no ensaio Charpy paralelo: não teve.....	323
Gráfico 40 – Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz híbrida no ensaio Charpy normal: do corpo de prova n° 10.....	326
Gráfico 41 - Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz híbrida no ensaio Charpy paralelo: não teve.....	331
Gráfico 42 - Valores discrepantes de resistência ao impacto do compósito no ensaio Charpy normal: não teve.....	337
Gráfico 43 – Valores discrepantes de resistência ao impacto do compósito no ensaio Charpy paralelo: não teve.....	345

LISTA DE TABELAS

1 - Composição química provável de algumas fibras vegetais (% em peso).....	25
2 - Propriedades de algumas fibras vegetais e da fibra sintética de vidro-E.....	29
3 - Composição química da juta.....	33
4 - Substâncias orgânicas presentes na juta.....	34
5 - Propriedades físicas da fibra de juta.....	35
6 - Telas naturais fabricadas pela Companhia Têxtil de Castanhal.....	37
7 - Composição típica dos ácidos que formam o óleo de mamona.....	42
8 - Características químicas do óleo de mamona.....	43
9 - Tipos de resinas poliéster mais utilizadas, componentes de base e aplicações.....	45
10 - Resinas poliéster, características e aplicações.....	46
11 - Propriedades típicas da resina termofixa de poliéster.....	47
12 – Diâmetro médio das fibras conforme o seu condicionamento.....	67
13 - Resumo das propriedades mecânicas de alguns compósitos poliméricos com fibras naturais.....	78
14 - Valores encontrados nos ensaios de tração das amostras do poliuretano....	80
15 - Valores encontrados nos ensaios de flexão das amostras do poliuretano.....	81
16 - Valores encontrados nos ensaios de compressão das amostras do poliuretano.....	83

17 - Propriedades físico-mecânicas dos compósitos laminados de juta (30%) / poliéster (70%).....	83
18 - Propriedades mecânicas da resina de poliéster.....	84
19 - Propriedades de tração e módulo dos compósitos de poliéster.....	85
20 - Propriedades de flexão e módulo dos compósitos de poliéster.....	85
21 - Propriedades de impacto Izod dos compósitos de poliéster.....	85
22 - Propriedades mecânicas de compósitos de poliéster / juta.....	86
23 - Propriedades mecânicas da resina poliéster Resapol 10-225.....	87
24 - Efeito da orientação das fibras nas propriedades dos compósitos poliéster/sisal.....	87
25 - Influência do agente de molhabilidade nas propriedades mecânicas dos compósitos de poliéster reforçados pelos fios de juta em função da proporção de fibra.....	89
26 - Influência de diferentes tratamentos alcalinos nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster Resana e fios de juta em função da proporção de fibras.....	92
27 - Características técnicas da resina RESCON 301-40.....	103
28 - Características gerais da resina AM-100 da Aerojet.....	104
29 - Características técnicas da resina AM-100 da Aerojet.....	104
30 - Totalização dos corpos de prova por ensaio.....	115
31 - Médias aritméticas e desvios padrões das massas dos pedaços de 200 x 200 mm do tecido de juta.....	118
32 – Médias aritméticas e desvios padrões das massas das lâminas prontas de tecido de juta a 90° com poliuretana a base de óleo de mamona.....	121

33 – Médias aritméticas e desvios padrões das massas das lâminas prontas de tecido de juta a 45° (a) e (b) com poliéster.....	124
34 - Médias aritméticas e desvios padrões das massas das placas do compósito.....	127
35 - Médias aritméticas e desvios padrões das massas das placas de matriz de poliuretana.....	128
36 - Médias aritméticas e desvios padrões das massas das placas de matriz de poliéster.....	130
37 - Médias aritméticas e desvios padrões das massas das placas de matriz híbrida.....	133
38 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de tração.....	141
39 - Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração na poliuretana.....	142
40 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de tração.....	144
41 - Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração na resina de poliéster.....	145
42 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de tração.....	146
43 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do tecido de juta a 45° submetidos ao ensaio de tração.....	148
44 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do tecido de juta a 90° submetidos ao ensaio de tração.....	150
45 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do reforço submetidos ao ensaio de tração.....	152

46 - Resultado de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração na fibra de juta.....	153
47 - Resultados do ensaio de tração nos tecidos a 45°, a 90° e no reforço.....	153
48 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de tração.....	154
49 - Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração em compósitos similares.....	156
50 - Resumo dos resultados dos materiais ensaiados quanto à tração.....	167
51 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de compressão.....	169
52 - Resultado de outra pesquisa quanto ao ensaio de compressão na resina de poliuretana a base de óleo de mamona.....	170
53 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de compressão.....	171
54 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de compressão.....	172
55 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de compressão.....	174
56 - Quadro comparativo dos diferentes materiais utilizados nesta pesquisa e seus comportamentos quanto à compressão.....	179
57 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de flexão.....	183
58 - Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de flexão na resina de poliéster.....	184

59 – Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de flexão.....	185
60 – Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de flexão.....	187
61 - Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de flexão em compósitos similares.....	189
62 - Quadro comparativo dos diferentes materiais utilizados nesta pesquisa e seus comportamentos quanto à flexão.....	194
63 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de impacto Charpy.....	196
64 - Resultado de outra pesquisa quanto ao ensaio de impacto na resina de poliuretana a base de óleo de mamona.....	197
65 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de impacto Charpy.....	198
66 - Resultado de outra pesquisa quanto ao ensaio de impacto na resina de poliéster.....	199
67 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto Charpy.....	201
68 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado.....	204
69 - Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado.....	204

70 - Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de impacto em compósitos similares.....	208
71 - Quadro comparativo dos diferentes materiais utilizados nesta pesquisa e seus comportamentos quanto ao ensaio de impacto Charpy.....	214
72 - Resultado do ensaio de impacto por queda de dardo dos corpos de prova da matriz de poliuretana.....	216
73 - Resultado do ensaio de impacto por queda de dardo dos corpos de prova da matriz de poliéster.....	220
74 - Resultado do ensaio de impacto por queda de dardo dos corpos de prova da matriz híbrida.....	224
75 - Resultado do ensaio de impacto por queda de dardo dos corpos de prova do compósito.....	228
76 - Massa de falha (w) e energia de falha (FE) dos diferentes materiais.....	232
77 - Massas dos pedaços de tecido, das lâminas e das placas.....	253 e 254
78 – Massas das lâminas prontas de tecido de juta a 90° com poliuretana a base de óleo de mamona.....	255
79 – Massas das lâminas prontas de tecido de juta a 45° (a) e (b) com poliéster.....	256
80 – Massas das placas do compósito.....	257
81 – Massas das placas da matriz de poliuretana.....	258
82 – Massas das placas da matriz de poliéster.....	259
83 – Massas das placas da matriz híbrida.....	260
84 - Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de tração.....	261

85 - Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliuretana no ensaio de tração.....	263
86 - Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de tração.....	264
87 - Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de tração.....	266
88 - Dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de tração.....	267
89 - Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de tração.....	269
90 - Dados sobre os corpos de prova do tecido de juta a 45° submetidos ao ensaio de tração.....	270
91 - Comportamento dos corpos de prova do tecido de juta a 45° submetidos ao ensaio de tração.....	273
92 - Dados sobre os corpos de prova do tecido de juta a 90° submetidos ao ensaio de tração.....	274
93 - Comportamento dos corpos de prova do tecido de juta a 90° submetidos ao ensaio de tração.....	277
94 - Dados sobre os corpos de prova do reforço submetidos ao ensaio de tração.....	278
95 - Comportamento dos corpos de prova do reforço submetidos ao ensaio de tração.....	280
96 - Dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de tração.....	281
97 - Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de tração....	283
98 - Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de compressão.....	284

99 - Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliuretana no ensaio de compressão.....	286
100 - Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de compressão.....	287
101 - Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de compressão.....	289
102 - Dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de compressão.....	290
103 - Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de compressão.....	292
104 - Dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de compressão.....	293 e 294
105 - Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de compressão.....	296 a 299
106 - Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de flexão.....	300
107 - Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de flexão.....	302
108 - Dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de flexão....	303
109 - Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de flexão.....	305 e 306
110 - Dados sobre os corpos de prova do compósito no ensaio de flexão.....	307
111 - Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de flexão.....	309 a 312

112 - Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano da matriz de poliuretana.....	313
113 - Comportamento dos corpos de prova de poliuretana no ensaio de impacto Charpy (normal).....	315
114 - Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano da matriz de poliuretana.....	316
115 - Comportamento dos corpos de prova de poliuretana no ensaio de impacto Charpy (paralelo).....	318
116 - Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano da matriz de poliéster.....	319
117 - Comportamento dos corpos de prova de poliéster no ensaio de impacto Charpy (normal).....	321
118 - Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano da matriz de poliéster.....	322
119 - Comportamento dos corpos de prova de poliéster no ensaio de impacto Charpy (paralelo).....	324
120 - Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado da matriz híbrida.....	325
121 - Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy (normal).....	327 a 329
122 - Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado da matriz híbrida.....	330
123 - Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy (paralelo).....	332 a 334

- 124 - Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado do compósito.....335 e 336
- 125 - Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado.....338 a 342
- 126 - Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado do compósito.....343 e 344
- 127 - Comportamentos dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado.....346 a 349
- 128 - Comportamentos dos corpos de prova da matriz de poliuretana no ensaio de impacto por queda de dardo.....350 e 351
- 129 - Comportamentos dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de impacto por queda de dardo.....352 e 353
- 130 - Comportamentos dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo.....354 a 362
- 131 - Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,10kg.....363
- 132 - Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,30kg.....363
- 133 - Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,50kg.....364
- 134 - Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,70kg.....364
- 135 - Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,90kg.....365

- 136 - Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo.....366 a 374
- 137 - Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,10kg.....375
- 138 - Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,30kg.....376
- 139 - Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,50kg.....377
- 140 - Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,70kg.....377
- 141 - Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,90kg.....378

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ASPLAR – Associação Brasileira de Materiais Plásticos Compostos, USP, São Paulo.

ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para ensaios e materiais).

CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Camaçari, Bahia.

CTC – Companhia Têxtil de Castanhal Ltda, empresa na cidade de Castanhal, no Pará.

In. (inch) – polegada.

MEV – Microscópio eletrônico de varredura.

Proquinor – Produtos Químicos do Nordeste Ltda, empresa na cidade de Parnamirim, Rio Grande do Norte.

PU – poliuretana.

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Área.

a_{cU} – resistência ao impacto.

b – Largura da viga.

D – Deflexão.

d – Espessura da viga.

E - Módulo de elasticidade.

E_b - Módulo de elasticidade em flexão.

F - Força.

f - Fator de conversão para Joules.

FE – Energia de falha.

h – espessura do corpo de prova.

K_{Ic} - Tenacidade à fratura.

L – Vão do suporte.

M - Massa.

M_c - Massa do compósito.

M_f - Massa da fibra.

M_m - Massa da matriz.

m – Declividade da tangente na parte inicial e reta da curva carga-deflexão.

m - Fração em massa.

m_c - Fração em massa do compósito.

m_f - Fração em massa da fibra.

m_m - Fração em massa da matriz.

N_0 – Total de corpos de prova que não falharam.

N_x – Total de corpos de prova que falharam.

n_0 – Número de corpos de prova que não falharam.

n_x – Número de corpos de prova que falharam.

P – Carga.

r – Deformação.

S – Tensão máxima nas fibras mais externas no meio do vão.

V - Volume.

V_c - Volume do compósito.

V_f - Volume da fibra.

V_m - Volume da matriz.

W – Energia absorvida ao quebrar os corpos de prova.

w - Massa de falha.

X_c - Determinada propriedade do compósito.

X_f - Determinada propriedade da fibra.

X_m - Determinada propriedade da matriz.

ρ - Massa específica.

ρ_c - Densidade do compósito.

ρ_f - Densidade da fibra.

ρ_m - Densidade da matriz.

τ - Tensão.

v - Fração volumétrica.

v_c - Fração volumétrica do compósito.

v_f - Fração volumétrica da fibra.

v_m - Fração volumétrica da matriz.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Objetivos da Pesquisa.....	4
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1 Materiais Compósitos.....	7
2.1.1 Definição.....	7
2.1.2 Classificação.....	8
2.1.3 Características.....	10
2.1.4 Constituintes: fibra, matriz e interface fibra/matriz.....	14
2.1.5 Processos de fabricação de compósitos.....	16
2.1.6 Arquitetura dos materiais compósitos.....	22
2.2 Fibras Naturais.....	23
2.2.1 Juta: a fibra e o tecido.....	31
2.3 Resinas poliméricas.....	38
2.3.1 Resina poliuretana a base de óleo de mamona.....	39
2.3.2 Resina poliéster.....	43
2.4 Compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais.....	47
2.5 Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos.....	49
2.5.1 Resistência à tração.....	49
2.5.2 Resistência à compressão.....	51
2.5.3 Resistência à flexão.....	51

2.5.4 Resistência ao impacto.....	52
2.6 Fratura em compósitos.....	53
2.7 Divisórias.....	54
2.8 Outras pesquisas sobre compósitos de matrizes poliméricas e fibras naturais.....	61
3 METODOLOGIA.....	93
3.1 Materiais e equipamentos.....	93
3.2 Procedimentos experimentais.....	99
3.2.1 Propriedades dos materiais constituintes do compósito.....	101
3.2.1.1 Propriedades do tecido de juta.....	101
3.2.1.2 Propriedades da resina de poliuretana a base de óleo de mamona.....	102
3.2.1.3 Propriedades da resina de poliéster.....	103
3.2.2 Os ensaios normalizados.....	104
3.2.2.1 O ensaio de tração.....	105
3.2.2.2 O ensaio de compressão.....	107
3.2.2.3 O ensaio de flexão.....	108
3.2.2.4 O ensaio de impacto Charpy.....	111
3.2.2.5 O ensaio de impacto por queda de dardo.....	113
3.2.3 Quantificação de material segundo os ensaios mecânicos.....	115
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	117
4.1 Preparação do compósito.....	117
4.1.1 Corte dos pedaços de tecido de juta e obtenção das massas respectivas.....	117

4.1.2	Preparação das lâminas de tecido de juta a 90° com a resina de poliuretana a base de óleo de mamona.....	119
4.1.3	Preparação das lâminas de tecido de juta a 45° com a resina de poliéster.....	121
4.1.4	Montagem dos compósitos.....	124
4.2	Preparação das matrizes de poliuretana a base de óleo de mamona.....	127
4.3	Preparação das matrizes de poliéster.....	129
4.4	Preparação das matrizes híbridas.....	130
4.5	Determinação da fração em massa de fibra e de matriz no compósito.....	133
4.6	Determinação da fração volumétrica de fibra e de matriz no compósito.....	135
4.7	Marcação dos corpos de prova sobre as placas do compósito, da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster e da matriz híbrida.....	137
4.8	Os ensaios de tração.....	139
4.8.1	Ensaio de tração nos corpos de prova da matriz de poliuretana.....	140
4.8.2	Ensaio de tração nos corpos de prova da matriz de poliéster.....	143
4.8.3	Ensaio de tração nos corpos de prova da matriz híbrida.....	145
4.8.4	Ensaio de tração nos corpos de prova dos tecidos de juta.....	147
4.8.4.1	Ensaio de tração nos corpos de prova do tecido de juta a 45°.....	147
4.8.4.2	Ensaio de tração nos corpos de prova do tecido de juta a 90°.....	149
4.8.4.3	Ensaio de tração nos corpos de prova do reforço.....	151
4.8.5	Ensaio de tração nos corpos de prova do compósito.....	153
4.8.6	Análise dos resultados dos ensaios de tração.....	157
4.9	Os ensaios de compressão.....	167
4.9.1	Ensaio de compressão nos corpos de prova da matriz de poliuretana.....	168
4.9.2	Ensaio de compressão nos corpos de prova da matriz de poliéster.....	170

4.9.3 Ensaio de compressão nos corpos de prova da matriz híbrida.....	172
4.9.4 Ensaio de compressão nos corpos de prova do compósito.....	173
4.9.5 Análise dos resultados dos ensaios de compressão.....	175
4.10 Os ensaios de flexão.....	179
4.10.1 Ensaio de flexão nos corpos de prova da matriz de poliéster.....	182
4.10.2 Ensaio de flexão nos corpos de prova da matriz híbrida.....	184
4.10.3 Ensaio de flexão nos corpos de prova do compósito.....	186
4.10.4 Análise dos resultados dos ensaios de flexão.....	190
4.11 Os ensaios de impacto Charpy.....	194
4.11.1 Ensaio de impacto Charpy na matriz de poliuretana.....	195
4.11.1.1 As dimensões dos corpos de prova.....	195
4.11.1.2 O resultado do ensaio de impacto Charpy na matriz de poliuretana.....	195
4.11.2 Ensaio de impacto Charpy na matriz de poliéster.....	197
4.11.2.1 As dimensões dos corpos de prova.....	197
4.11.2.2 O resultado do ensaio de impacto Charpy na matriz de poliéster.....	197
4.11.3 Ensaio de impacto Charpy na matriz híbrida.....	200
4.11.3.1 As dimensões dos corpos de prova.....	200
4.11.3.2 O resultado do ensaio de impacto Charpy na matriz híbrida.....	200
4.11.4 Ensaio de impacto Charpy no compósito.....	202
4.11.4.1 As dimensões dos corpos de prova.....	202
4.11.4.2 O resultado do ensaio de impacto Charpy no compósito.....	202
4.11.5 Análise dos resultados dos ensaios de impacto Charpy.....	209
4.12 Os ensaios de impacto por queda de dardo.....	214
4.12.1 Ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz de poliuretana.....	214

4.12.1.1	As espessuras nos centros dos corpos de prova.....	214
4.12.1.2	O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo na matriz de poliuretana.....	215
4.12.1.3	A massa de falha (w).....	217
4.12.1.4	A energia de falha (FE).....	217
4.12.2	Ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz de poliéster.....	218
4.12.2.1	As espessuras nos centros dos corpos de prova.....	218
4.12.2.2	O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo na matriz de poliéster.....	218
4.12.2.3	A massa de falha (w).....	222
4.12.2.4	A energia de falha (FE).....	222
4.12.3	Ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz híbrida.....	222
4.12.3.1	As espessuras nos centros dos corpos de prova.....	222
4.12.3.2	O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo na matriz híbrida.....	223
4.12.3.3	A massa de falha (w).....	225
4.12.3.4	A energia de falha (FE).....	226
4.12.4	Ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova do compósito.....	226
4.12.4.1	As espessuras nos centros dos corpos de prova.....	226
4.12.4.2	O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo no compósito.....	226

4.12.4.3 A massa de falha (w).....	230
4.12.4.4 A energia de falha (FE).....	230
4.12.5 Análise do ensaio de impacto por queda de dardo.....	232
5 CONCLUSÃO.....	248
REFERÊNCIAS.....	244
GLOSSÁRIO.....	249
ANEXOS.....	253

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O uso de materiais reforçados por fibras vegetais remonta à Antiguidade, quando reforçavam tijolos de adobe com raízes e folhas. Segundo Agopyan e Savastano Júnior (2003, p. 122 e 123), o estudo sistemático de fibras naturais com finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra em 1970 e, em 1980, no Brasil, o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED), Camaçari, Bahia, inicia estudos pioneiros nessa área. Entretanto, foi constatado que esse estudo já estava sendo realizado à bem mais tempo, pois, as primeiras patentes de utilização de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais datam da década de 60. Durante os anos 70 e 80, as fibras sintéticas substituíram as fibras vegetais, devido ao seu melhor desempenho e aos aspectos econômicos. A partir de 90, preocupações ecológicas fizeram ressurgir o interesse em materiais renováveis, tais como as fibras e os óleos vegetais, principalmente na indústria automotiva. Aliados as preocupações ecológicas, aconteceram também desenvolvimentos tecnológicos e vantagens econômicas no uso desses materiais.

Segundo Muller e Krobjilowski (2003, p. 111), materiais compósitos reforçados por fibras naturais estão sendo considerados como alternativas aos compósitos reforçados por fibras sintéticas como a fibra de vidro, de carbono ou aramida, devido à conscientização ecológica e exigências legislativas quanto ao meio ambiente, pois o processo de fabricação, uso e deterioração destes compósitos são mais críticos. Só como exemplo, quanto à energia necessária para a produção, esses autores citam que o processo de fabricação de uma manta de fibra de vidro

exige 30 - 40% a mais de energia do que a fabricação de fios não trançados de fibras naturais, considerando o cultivo, a colheita e a dissociação da fibra.

A substituição das fibras sintéticas usadas tradicionalmente em compósitos por fibras naturais tem se tornado uma área de interesse para desenvolvimento na ciência dos polímeros e para aplicações industriais, porque além dos benefícios ecológicos, através do menor impacto ambiental, contribui para o desenvolvimento técnico e tecnológico, pois compósitos de matrizes poliméricas reforçadas por fibras naturais exigem processo de fabricação bastante simples, apresentam excelentes características como baixo peso, alta resistência e rigidez e, por isso, tem encontrado emprego em várias áreas de aplicações, trazendo também benefícios econômicos, pela necessidade de incrementos em agro-negócios.

Ainda segundo Muller e Krobjilowski (2003, p. 114), o uso de fibras naturais contribui para a redução do peso do compósito e para a melhoria de propriedades específicas tais como resistência ao impacto ou absorção sonora, pois a maioria das fibras tem espaços vazios denominados lúmens os quais determinam uma densidade 40% menor que das fibras de vidro, e por isso, as fibras naturais apresentam um grande potencial para reforços em estruturas leves. Outras vantagens para utilização de fibras naturais como reforços em compósitos são: seu baixo custo e serem materiais renováveis e biodegradáveis.

1.2 Justificativa

Há um *déficit* habitacional considerável no Brasil, de aproximadamente 7,7 milhões de moradias¹ e, no Pará, como parte desse país em desenvolvimento, o quadro é de carência de 400 mil unidades². Este estudo proposto surge da constatação da necessidade de se fabricar materiais alternativos que possam ser empregados como painéis divisórios de ambientes, com a inclusão de materiais de baixo custo, renováveis e recicláveis e que, portanto, podem vir a ser produtos de alto valor agregado.

A escolha pelo tecido de juta foi feita por ser um produto natural, renovável, biodegradável e de baixo custo. Outra importância da utilização do tecido de juta no compósito é de dar outra utilização a esse material regionalmente beneficiado, cuja principal utilização, atualmente, é quase exclusivamente para sacarias e artesanatos. A resina de poliuretana, mesmo sendo industrializada, é de base natural, processada do óleo de mamona, que é renovável e biodegradável. Essa resina utilizada na fabricação do compósito tem aplicações na construção civil como impermeabilizante, como barreira anti-corrosiva e para tratamento de juntas de dilatação. Para dar rigidez e melhor acabamento superficial, foi adicionada mais uma resina polimérica comercial: a de poliéster. A utilizada neste compósito não é biodegradável, mas experimentalmente, no Brasil já conseguiram obter uma poliéster biodegradável e que, a partir da produção em larga escala, possibilitará a substituição da resina de poliéster utilizada no compósito por esta biodegradável.

¹<http://ezine.tiosam.com>. Acesso em: 07/02/07.

²<http://www.comciencia.br>. Acesso em: 07/02/07.

As motivações sócio-econômicas que contribuíram para a escolha do tema são: possibilidade de produção de painéis divisórios incluindo materiais de baixo custo e produção local, como o tecido de juta, com nova aplicação que não seja a sacaria e o artesanato; utilização de recursos renováveis (a juta e a mamona); possibilidade de substituição de materiais convencionais poluentes, como o cimento, por recursos naturais ou de base natural; produção desses painéis com baixo consumo de energia e de recursos; utilização de mão-de-obra sem grandes qualificações (técnicas de fabricação simples) e possibilidade de contribuir para a não agressão a natureza após o descarte, por ser o compósito constituído também de materiais biodegradáveis, com exceção da resina de poliéster.

As motivações técnicas e tecnológicas são: a utilização de materiais de processamento simples, melhoria das propriedades mecânicas desses materiais quando reunidos neste compósito; possibilidades de novos projetos (novas formas e utilizações) e contribuição para o estudo e aplicação conjunta da juta, poliéster e do óleo de mamona na construção civil.

Portanto, neste estudo será tratado um tema que remete às preocupações atuais com o meio ambiente, qualidade de vida, desenvolvimento de nova tecnologia, utilização de materiais não-convencionais e preocupações com a produção habitacional.

1.3 Objetivos da pesquisa

Para se obter materiais compósitos confiáveis para aplicações estruturais e utilizar todo o potencial das fibras como reforço, segundo Albuquerque *et al.* (1999, p. 833), tanto a impregnação perfeita das fibras quanto a formação de

forte ligação interfacial devem ser garantidas. Para a confecção do compósito com a finalidade de constituir painéis divisórios de ambientes, existe a necessidade do conhecimento de como se comporta o produto resultante da utilização do tecido de juta como reforço, e das resinas de poliuretana à base de óleo de mamona e de poliéster como matrizes. O objetivo geral desta pesquisa é a avaliação das propriedades mecânicas (resistência à tração, à compressão, à flexão e ao impacto) de um eco-compósito para aplicação como painel divisório de ambientes. Os objetivos específicos são:

- Determinação das propriedades mecânicas de tração, compressão e impacto da matriz de poliuretana e avaliação de sua contribuição para o compósito;
- Determinação das propriedades mecânicas de tração, compressão, flexão e impacto da matriz de poliéster e avaliação de sua contribuição para o compósito;
- Determinação das propriedades mecânicas de tração, compressão, flexão e impacto da matriz híbrida (de poliuretana e poliéster) e avaliação de sua contribuição para o compósito;
- Determinação da propriedade mecânica de tração do tecido de juta e avaliação de sua contribuição como reforço para a matriz híbrida, constituindo, assim, o compósito;
- Avaliação da qualidade da adesão fibra/matriz através de análise microscópica das regiões de fratura dos compósitos.

Quanto ao ensaio de impacto, serão realizados dois tipos: o ensaio quantitativo através do ensaio de impacto Charpy, para verificar o valor da energia absorvida e da resistência ao impacto e o outro que acrescenta informações

qualitativas, através do ensaio de queda de dardo, com observações diretas sobre os danos causados nos corpos de prova.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Materiais compósitos

2.1.1 Definição

Na literatura, podem ser encontrados diversos conceitos de materiais compósitos, também denominados conjugados ou compostos. Um material compósito pode ser conceituado como

Um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta (MENDONÇA, 2005, p. 3).

Um material compósito é constituído de uma fase contínua chamada **matriz (aglomerante)** e de uma ou mais outras fases descontínuas constituindo as **cargas**. As cargas são materiais não solúveis na fase matriz. As chamadas **cargas inertes** ou **fillers (enchimentos)** são usadas em quantidades suficientes para diminuir custos ou melhorar propriedades como leveza, estabilização, retardamento de chamas, etc e as **cargas de reforços** são utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas da matriz. As propriedades dos compósitos são funções das propriedades de suas fases constituintes e da sua utilização conjunta.

A combinação de materiais, para constituir um compósito, pode ser entre metais, cerâmicas e polímeros. As combinações podem ser diversas dependendo das características de cada um e da compatibilidade entre eles (FIG. 1). Os **materiais metálicos**, normalmente combinações de elementos metálicos, são extremamente bons condutores de eletricidade e calor, opacos, resistentes e

deformáveis, o que contribui para seu uso extensivo em aplicações estruturais. Os **materiais cerâmicos**, compostos de elementos metálicos e não-metálicos, são resistentes à passagem de eletricidade e calor, são mais resistentes às altas temperaturas e quanto ao comportamento mecânico, são duros, mas muito quebradiços. Nesta classificação estão os minerais argilosos, cimento e vidro. Muito dos **materiais poliméricos**, que incluem a família dos plásticos e borrachas, são compostos orgânicos quimicamente baseados em carbono, hidrogênio e outros elementos não-metálicos. Os materiais poliméricos têm estruturas moleculares muito largas e são materiais de baixa densidade e podem ser extremamente flexíveis (CALLISTER, 2003, p. 5).

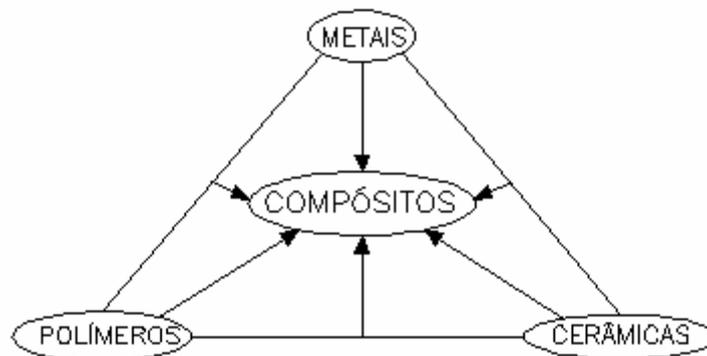


FIGURA 1 – Combinação de materiais para constituir compostos.
Fonte: Adaptada de BEAUMONT, 1989, in SILVESTRE FILHO, 2001, p. 6.

2.1.2 Classificação

Quanto à classificação dos compostos, Matthews e Rawlings (1994) a fazem baseada na geometria dos seus componentes estruturais, separando-os em compostos reforçados por fibras e reforçados por partículas (FIG. 2).

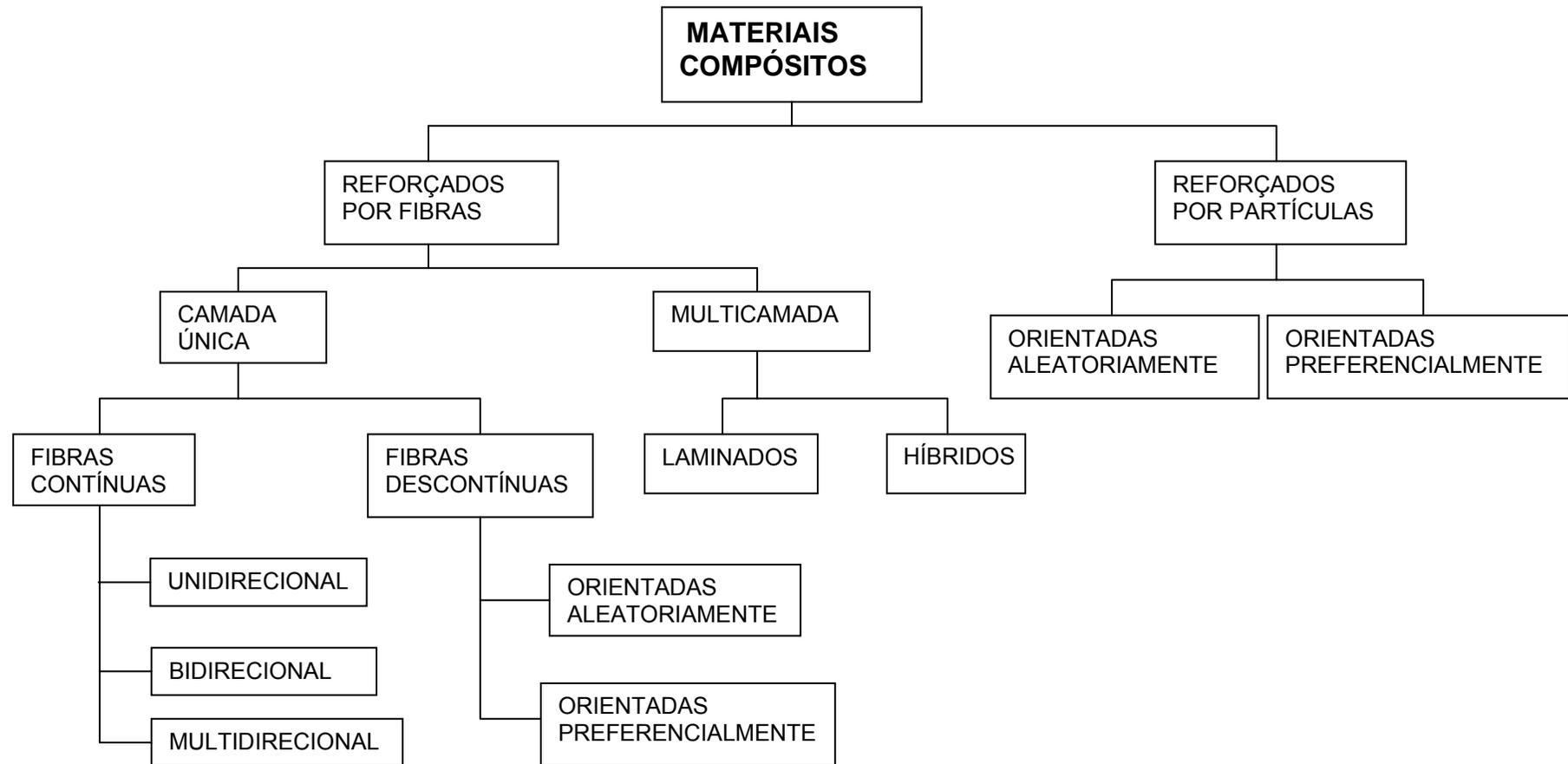


FIGURA 2 – Organograma de classificação dos materiais compósitos.
Fonte: Adaptada de MATTEWS; RAWLINGS, 1994, in SILVESTRE FILHO, 2001, p. 10.

Segundo Mendonça (2005, p. 5), as fibras apresentam comprimento na faixa de 5 a 25mm e as partículas não apresentam uma dimensão predominante como as fibras e, sua utilização não é tanto para o incremento da resistência da matriz e sim, mais para a melhoria de outras propriedades, tais como: condutibilidade ou isolamento térmico e elétrico, resistência a altas temperaturas, redução de atrito, resistência ao desgaste superficial, melhoria de usinabilidade, aumento da dureza superficial e redução de custos.

Na FIG. 3, são mostrados, esquematicamente, alguns exemplos de compósitos reforçados por partículas e por fibras.

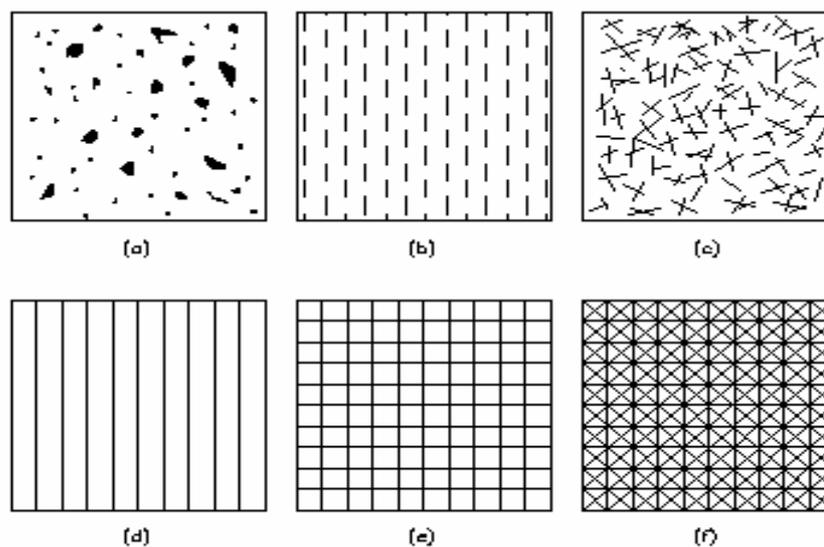


FIGURA 3 – Exemplos de compósitos reforçados: (a) por partículas aleatórias (*fillers*); (b) por fibras descontínuas (*whiskers*) unidirecionais; (c) por fibras descontínuas (*whiskers*) aleatórias; (d) por fibras contínuas unidirecionais; (e) por tecido bi-direcional e (f) por tecido multidirecional.

Fonte: DANIEL e ISHAI, 1994, p. 19.

2.1.3 Características

Flinn e Trojan (1990, p. 651) afirmam que do ponto de vista simplesmente mecânico, um compósito consiste de fibras ou partículas de uma dada resistência,

módulo de elasticidade E e tenacidade à fratura K_{Ic} e de uma matriz que tem um conjunto diferente de propriedades, onde a questão principal é se o compósito terá propriedades que representará a soma dos dois elementos segundo a fração de volume de cada um. Este princípio denominado Regra das Misturas (*Rule of Mixtures*) é importantíssimo na caracterização do compósito.

A forma geral da equação da Regra das Misturas é:

$$X_c = X_f v_f + X_m v_m \quad (1)$$

onde X_c representa uma certa propriedade do compósito, v é a fração volumétrica e os subscritos f e m referem-se à fibra e à matriz respectivamente.

Segundo esta fórmula, a consideração principal das propriedades do compósito é que elas são dependentes da proporção das fases. Muitas propriedades dos compósitos podem ser estimadas por meio da fração em massa (m), que é determinada durante a fabricação do compósito ou da fração volumétrica (v) de seus constituintes, que é freqüentemente estipulada. Do ponto de vista experimental, a medida das frações em massa é mais fácil de se obter do que as frações volumétricas correspondentes dos elementos constituintes. Existe, entretanto, uma conexão analítica entre estes fatores de proporção que permitem a conversão da fração em massa para fração volumétrica e vice-versa.

A massa do compósito (M_c) corresponde à massa da fibra (M_f) somado a massa da matriz (M_m):

$$M_c = M_f + M_m \quad (2)$$

$$\text{e que } m_f + m_m = 1 \text{ ou } 100\% \quad (3)$$

onde m_f é a fração em massa da fibra e m_m é a fração em massa da matriz.

O valor da fração em massa da fibra é:

$$m_f = M_f / M_c \quad (4)$$

A fração em massa da matriz é:

$$m_m = M_m / M_c \quad (5)$$

O volume do compósito (V_c) corresponde ao volume da fibra (V_f) somado ao volume da matriz (V_m):

$$V_c = V_f + V_m \quad (6)$$

$$\text{e que } v_f + v_m = 1 \quad \text{ou } 100\% \quad (7)$$

onde v_f é a fração de volume da fibra e v_m é a fração de volume da matriz.

A fração de volume da fibra é:

$$v_f = V_f / V_c \quad (8)$$

A fração de volume da matriz é:

$$v_m = V_m / V_c \quad (9)$$

Relaciona-se a fração em massa com a fração volumétrica pela introdução da massa específica (ρ) do compósito e dos seus constituintes. Como $M = \rho \cdot V$ (10), a equação (2) fica reescrita desta forma:

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (11)$$

Onde, ρ_c , ρ_f e ρ_m são, respectivamente, a massa específica do compósito, a massa específica da fibra e a massa específica da matriz. Dividindo tudo por V_c , a fórmula fica:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (12)$$

Relacionando a massa, o volume e a massa específica, tem-se que a fração em massa da fibra é:

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} = \frac{(\rho_f V_f)}{(\rho_c V_c)} = \frac{\rho_f}{\rho_c} v_f \quad (13)$$

e similarmente, que a fração em massa da matriz é:

$$m_m = \frac{M_m}{M_c} = \frac{(\rho_m V_m)}{(\rho_c V_c)} = \frac{\rho_m}{\rho_c} v_m \quad (14)$$

Substituindo o valor de ρ_c (Eq. 12), tem-se a conversão entre a fração em massa e fração volumétrica da fibra e da matriz pelas seguintes equações:

$$m_f = \frac{\rho_f}{(\rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m)} \cdot v_f \quad (15)$$

$$m_m = \frac{\rho_m}{(\rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m)} v_m \quad (16)$$

Entretanto, as propriedades de um compósito, na maioria das vezes, são funções complicadas de vários parâmetros, onde os constituintes interagem normalmente de modo sinérgico para prover as propriedades do compósito que não são totalmente avaliadas pela Regra das Misturas. Os compósitos têm suas propriedades fortemente influenciadas pela distribuição, interação e propriedades dos seus constituintes.

As características físico-químicas das cargas dependem da razão de aspecto (*aspect ratio*), do tamanho e distribuição das partículas, da natureza química da superfície, da fração volumétrica máxima de empacotamento e da pureza química.

Os reforços particulados apresentam uma razão de aspecto (razão do comprimento pelo diâmetro da partícula) próximo ou inferior à unidade. Os reforços fibrosos possuem elevada razão de aspecto, muito superior a um, geralmente acima de 100. A razão de aspecto é o parâmetro mais importante para promover uma

característica de reforço, pois quanto maior for a razão de aspecto, maior é a probabilidade de a carga atuar como reforço. Logo, os compósitos reforçados por fibras são caracterizados pelo fato de que neles, as fibras apresentam o seu comprimento muito maior do que a dimensão de suas seções transversais (diâmetro).

O tamanho e distribuição das partículas influenciam tanto as propriedades mecânicas como as reológicas dos compósitos e devem ser bem controladas.

Uma outra característica dos compósitos é com relação à anisotropia, ou seja, o compósito é dito ser anisotrópico ou apresentar anisotropia, quando as propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas num ponto do material, variam em função da direção nas quais estão sendo analisadas. Isso permite ao projetista desenvolver as propriedades do material juntamente com as características geométricas e funcionais da peça com o objetivo de se obter o desempenho desejado, pois poderá planejar para que a tensão máxima em serviço esteja na direção em que haja a mais alta resistência.

O conhecimento da natureza química da superfície nos dá uma idéia da compatibilidade química entre a carga e sua matriz. Caso haja compatibilidade, haverá incremento na aderência fibra/matriz e caso não, a natureza química da superfície da carga deverá ser modificada para melhorar a aderência entre os constituintes do compósito.

2.1.4 Constituintes: fibra, matriz e interface fibra/matriz

As fibras compreendem o componente estrutural do compósito, podendo ser um material orgânico ou inorgânico (metálico ou cerâmico). O papel das fibras é

suportar as cargas máximas e, impedir que as deformações ultrapassem limites aceitáveis, portanto, devem ter resistência, rigidez e maleabilidade (BIASOTTO MANO, 2003, p. 126).

A matriz de um compósito fibroso pode ser um metal, um polímero ou uma cerâmica. Geralmente, os metais são usados como matrizes quando se deseja alguma ductibilidade, os polímeros são mais usados para aplicações com temperaturas relativamente baixas e, compósitos com matrizes cerâmicas são usados quando se deseja melhorar a resistência às altas temperaturas (DANIEL e ISHAI, 1994, p. 20).

Particularizando apenas para os polímeros, por constituir as matrizes do compósito desta pesquisa, eles podem ser classificados por diversas maneiras: quanto ao seu comportamento ao calor, quanto à resistência mecânica, quanto à escala de fabricação e grupos (BIASOTTO MANO, 2003, p. 64).

Quanto ao seu comportamento ao calor, podem se apresentar como termoplásticos ou termorrígidos (também conhecidos como termofixos). Os polímeros termoplásticos se fundem em um líquido viscoso capaz de sofrer processos de extrusão, enquanto os termorrígidos, ao invés se sofrerem processo de fusão, começam a se decompor termicamente (SHACKELFORD apud SILVESTRE FILHO, 2001, p. 15).

Quanto à sua resistência mecânica, os polímeros são agrupados em borrachas ou elastômeros, plásticos e fibras. Quanto à escala de fabricação, têm-se os plásticos de comodidade (*commodities*), que são a maior parte da produção mundial de plásticos, compreendendo polietileno, polipropileno, poliestireno, etc. e plásticos de especialidade (*specialities*), como o poli (óxido de metileno), o poli (cloreto de vinilideno), etc. Do ponto de vista de aplicação, os plásticos podem ser

distribuídos em dois grandes grupos: de plásticos de uso geral e de plásticos de engenharia (BIASOTTO MANO, 2003, p. 64).

A fase matriz tem como função: manter as fibras alinhadas e espaçadas; transferir os esforços externos para as fibras; proteger as fibras de abrasão e reações químicas e, devido a sua plasticidade, servir como barreira à propagação de trincas (CALLISTER, 2003, p. 546).

A interface é a região existente entre a fibra e a matriz, que tem grande influência sobre as características do compósito, ou seja, sobre seu desempenho mecânico e sua integridade estrutural, pois é na interface que as diferenças nas propriedades elásticas da matriz e da fibra são interligadas através da transferência dos esforços atuantes na matriz para a fibra. É comum melhorar a interface através do tratamento do componente estrutural com a utilização de um agente compatibilizante.

2.1.5 Processos de fabricação de compósitos

Para Mendonça (2005, p. 25-40), os processos de fabricação de compósitos se resumem a:

- Processos de conformação molhada:
 - processo manual (*hand lay-up*);
 - bobinamento (*filament winding*);
 - trefilação (*pultrusion*);
 - moldagem por membrana (*bag molding*).
- Processos com preformados (*premixes*):
 - *premix* em bloco – BMC;

- *premix* em folha – SMC;
- *prepregs*.

A conformação molhada ocorre enquanto a resina ainda está líquida e o processo de cura ocorre em uma única etapa. A combinação dos componentes, fibra e matriz é feita durante a conformação. Já os preformados são sistemas adquiridos previamente preparados, em forma de blocos, folhas ou fitas (os *prepregs*), e as fibras se encontram previamente impregnadas com resina.

O processo manual (FIG. 4), empregado na fabricação do compósito desta pesquisa, é a técnica mais antiga e simples de manufatura de componentes. As camadas de reforço (unidirecional, tecido, manta, etc) são colocadas manualmente sobre a superfície de um molde e a resina é aplicada sobre cada camada com pincel, espátula ou *spray*. E assim, as camadas são sobrepostas até a espessura desejada, curando à temperatura ambiente ou aplicando calor. Essa técnica é bastante adequada para o uso das resinas poliéster e epóxi. As principais vantagens e características desta técnica são: produção de peças grandes de forma contínua, sem emendas ou uniões; requer baixo investimento inicial; o processo é artesanal (não exigindo grande qualificação de mão-de-obra) e facilidade de construção de painéis-sanduiche. As desvantagens são: baixo volume de produção; requer muita mão-de-obra; tempo de cura alto (geralmente em temperatura ambiente); a qualidade depende da habilidade do operário e possibilidade de grande porcentagem de refugo (desperdício).

O bobinamento (*filament winding*) (FIG. 5) é um processo usado para a produção de componentes de superfície de revolução como tubos, cilindros e esferas. É bastante usado na produção de vasos de pressão e de grandes tanques para a indústria química e eixos de transmissão de potência.

O processo de trefilação (*pultrusion*) (FIG. 6) de perfis de materiais compostos é um processo automático de geração de perfis contínuos de seção uniforme, onde uma grande quantidade de fios é puxada através de um banho de resina passando por um dispositivo que dará a forma do perfil desejado. Pode se usar fios contínuos ou mantas nesse processo e a barra pré-formada pode ser cortada no comprimento desejado.

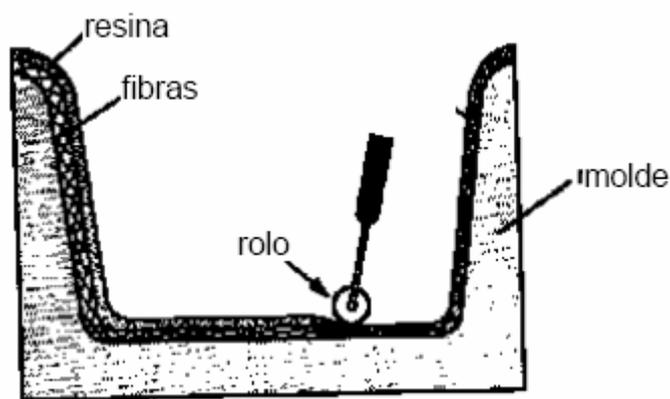


FIGURA 4 – Processo manual (*hand lay-up*) de fabricação de compósitos.
Fonte: PEREIRA, 2003, p. 13.

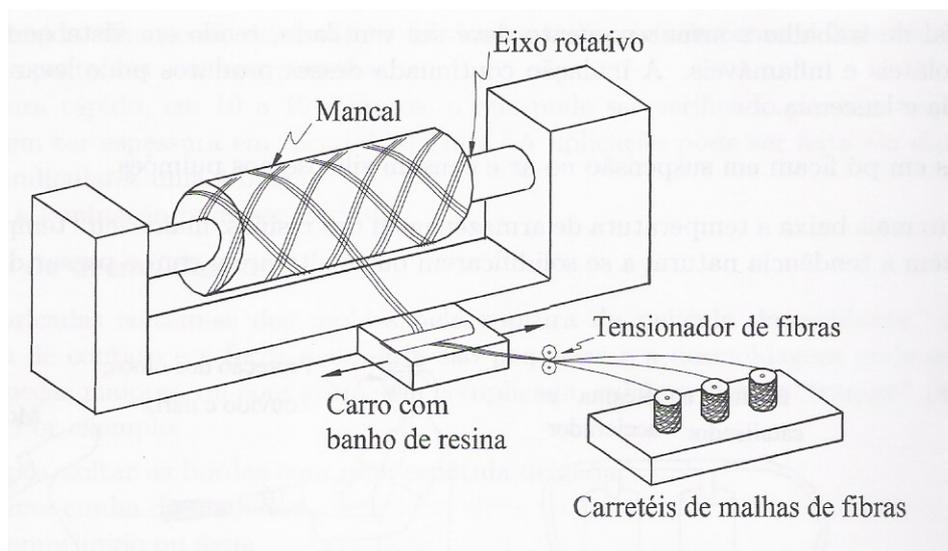


FIGURA 5 – Processo de bobinamento (*filament winding*) de fabricação de compósitos.
Fonte: MENDONÇA, 2005, p. 32.

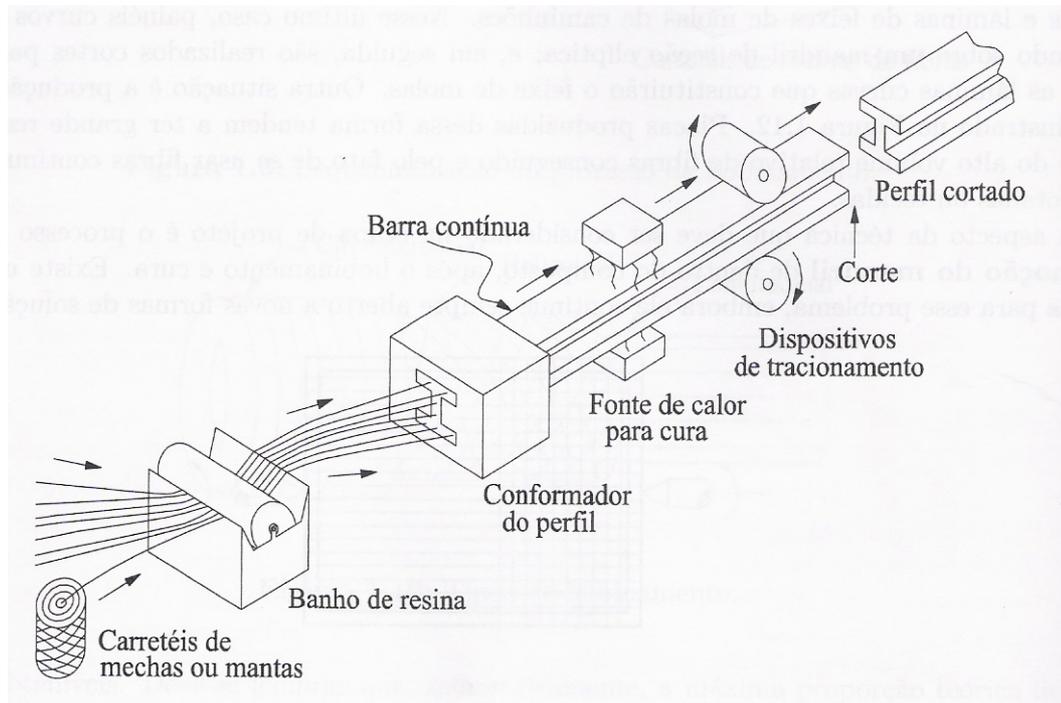


FIGURA 6 – Processo de trefilação (*pultrusion*) de fabricação de compósitos.
 Fonte: MENDONÇA, 2005, p. 34.

O processo de moldagem por membrana (FIG. 7) constitui um refinamento do processo manual no qual a superfície externa do compósito é recoberta por uma membrana e, com o uso do vácuo, de pressão externa ou autoclave se consegue melhorar a qualidade da superfície externa, a remoção do excesso de resina e a expulsão de bolhas de ar.

Os processos com preformados (também denominados *premixes* ou pré-impregnados) estão disponíveis comercialmente para a fabricação de peça e já vêm com as fibras impregnadas por resina parcialmente curada, permitindo métodos de produção de moldados de forma mais limpa, rápida e uniforme, porém mais caras que os dos métodos molhados.

Os blocos preformados (BMC) (FIG. 8a) são constituídos por uma mistura de resina, reforço, cargas e, eventualmente, pigmentos e outros aditivos. O reforço é

picado em comprimentos de 3-10mm, com um máximo de 20% de volume relativo de fibra. Esses preformados são submetidos a altas pressões (35MPa) e temperaturas de até 500°C. Sua preparação é muito cara, o que faz com que seja empregado na produção em série de peças pequenas.

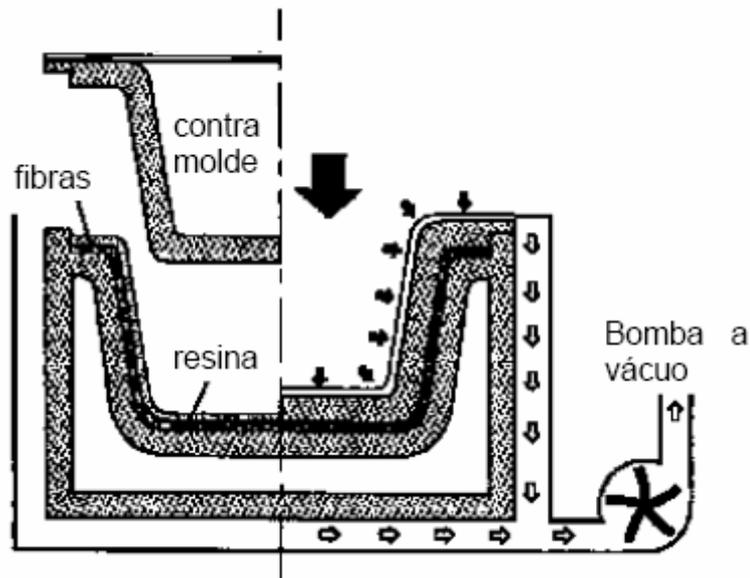


FIGURA 7 – Processo de moldagem por membrana para fabricação de compósitos.
Fonte: PEREIRA, 2003, p. 14.

As chapas preformadas (SMC) (FIG. 8b) são usadas semelhante aos blocos, utilizadas na indústria automobilística, compostas por resina de poliéster e fibras de vidro picotadas. Nelas, o volume de fibra já é de 20-35% e o comprimento das fibras pode ser de 20-50mm, implicando em propriedades mecânicas superiores.

O desenvolvimento dos prepregs (FIG. 9) foi uma das maiores revoluções na tecnologia de manufatura de compósitos e se constituem de uma fita de fibras pré-impregnadas por resina polimérica, geralmente epóxi, mas também podem ser por resinas termoplásticas. As fibras são de vidro, carbono ou aramida, em formas contínuas ou picotadas, unidirecionais ou aleatórias.

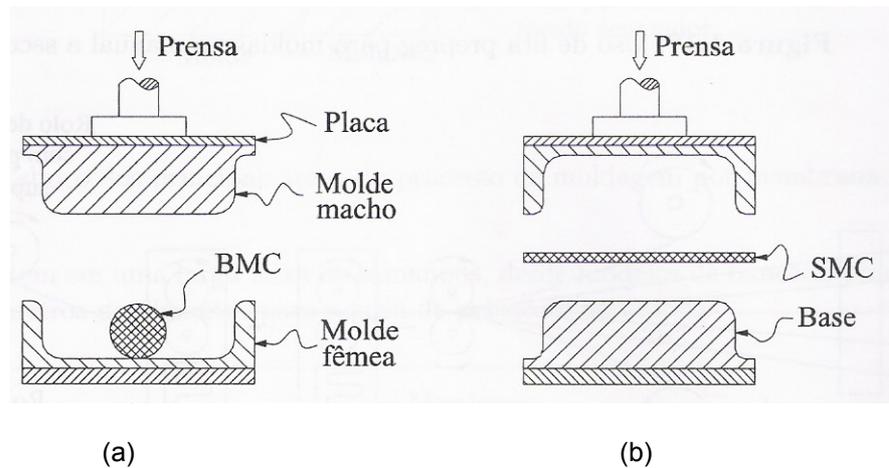


FIGURA 8 – Processo com preformados: (a) blocos (BMC) e (b) chapas (SMC) para fabricação de compósitos.
 Fonte: MENDONÇA, 2005, p. 38.

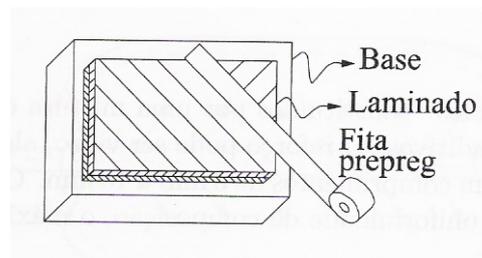


FIGURA 9 – Processo com preformados: uso de fita prepreg para fabricação de compósitos.
 Fonte: MENDONÇA, 2005, p. 37.

Existe também, segundo Mendonça (2005, p. 38), o processo por centrifugação (FIG. 10), utilizado na produção de peças de revolução e funcionando como o oposto ao bobinamento, onde o mandril rotativo é preparado para ser moldado internamente. Resina e fibras são introduzidas por um tubo no interior do mandril por um dos pólos do conjunto e a força centrífuga força os componentes contra a parede durante o processo de cura. A cura é acelerada ao fluir ar quente pelo interior do mandril.

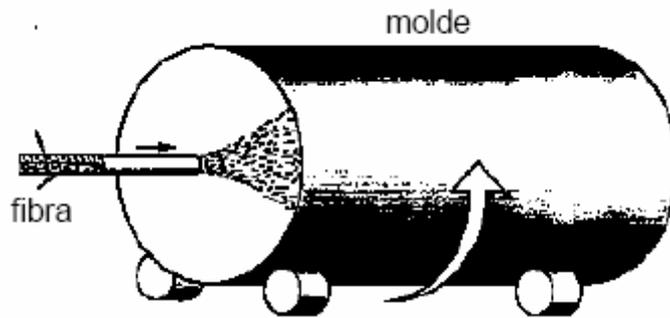


FIGURA 10 – Processo por centrifugação para fabricação de compósitos.
Fonte: PEREIRA, 2003, p. 17.

2.1.6 Arquitetura dos materiais compósitos

Segundo Pereira (2003, p. 20-22), a arquitetura dos materiais compósitos pode ser: laminados ou sanduíches.

Os laminados (FIG. 11), ou estruturas laminadas, são constituídos de sucessivas lâminas de fibras impregnadas em resina segundo uma orientação com um eixo de referência.

A estrutura tipo sanduíche (FIG. 12) consiste de uma alma de baixo peso (miolo), com boas propriedades à compressão, entre duas placas com alta rigidez, conciliando leveza e rigidez à estrutura final. Essa alma pode ser plena ou oca. A alma plena pode ser de resina, esponja ou madeira e a alma oca, pode ser do tipo colméia ou ondulada. Já as placas podem ser de aço, laminado, etc.

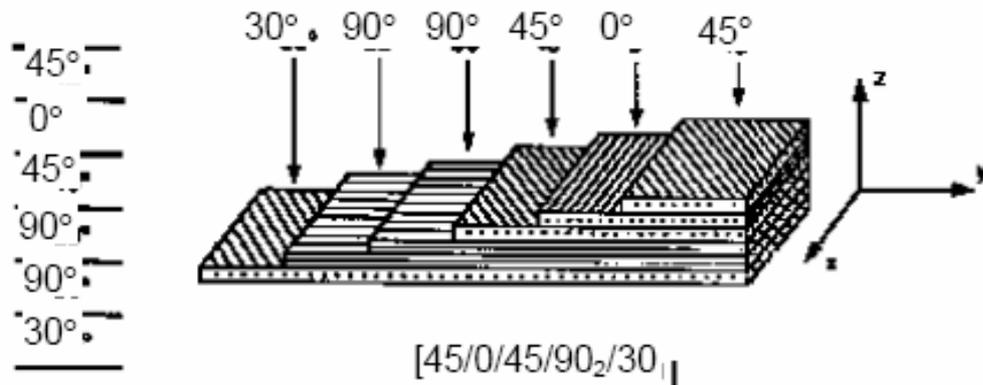


FIGURA 11 – Compósito de estrutura laminada.
Fonte: PEREIRA, 2003, p. 21.

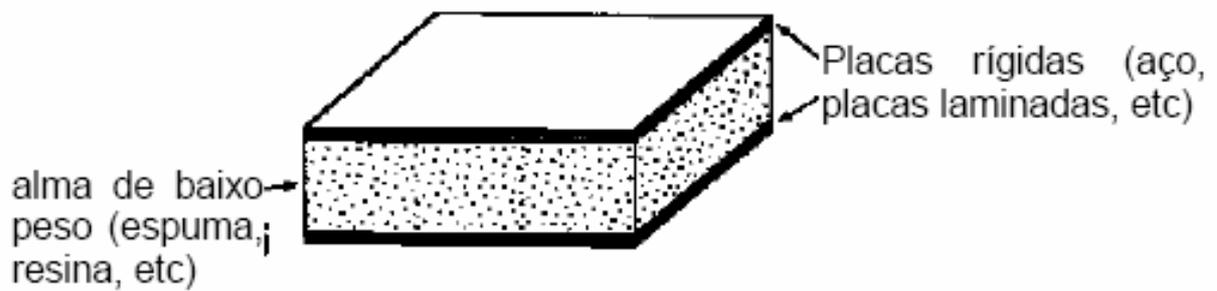


FIGURA 12 – Compósito de estrutura tipo sanduíche.
Fonte: PEREIRA, 2003, p. 22.

2.2 Fibras naturais

As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com sua origem. Elas podem ser extraídas de vegetais, animais ou minerais (FIG. 13).

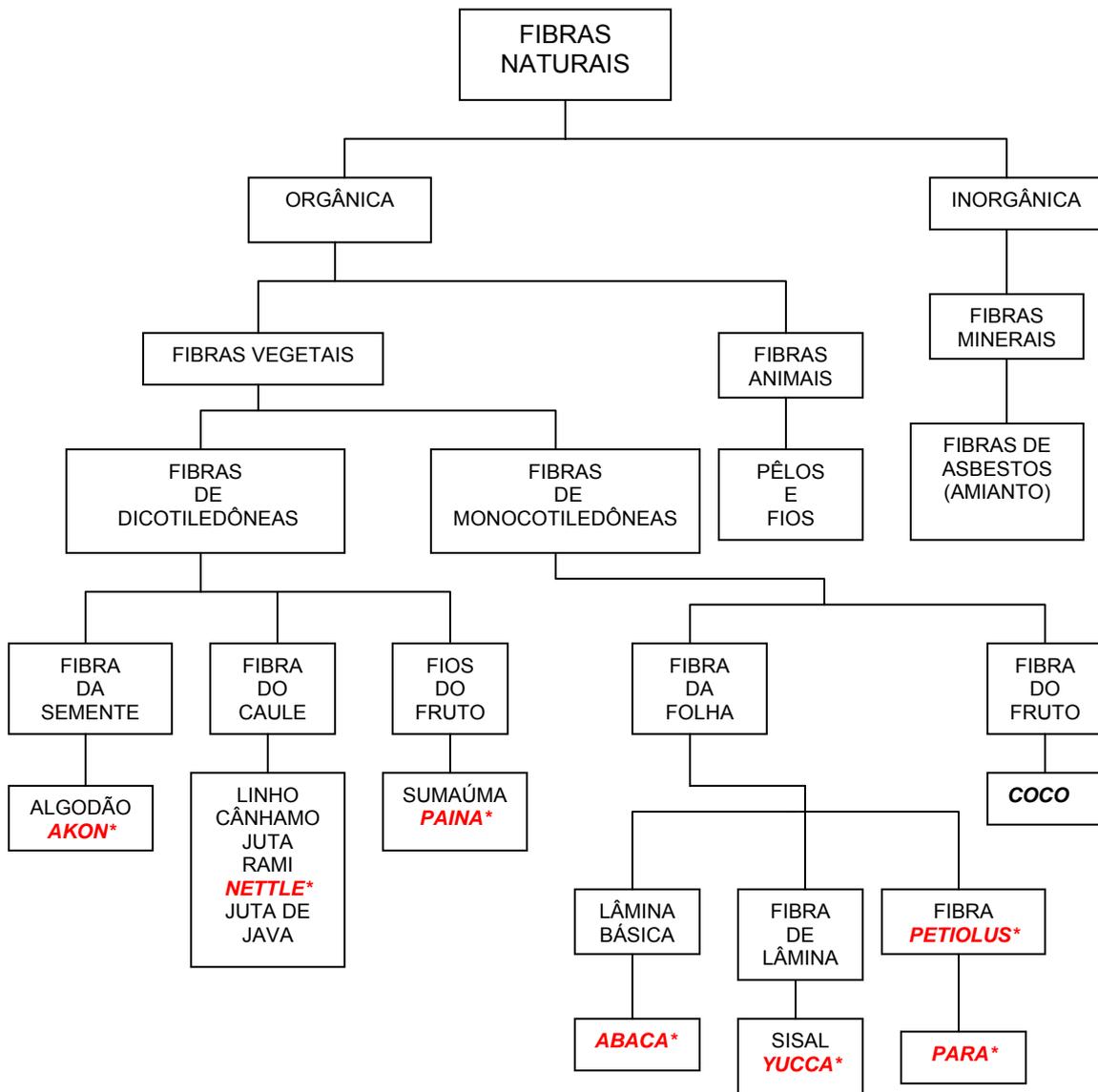


FIGURA 13 – Classificação das fibras naturais.
 Fonte: MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p.112.

Neste estudo, o enfoque foi direcionado para as fibras vegetais, já que a juta constitui o reforço do compósito.

As fibras vegetais contêm, usualmente, quantidade significativa de hidrogênio e outros elementos como o oxigênio e o nitrogênio.

* Não encontrada a versão em português.

Os principais componentes químicos das fibras vegetais são substâncias polares como a celulose, a hemicelulose (ou polioses) e a lignina, com outros percentuais menores de outros componentes como a pectina, cera e substâncias solúveis em água (SILVA, 2003, p. 23). Na TAB. 1 estão apresentadas as composições químicas prováveis de algumas fibras vegetais. A celulose é o elemento de resistência da fibra, a lignina é o material aglutinante. A celulose e a lignina são macromoléculas naturais de estrutura química bastante diferente. A celulose é de natureza polissacarídica e de morfologia fibrilar. Sua grande resistência é devido a fortes interações do tipo ponte de hidrogênio, entre as cadeias moleculares. A lignina é um material de natureza fenólica, muito reticulado. O teor desses constituintes nas fibras vegetais é variável e através dele é possível distinguir uma das outras. A celulose se encontra embebida em outros polissacarídeos, designados genericamente por hemicelulose, além de lignina, breu, proteínas, traços de substâncias minerais e outros componentes (BIASOTTO MANO, 2003, p. 48 a 51). Na FIG. 14 é apresentada a constituição estrutural de uma fibra vegetal.

TABELA 1

Composição química provável de algumas fibras vegetais (% em peso)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	SISAL	COCO	ALGODÃO	JUTA	LINHO	RAMI	JUTA DE JAVA
Celulose	67-78	36-43	82,7	61-71,5	64,1	68,6	31-39
Hemicelulose	10-14,2	0,15-0,25	5,7	13,6-20,4	16,7	13,1	21,5
Lignina	8-11	41-45	-	12-13	2,0	0,6	15-19
Pectina	10	3-4	5,7	0,2	0,2	1,9	-
Solúveis em água	16,2	-	1,0	1,1	3,9	5,5	-
Ceras	2	-	0,6	0,5	0,5	0,3	-
Ângulo espiral	20	41-45	-	8,0	10,0	7,5	-
Teor de umidade	11,0	-	10,0	12,6	10,0	8,0	-

Fonte: Adaptação de BLEDZKI, GASSAN e BISANDA in SILVA, 2003, p. 24.

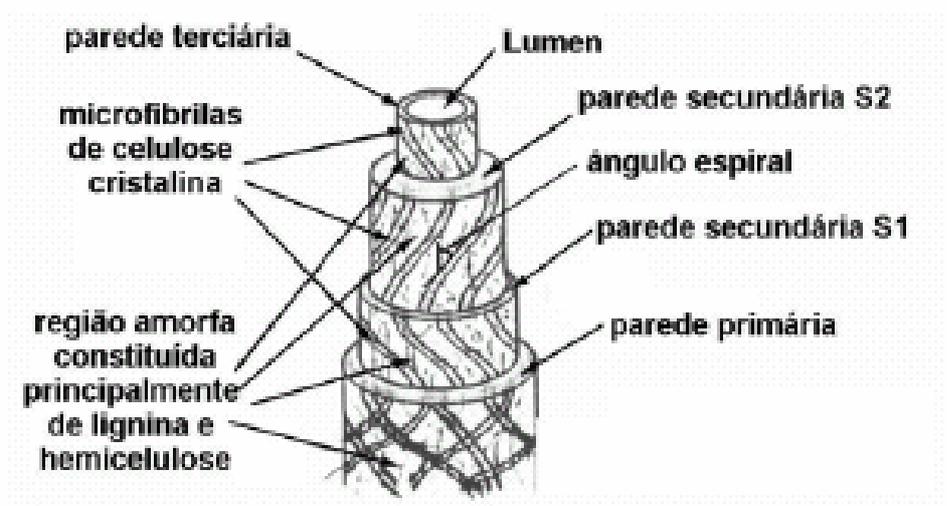


FIGURA 14 – Constituição estrutural de uma fibra vegetal.
 Fonte: RONG et al. in SILVA, 2003, p. 25.

O uso de fibras naturais em compósitos poliméricos está crescendo rapidamente. Uma das maiores áreas de aplicação pode ser encontrada na indústria automotiva, como painéis, revestimentos de portas, cintos, partes acolchoadas, entre outras partes (MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 111).

As propriedades físicas das fibras de maior importância para sua aplicação em compósitos com matriz polimérica caem em duas categorias – àquelas inerentes ao seu filamento propriamente (intrínseca) e àquelas derivadas da aplicação de seus filamentos em fios, mantas ou tecidos (extrínseca). Das propriedades físicas do filamento são importantes a densidade, o diâmetro e a resistividade elétrica; dos fios, mantas e tecidos, essas propriedades incluem produção, área da seção transversal, torção dos fios, fabricação do tecido e gramatura. A densidade e as propriedades derivadas são usadas nos cálculos requeridos para a construção e análise dos produtos compósitos. A densidade e produção são úteis para medidas de garantia de qualidade. O diâmetro do filamento

e resistividade elétrica são importantes aspectos não-estruturais para aplicações em espaçonave e aeronaves (COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, cap. 3, p. 6).

As vantagens potenciais do uso de fibras naturais são baseadas em considerações ambientais e fatores de saúde e segurança (PLACKETT *et al.*, 2003, p. 1288).

As motivações para a utilização de fibras naturais como componentes de reforços em materiais compósitos são:

- Considerações ecológicas: recurso renovável e biodegradável (MOHANTY; KHAN; HINRICHSEN, 200, p. 1115); resistência ao desmatamento (RANA; MANDAL; BANDYOPADHYAY, 2002, p. 801);
- Considerações econômicas: baixo custo, baixa densidade (um espaço vazio, denominado lúmen, é determinante para que a densidade das fibras seja 40% menor que a densidade das fibras de vidro, contribuindo para estruturas leves); a energia necessária para a produção de um tecido não trançado (cultivo, colheita e dissociação das fibras) é aproximadamente de 30-40% menor que a da produção de uma manta de fibra de vidro (MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 113 e 114); possibilidades de novos materiais para fazer frente ao crescimento da população mundial (RANA; MANDAL; BANDYOPADHYAY, 2002, p. 801);
- Considerações de saúde: redução de irritações dermatológicas e respiratórias (RANA; MANDAL; BANDYOPADHYAY, 2002, p. 801);
- Considerações mecânicas: além de baixa densidade, propriedades de resistência específica aceitável e boas propriedades térmicas (RANA; MANDAL; BANDYOPADHYAY, 2002, p. 801);

Existem, também, problemas e limitações nas aplicações das fibras naturais, tais como: alta absorção da mistura (matriz); suas propriedades são fortemente reduzidas sob a influência de altas temperaturas (acima de 200°C) e os processos pelos quais as fibras naturais passam para ser transformada em parte estrutural (cultivo, colheita, dissociação, fabricação dos fios, moldagem), que influenciam nas propriedades das fibras e, conseqüentemente, na qualidade do compósito (MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 114) e (PLACKETT *et al.*, 2003, p. 1288).

Na TAB. 2 são apresentadas propriedades de algumas fibras naturais em comparação com a fibra sintética de vidro E. Nesta tabela pode-se observar que os valores característicos de propriedades específicas de fibras vegetais podem alcançar níveis bastante aproximados da fibra de vidro-E, amplamente utilizada.

Na FIG. 15 é feita uma comparação entre a resistência à tração e a rigidez específicas de diferentes fibras. Nesta figura é observado que a fibra de juta não apresenta esses valores muito inferiores aos da fibra de vidro-E e os apresentam um pouco maiores do que da fibra de sisal, muito utilizada em compósitos.

As fibras devem ser dispostas paralelas à direção dos esforços solicitantes no compósito para aumentar a resistência do mesmo, pois se forem dispostas perpendicularmente à direção dos esforços solicitantes, elas não estarão cumprindo a função de reforço. Na FIG. 16, é demonstrado que há um aumento no módulo de elasticidade (ou de Young) quando as fibras estão paralelas à direção da tensão aplicada.

TABELA 2

Propriedades de algumas fibras vegetais e da fibra sintética de vidro-E

PROPRIEDADE	UNIDADE	ALGODÃO	LINHO	CÂNHAMO	JUTA	JUTA DE JAVA	RAMI	SISAL	FIBRA DE VIDRO E
Fineza	dtex	1-4	1-7	2-6	2-3	5-6	5-13	-	-
Diâmetro	µm	-	11-33	15-50	200	200	40-80	50-200	5-25
Comprimento	mm	10-60	10-40	15-28	1-5	2-6	60-260	1-5	-
Tensão máxima	cN/tex	25-50	30-62	35-70	30-34	34,5-50	40-70	30-45	-
Resistência à tração	MPa	330-585	345-1035	690-1000	393-773	930	400-1050	511-635	1800
Módulo de Young	GPa	4,5-12,6	27,6-45,0	50,0	26,5	53,0	61,5	9,4-15,8	69,0-73,0
Massa específica	g/cm ³	1,5-1,54	1,43-1,52	1,47-1,50	1,44-1,50	1,5	1,5-1,6	1,16-1,5	2,5
Deformação máxima	%	7,0-8,0	2,7-3,2	1,0-1,6	1,5-1,8	1,6	3,6-3,8	2,0-2,5	2,5-3,0
Resistência à tração específica	Km	39,2	73,8	69,3	52,5	63,2	71,4	43,2	73,4
Resistência à flexão específica	Km	0,85	3,21	3,47	1,80	3,60	4,18	1,07	2,98

Fonte: MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 118.

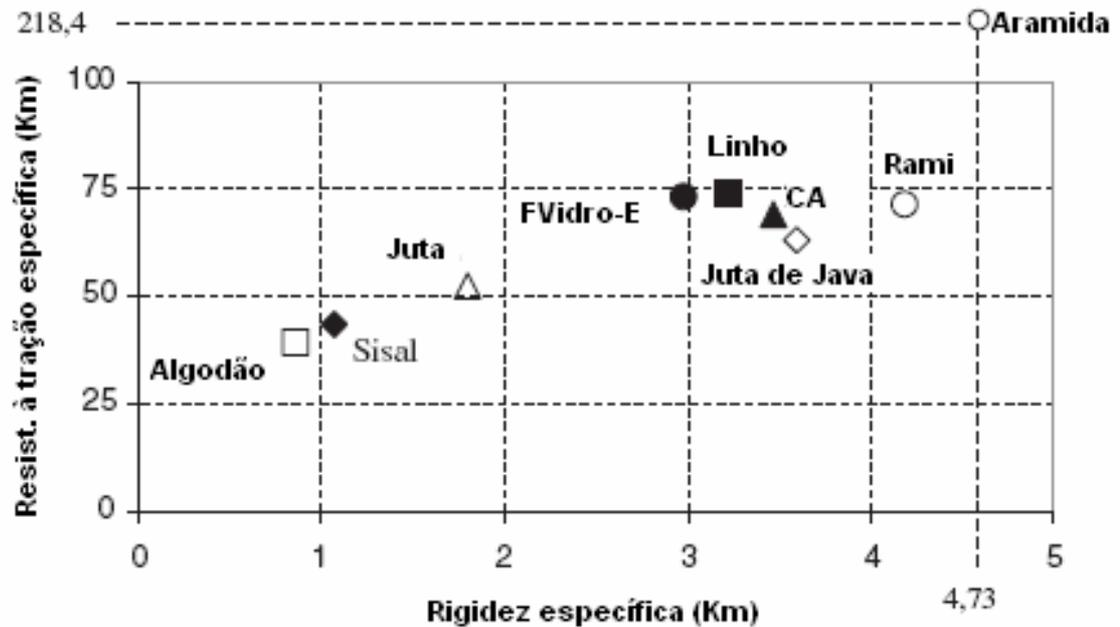


FIGURA 15 – Rigidez específica e resistência à tração específica de diferentes fibras vegetais comparadas às fibras de vidro-E e aramida. (CA – Cânhamo).

Fonte: MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 119.

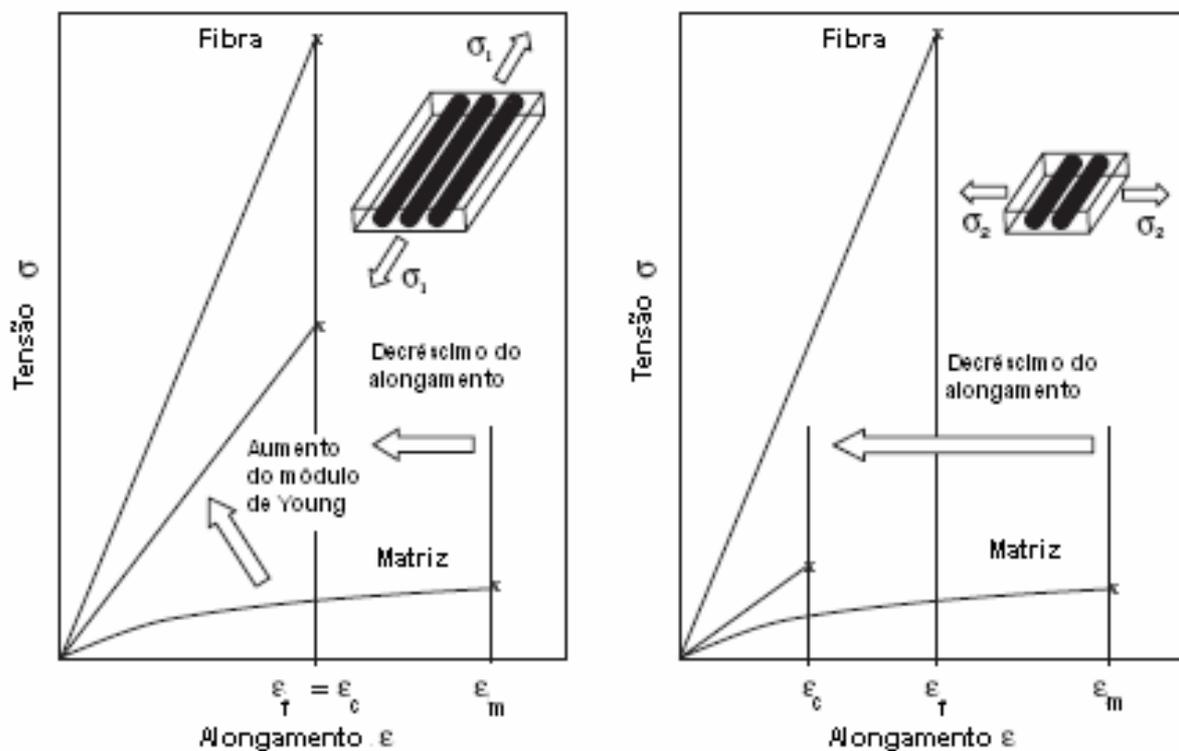


FIGURA 16 – Tensão x alongamento em compósitos reforçados por fibras.

Fonte: MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 119.

A morfologia das fibras também é importante na escolha de uma fibra para uso em compósito. Quanto mais fina for a espessura das fibras e houver maior uniformidade no diâmetro das mesmas, melhor será sua molhabilidade, contribuindo assim, para melhorar a aderência fibra/matriz e, conseqüentemente, melhorar as propriedades mecânicas do compósito. Outro fator a considerar, relativo às fibras, é a quantidade de fibra presente num compósito.

2.2.1 Juta: a fibra e o tecido

A juta é uma planta da família das Tiláceas e a fibra é obtida, principalmente, das espécies *Corchorus*, que são plantas anuais, herbáceas, cultivadas em larga escala na Índia, Bangladesh (antigo Paquistão Oriental), China, Tailândia, Nepal e Indonésia (PLACKETT et al., 2003, p. 1288). Essas plantas exigem um solo fértil e bem drenado, assim como um clima quente e úmido. Excesso de chuvas, após a semeadura, e uma estação muito seca são desastrosas ao seu crescimento.

Em novembro de 1931 chegaram para a Amazônia quatro tipos de sementes trazidas da Índia, sendo elas: *Chorchorus Capsularis*, *Chorchorus Olitorius*, *Hibiscus Cannabinus* e *Crotalaria Juncea*.

A juta foi escolhida por ser, na época, um produto de primeira importância nas relações comerciais em todo o mundo. A fibra era utilizada na fabricação de cordame e fios em bruto, empregados na tecelagem de sacos de sarrapilheira.

A espécie que se adaptou nas áreas de várzeas na extensão do Rio Amazonas, mais especificamente nos municípios localizados às margens do rio nos estados do Amazonas e Pará, foi a *Chorchorus Capsularis* (FIG. 17). Esta árvore

alcança uma altura de 3 a 4 metros e o seu talo tem uma espessura de aproximadamente 20mm. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno e a extração é feita pelo processo de maceração. As árvores cortadas rente ao solo por meio de foices, são limpas das folhas, postas em feixes dentro da água corrente ou parada (BARROS, 1992, p. 72).



FIGURA 17 – Árvore da espécie *Chorchorus Capsularis*.
Fonte: Site www.castanhal.com.br

A juta de melhor qualidade distingue-se pela robustez das fibras e pela cor branca e brilhante do talo; a de qualidade inferior distingue-se pela cor dos talos, que são mais escuros, mais acinzentados, pelo menor comprimento das fibras e apresenta menor resistência (FIG. 18).



FIGURA 18 – Juta de melhor qualidade: cor branca e brilhante do talo.
Fonte: Site www.castanhal.com.br

A composição química da juta está apresentada na TAB. 3.

TABELA 3

Composição química da juta

ELEMENTOS	%
Cinza	0,70
Água	9,72
Gorduras cerosas	0,36
Extrato aquoso	1,06
Celulose	64,10
Substâncias incrustantes	24,06

Fonte: Site www.castanhal.com.br

Tem-se, na TAB. 4, na proporção centesimal das substâncias orgânicas da juta, os seguintes elementos:

TABELA 4

Substâncias orgânicas presentes na juta

ELEMENTOS	%
Carbono	46,30
Oxigênio	47,60
Hidrogênio	6,10

Fonte: Site www.castanhal.com.br

Como pode ser observado pela análise da juta, o seu principal componente estrutural, como uma fibra vegetal, é a celulose, porém, os componentes não-celulósicos, como a lignina e a hemicelulose, também influenciam nas propriedades das fibras. A hemicelulose da juta consiste principalmente de *xylan*, *polyuronide* e *hexosan* (McMILLAN; SEN GUPTA; MAJUMDAR, 1954 apud GASSAN; BLEDZKI, 1999, P. 1303). A juta tem boa afinidade para corantes diretos e para corantes básicos. É muito higroscópica, regulando a umidade em 12%.

Na TAB. 5 são apresentadas algumas propriedades físicas da fibra de juta.

Segundo Meirelles (2004, p. 17), as fibras são unidas e transformadas em filamentos contínuos, que, por sua vez, ao serem unidos, constituem o fio, que pode ter seus filamentos torcidos. Fio torcido é originado de um processo de fiação que consiste em proporcionar a um fio têxtil um determinado número de voltas em torno de seu eixo, por unidade de comprimento, com a finalidade de obter uma maior resistência à ruptura (FIG. 19). As Mechas são aglomerados de fibras contínuas.

Filamentos, fios, fios torcidos e mechas podem ser aglomerados no plano formando mantas ou podem ser tecidos. Os tecidos se apresentam, freqüentemente, tramados em duas ou mais direções, podendo também ser colados ou tricotados (FIG. 20).

TABELA 5

Propriedades físicas da fibra de juta

PROPRIEDADES	JUTA
Massa específica (g/cm ³)	1,44-1,50 (1,3*)
Fineza (dtex)	2-3
Diâmetro (µm)	200
Comprimento (mm)	1-5
Tensão máxima (cN/tex)	30-34
Resistência à tração (MPa)	393-773
Módulo de Young (GPa)	26,5
Deformação máxima (%)	1,5-1,8
Resistência à tração específica (Km)	52,5
Rigidez específica (Km)	1,80
Gramatura (g/m ²)	300**

Fontes: MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 118.

*GASSAN; BLEDZKI, 1999, p. 1304.

**PLACKETT et al., 2003, p. 1288.



FIGURA 19 – Filamentos contínuos, unidos e torcidos para constituir o fio torcido.
Fonte: MEIRELLES, 2004, p. 34.

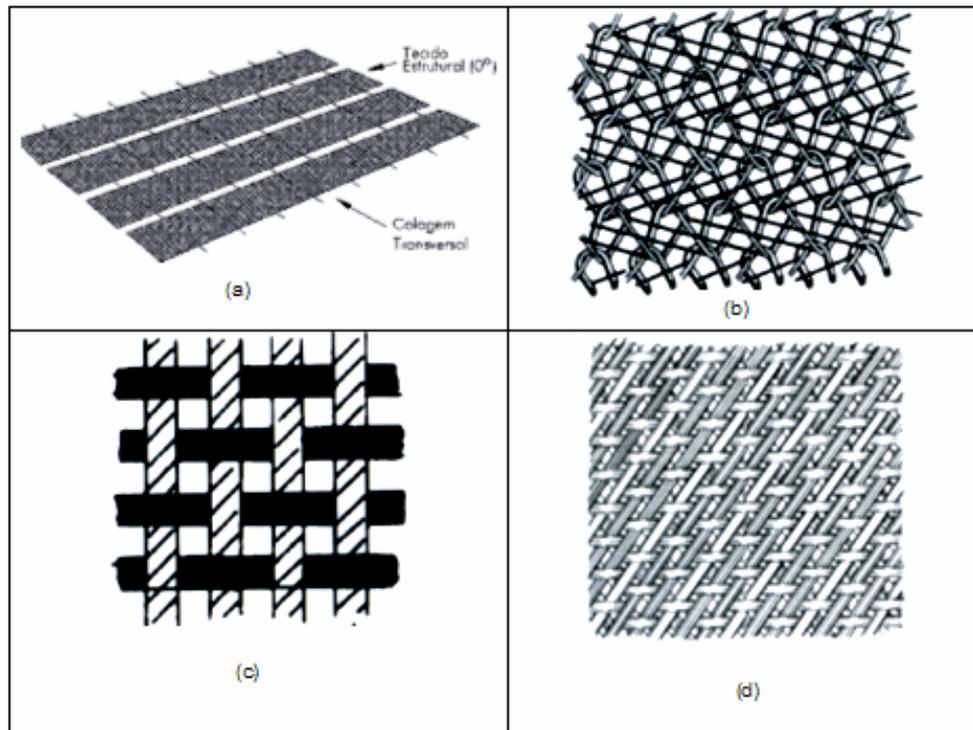


FIGURA 20 - Desenho esquemático de alguns tipos de tecidos: (a) colados; (b) tricotados; (c) tramados em duas direções ortogonalmente e (d) tramados em mais de duas direções.

Fonte: MEIRELLES, 2004, p. 36.

O tecido de juta desta pesquisa é designado por tela natural segundo a Companhia Têxtil de Castanhal que a produz, e serve para diversas aplicações, dependendo de suas características, como decoração, artesanato, curtumes e proteção de piso (FIG. 21 a e b). Essa Companhia fabrica as telas que estão na TAB. 6.



(a)



(b)

FIGURA 21 – Produção e classificação da tela de juta: (a) tear industrial para fabricação da tela de juta e (b) rolo identificado pelo tipo de tela de juta.

Fonte: Site www.castanhal.com.br

TABELA 6

Telas naturais fabricadas pela Companhia Têxtil de Castanhal

TELA	LARGURA (m)	GRAMATURA (g/cm ²)
CSS/100	1,00	150
CSS/120	1,20	180
10/40 ou (F9)	1,00	320
12/40	1,00	370
CBB1	1,00	275
T4/100	1,00	250
H-100	1,00	434
CT-100	1,00	270

Fonte: Site www.castanhal.com.br

2.3 Resinas poliméricas

A Associação Brasileira de Materiais Plásticos Compostos (ASPLAR), define resina da seguinte forma:

Resina é uma substância amorfa ou uma mistura insolúvel em água, mas solúvel em alguns solventes orgânicos, e de alto peso molecular, que à temperatura ambiente, é sólida ou um líquido muito viscoso, que amolece gradualmente por aquecimento (ASPLAR, 2005, p. 3).

Segundo Lucas *et al.* (2001, p. 13) resinas poliméricas (*poli* – muitos e *mero* – partes) são resinas constituídas de moléculas grandes (macromoléculas) formadas por repetições de estruturas pequenas.

As resinas poliméricas podem ser termoplásticas ou termorrígidas. As resinas termoplásticas consistem de cadeias moleculares lineares ou ramificadas que, ao serem aquecidas sob pressão, têm as suas consistências alteradas de sólidas às líquidas viscosas. Neste processo não ocorrem reações químicas ou decomposição e os produtos obtidos podem ser reaquecidos repetidamente. As resinas termorrígidas passam por uma reação química irreversível durante a polimerização, conhecida como processo de cura. Durante o processo de cura são formadas ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes, desenvolvendo uma estrutura tridimensional. Essas ligações cruzadas, à medida que se formam, causam diminuição da mobilidade das cadeias moleculares, provocando solidificação. O processo de cura pode ser acelerado pela aplicação de calor e pressão em condições controladas, por meio de autoclaves, ou ainda, pela adição de um catalizador adequado conhecido como agente de cura (*hardener*), na proporção certa para cada tipo de resina (SHACKELFORD apud SILVESTRE FILHO, 2001, p. 18). As resinas termorrígidas têm menores custos quando

comparadas às resinas termoplásticas e apresentam as seguintes vantagens para aplicações estruturais em compósitos: alta estabilidade térmica; alta rigidez; alta estabilidade dimensional; resistência à fluência e à deformação sob carregamento; baixo peso específico e altas propriedades de isolamento térmico e elétrico (TITA apud SILVESTRE FILHO, 2001, p. 19).

Plackett et al. (2003, p. 1288) afirmam que alguns pesquisadores já estão identificando, as possibilidades de novos produtos compósitos completamente biodegradáveis ao combinar polímeros biodegradáveis com reforços em fibra natural. A aplicação de fibras naturais, como reforços em biopolímeros, pode produzir compósitos com propriedades mecânicas apropriadas para materiais construtivos leves, que podem ser utilizados em produtos para construção, para aplicações médicas e para o setor automotivo. As pesquisas com polímeros biodegradáveis iniciaram na década de 70 e, com as pressões sobre o impacto ambiental relativo ao destino final dos plásticos, se intensificaram na década de 90.

2.3.1 Resina poliuretana a base de óleo de mamona

Uretano (ou uretana) é o produto da reação química entre um grupo isocianato e um grupo hidroxila (VILAR, 2001, p. 1.21). Na FIG. 22 está a reação química para se obter uma uretana.

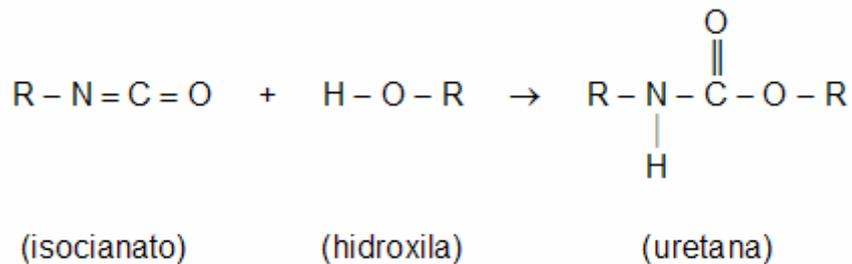


FIGURA 22 – Reação química para se obter uma uretana.
 Fonte: SILVA, 2003, p. 21.

Os poliuretanos (PU's) foram desenvolvidos por Otto Bayer, em 1937. São produzidos pela reação de poliadição de um isocianato (di ou polifuncional) com um poliol, podendo ser acrescido de outros reagentes como agentes de cura, catalisadores, agentes de expansão, surfactantes, cargas, etc. A natureza química e a funcionalidade dos reagentes são escolhidas de acordo com as propriedades finais desejadas (VILAR, 2001, p. 1.1). Na FIG. 23 está a reação química para se obter a polimerização da poliuretana.

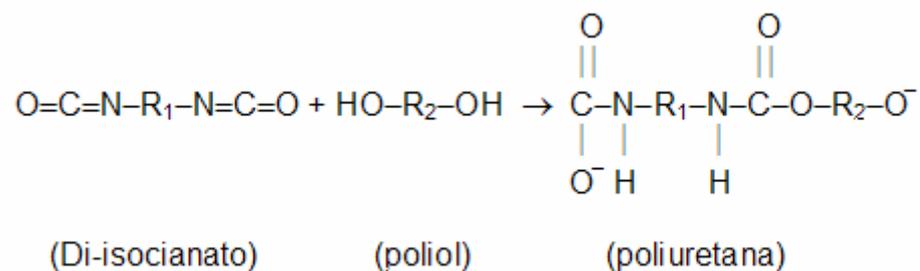


FIGURA 23 – Reação química para se obter a polimerização da poliuretana.
 Fonte: SILVESTRE FILHO, 2001, Apêndice I.

Segundo Silva (2003, p. 22), os compostos de grupos isocianatos são altamente reativos, por isso, é feita uma pré-polimerização que consiste da reação de um poli-isocianato com um poliol, nas proporções previamente determinadas, para a obtenção do teor de isocianato livre desejado. A reação de polimerização ocorre pela mistura a frio do pré-polímero com o poliol final, que conduz a

policondensação uretana, gerando o PU de alto peso molecular. Vilar (2001, p. 1.10) afirma que além dessa reação principal, podem ocorrer outras reações paralelas, onde a mais comum é a reação do isocianato com a água, resultando na liberação de uréias e gás carbônico (CO₂), responsável pela expansão do polímero.

Biassotto Mano (2003, p. 80) diz que conforme a funcionalidade dos monômeros e o emprego ou não de agentes de cura, o polímero PU poderá ser termoplástico ou termorrígido e que, como termoplásticos, podem ser empregados como conexões, anéis de vedação, juntas para trilho, correias transportadoras, solados e saltos de calçados, rodas de *skates*, vernizes para carro, etc.

Os poliuretanos são, também, aplicados nos segmentos de colchões, estofados, na indústria automobilística como assentos, painéis, descanso para braço, pára-choques, em isolamentos térmicos de geladeiras, *freezers* e caminhões frigoríficos, como painéis divisórios na construção civil, etc (VILAR, 2001, p. 1.3).

O óleo de mamona é obtido da semente da planta *Ricinus Communis*, encontrada em regiões de climas tropicais e subtropicais, bastante abundante no Brasil (FIG. 24) É um óleo viscoso obtido da compressão das sementes ou por extração com solvente. O óleo de mamona é um triglicerídeo derivado do ácido ricinoleico, apresentando em sua molécula 90% de ácido ricinoleico e 10% de ácido graxos não hidroxilados (VILAR, 2001, p. 1.36 e 1.37). Na TAB. 7 está a composição química dos ácidos que formam o óleo de mamona e na TAB. 8 são apresentadas as características químicas do óleo de mamona.



FIGURA 24 – Óleo e a planta da mamona.
 Fonte: Site www.proquinor.com.br

TABELA 7

Composição típica dos ácidos que formam o óleo de mamona

ÁCIDOS PRESENTES NO ÓLEO DE MAMONA	PORCENTAGEM
Ricinoleico	89,55%
Linoleico	4,2%
Oleico	3,0%
Esteárico	1,0%
Palmítico	1,0%
Dihidroxiesteárico	0,7%
Eicosanóico	0,3%
linolenico	0,3%

Fonte: Site www.proquinor.com.br.

TABELA 8

Características químicas do óleo de mamona

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	VALORES
Hidroxila (mg K OH/g amostra)	180 ± 10
Acidez (mg KOH/g amostra)	Máx. 4
Saponificação (mg KOH/g amostra)	160 - 190
Iodo (cg I / g amostra)	60 - 85
Viscosidade (cps a 25°C)	500 - 800
Umidade (Karl Fischer)	0,1%
Massa específica (g / cm ³ a 20°C)	0,9 - 1,0 g/cm ³
Funcionalidade (range 2,5 - 3,5)	3
Peso Molecular médio	920,21

Fonte: Site www.proquinor.com.br.

2.3.2 Resina poliéster

A Associação Brasileira de Materiais Plásticos Compostos (ASPLAR)

define poliéster da seguinte forma:

A palavra poliéster (poli = muitos e éster = obtido da reação: ácido + álcool = éster + água) significa muitos grupos de ésteres. Constituem uma família de alto peso molecular, resultante da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, sendo classificada em resinas poliéster saturadas ou insaturadas. Este tipo de resina sofre cura em temperatura ambiente ou mais rapidamente na presença de calor (70 a 150°C) (ASPLAR, 2005, p. 7).

Existem dois tipos de resinas poliéster: a saturada e a insaturada. A resina poliéster saturada é termoplástica obtida pela reação entre um bi-álcool e um bi-ácido saturado e a resina poliéster insaturada é termorrígida obtida pela reação

entre ácidos ou anidridos saturados e insaturados e um bi-álcool, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. É diluída num monômero vinílico inibido, para facilitar sua utilização. Transforma-se do estado líquido para o sólido após a adição de promotores, formando uma estrutura termorrígida irreversível, a qual ao ser reforçada, se converte em um plástico de engenharia com ótimas propriedades físico-mecânicas e baixo custo de matéria-prima.

As **ortofitálicas** foram as primeiras resinas poliéster que surgiram e continuam sendo bastante utilizadas em muitas aplicações, apesar destas resinas terem estabilidade térmica, resistência química e processabilidade limitadas. Já as **isoftálicas** apresentam melhores resistências térmicas, melhores propriedades mecânicas e resistências químicas, porém, com custo mais elevado. Tem também, as resinas **bisfenólicas** que apresentam alto grau de rigidez e melhores desempenhos térmicos para material composto, que são requeridas quase que exclusivamente para aplicações de altíssimo desempenho. Há outras resinas poliéster encontradas de acordo com o tipo de base a ser utilizada (ASPAR, 2005, p. 7). Na TAB. 9 são apresentadas essas três resinas poliéster mais utilizadas, seus componentes de base e aplicações.

Na TAB. 10 há, também, uma outra classificação quanto às características da resina poliéster para aplicações específicas.

TABELA 9

Tipos de resinas poliéster mais utilizadas, componentes de base e aplicações

TIPOS DE RESINAS	ÁCIDOS OU ANIDRIDOS INSATURADOS	ÁCIDOS OU ANIDRIDOS SATURADOS	GLICÓIS	MONÔMEROS	APLICAÇÕES
Ortoftálicas	Anidrido maleico	Anidrido ftálico	Propilenoglicol Etilenoglicol	Estireno	<ul style="list-style-type: none"> • Semirígidas: barcos, perfis industriais, placas onduladas • Rígidas: vernizes (<i>liner</i>), <i>prepegs</i> (pré-impregnados)
Isoftálicas	Anidrido maleico	Anidrido Isoftálico	Propilenoglicol Dietilenoglicol	Estireno	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gel coats</i> (resina de acabamento) • Tanques de armazenamento • Resistência química • <i>Prepegs Low Profile</i> (pré-impregnados de baixo desempenho)
Bisfenólicas	Ácido fumárico	Anidrido ftálico	Bisfenol A	Estireno	<ul style="list-style-type: none"> • Anti-corrosivos

Fonte: ASPLAR, 2005, p. 8.

TABELA 10

Resinas poliéster, características e aplicações

POLIÉSTER	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES USUAIS
Comum, de uso geral	Peças rígidas	Bandejas, barcos, tanques, caixas, bancos, etc.
Flexível e semi-rígida	Rija, boa resistência ao impacto, alta resistência em flexão, baixo módulo em flexão (rigidez)	Amortecimento de vibrações: cobertura e proteção de máquinas, capacetes de segurança, encapsulamento de peças eletrônicas, resinas de acabamento, massas plásticas, carrocerias de automóveis, barcos, etc.
Resistente às intempéries e estável à luz	Resiste às intempéries e à deterioração por ação dos raios ultra-violeta	Painéis estruturais, clarabóias, vitrificação.
Resistente ao ataque químico	Possui a maior resistência química do grupo poliéster, excelente resistência aos álcalis	Aplicações anticorrosivas tais como: tubos, tanques, dutos, exaustores, etc.
Auto extingüível	Não espalha a chama, rígida	Painéis para construção (interior), componentes elétricos, tanques de combustível.
Alto ponto de distorção térmica	Trabalha até 20°C, rígida	Peças para aviões.

Fonte: www.aerojet.com.br.

Na TAB. 11, estão apresentadas algumas propriedades típicas da resina termofixa de poliéster segundo Mendonça (2005, p. 21), Pereira (2003, p.8) e Callister (2003, p.739).

Mendonça (2005, p. 24 e 25) esclarece que o processo de cura da resina de poliéster é iniciado pela adição de uma pequena porção de catalisador, como um peróxido orgânico ou um composto alifático. A cura pode se dar tanto à temperatura ambiente quanto sob temperatura elevada e com ou sem aplicação de pressão. A adesão na poliéster é empobrecida na presença de umidade, porém, a poliéster pode ser usada com mais facilidade, podendo ser aplicada por pincéis, brochas, escoada ou jateada sobre o reforço, não sendo necessário o uso de alta pressão no processo de moldagem ou laminação. Durante a cura, a poliéster tende a se contrair,

o que pode afetar o acabamento superficial ou a precisão dimensional. As resinas de poliéster se contraem até cerca de 6% em volume ou 2% nas dimensões lineares.

TABELA 11

Propriedades típicas da resina termofixa de poliéster

PROPRIEDADE	POLIÉSTER
Massa específica (ρ)	1.100 – 1.400 Kg/m ³ 1.200 Kg/m ³ * 1,04 – 1,46 g/cm ³ **
Módulo de elasticidade à tração (E)	2.100 – 4.400 MPa 4.000 MPa*
Ruptura à tração (σ_t)	34 – 100 MPa 80 MPa*
Ruptura à compressão (σ_c)	90 – 250 MPa
Elongamento (ϵ)	2,0% 2,5%*
Temperatura de transição (T_g)	140 – 200 °C
Temperatura de trabalho contínuo	250 °C 60-200°C*
Coefficiente de dilatação térmica (α)	55 – 100 x 10 ⁻⁶ /°C 8 x 10 ⁻⁵ /°C *
Absorção de água em 24hs	0,15 – 0,6 % em volume
Coefficiente de Poisson (ν)	0,4 *
Módulo de cisalhamento (G)	1.400 MPa *

Fontes: MENDONÇA, 2005, p. 21.

* PEREIRA, 2003, p. 8.

** CALLISTER, 2003, p. 739.

2.4 Compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais

Segundo Gassan e Bledzki (1999, p. 1303 e 1304), compósitos poliméricos com fibras vegetais combinam boas propriedades mecânicas com baixa

massa específica (aproximadamente 1,2-1,5g/cm³). Porém, as fibras apresentam um alto grau de absorção da mistura, pobre molhabilidade e, geralmente, ocorrem problemas de adesão com fibras não tratadas e uma matriz polimérica não-polar que contribuem para o descolamento com o tempo. As propriedades mecânicas e outras propriedades físicas das fibras vegetais são influenciadas por suas condições de crescimento, técnicas de processamento, pela sua espessura e comprimento. A quantidade de fibra nos compósitos também influencia nas propriedades dos mesmos. Silva (2003, p. 69) afirma que existe um percentual mínimo de fração volumétrica para efeito de reforçamento da matriz e que este percentual varia para cada tipo de compósito, influenciado pela distribuição, razão de aspecto e comprimento das fibras, e também, pela resistência interfacial, que por sua vez, depende do tipo de fibra e matriz empregados e da condição de tratamento da fibra.

Um dos fatores mais importante para se obter um bom reforço com fibra natural no compósito é a resistência de adesão entre a matriz polimérica e a fibra. A extensão da adesão depende da estrutura e da polaridade desses materiais. Devido à presença de hidroxila e outros grupos polares em vários constituintes das fibras vegetais, a absorção da mistura é elevada, o que leva à pobre molhabilidade pela matriz e à fraca adesão interfacial entre a fibra e a matriz hidrofóbica. O que os pesquisadores geralmente fazem para melhorar a adesão fibra/matriz é o tratamento alcalino com NaOH e a utilização de compatibilizadores como o anidrido maleico, por exemplo. Esses tratamentos, em geral, são utilizados para extração de componentes não-celulósicos como a lignina e a hemicelulose. Pois quando esses componentes não-celulósicos são removidos, a região interfibrilar se torna menos densa e menos rígida, fazendo com que as fibrilas se reorganizem na direção da deformação de tração, resultando em melhor distribuição de cargas e mais alta resistência à tração

da fibra. Além disso, há mudança na cristalinidade das fibras como resultado de tratamento alcalino. O aumento na cristalinidade dessas fibras ocorre porque há a remoção dos materiais cimentantes, o que melhora o empacotamento das cadeias de celulose, decrescimento no ângulo espiral e crescimento da orientação molecular das fibras. É esperado que o módulo de elasticidade das fibras aumentem com o aumento na orientação molecular.

2.5 Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos

Devido à sua complexa microestrutura, os materiais compósitos são de difícil caracterização. Pela falta de métodos específicos para caracterização de materiais compósitos, é aplicada a teoria desenvolvida para caracterização de materiais homogêneos. Dentre as propriedades mecânicas de maior interesse no estudo de materiais compósitos foram consideradas nesta pesquisa as resistências à tração, à compressão, à flexão e ao impacto.

2.5.1 Resistência à tração

A resistência à tração, ou resistência à tração na ruptura, ou tenacidade de um material, é avaliada pela carga aplicada (F) ao material por unidade de área (A), no momento de ruptura. Os valores de resistência à tração são expressos em MPa, Pa, N/m² ou kgf/mm². As normas ASTM D412, D638 e D882 são alguns dos métodos de ensaio de resistência à tração. Os polímeros têm valores de resistência à tração muito baixos (abaixo de 10kgf/mm²). Bem maiores que esses valores são as resistências das fibras. Enquanto que os metais apresentam resistência muito

elevada (até 100kgf/mm²) (BIASOTTO MANO, 2003, p. 9). O poliéster termorrígido apresenta uma resistência à tração de 41.4 - 89.7MPa (CALLISTER, 2003, p. 748).

No ensaio de tração são determinadas as propriedades de resistência à tração uniaxial, módulo de elasticidade, alongamento e coeficiente de Poisson. O módulo de elasticidade, rigidez ou módulo de Young é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico, onde a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. Os módulos dos polímeros em geral não excedem 500kgf/mm², enquanto que, para as fibras, podem atingir 1500kgf/mm²; para os materiais cerâmicos, vítreos e metálicos, esses valores se encontram entre 10³ -10⁵kgf/mm² (BIASOTTO MANO, 2003, p. 11). O módulo de elasticidade do poliéster termorrígido está entre 2.06-4.41GPa (CALLISTER, 2003, p. 742). O alongamento representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração, no momento de ruptura. Grandes alongamentos na ruptura (até de 900%) são uma característica dos polímeros, em geral, e das borrachas, em particular, especialmente a borracha natural. O alongamento é muito pequeno nos metais e cerâmicas, da ordem de algumas unidades. O alongamento percentual do poliéster termorrígido é superior a 2.6 (CALLISTER, 2003, p. 748). O coeficiente de Poisson é definido como a razão negativa entre a deformação transversal e a correspondente deformação longitudinal de um corpo de prova sob tensão uniaxial, abaixo do limite de proporcionalidade do material. A norma utilizada para a realização deste ensaio nesta pesquisa foi a **D 638 – 90 – STANDARD TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTIES OF PLASTIC** (Método de teste padrão para determinação das propriedades de tração de plásticos) da *American Society for Test and Materials (ASTM)*.

2.5.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão é expressa pela tensão máxima que um material rígido suporta sob compressão longitudinal, antes que o material entre em colapso. Sua medição é expressa nas mesmas unidades da resistência à tração. Há uma superioridade da resistência à compressão das resinas termorrígidas sobre as termoplásticas, porém ainda muito inferiores as dos materiais de engenharia convencionais (BIASOTTO MANO, 2003, p. 13). A norma utilizada para a realização deste ensaio nesta pesquisa foi a ***D 695 - 90 – STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE PROPERTIES OF RIGID PLASTICS*** (Método de teste padrão para determinação das propriedades de compressão de plásticos rígidos) da *ASTM*.

2.5.3 Resistência à flexão

A resistência à flexão representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de uma barra quando sujeita a dobramento. Aplica-se a materiais rígidos, isto é, aqueles que não vergam excessivamente sob a ação da carga. É expressa em MPa, Pa, N/m² ou kgf/mm². Quanto à resistência à flexão, há uma equivalência dos materiais plásticos às cerâmicas; não é significativa para as borrachas (BIASOTTO MANO, 2003, p. 16). A norma utilizada para a realização deste ensaio nesta pesquisa foi a ***D 790M - 86 – STANDARD TEST METHODS FOR FLEXURAL PROPERTIES OF UNREINFORCED AND REINFORCED PLASTICS AND ELECTRICAL INSULATING MATERIALS [METRIC]*** (Métodos de teste padrões para determinação das propriedades de flexão de plásticos reforçados e não-reforçados e materiais de isolamento elétrico) da *ASTM*.

2.5.4 Resistência ao impacto

A resistência ao impacto representa a tenacidade ou a resistência de um material rígido à deformação a uma velocidade muito alta. É expressa em cm.kgf/cm^2 ou kJ/m^2 e pode ser avaliada pelos métodos ASTM D 256, D 746 e D2463. O polietileno de baixa densidade (LDPE) apresenta alta resistência ao impacto, deforma, porém não quebra; abaixo dele, o polietileno de alta densidade (HDPE), mais cristalino, também é bastante resistente. O plástico de engenharia, policarbonato, cuja resistência ao impacto é maior do que a das cerâmicas e do alumínio é até empregado como proteção às balas de metralhadora (BIASOTTO MANO, 2003, p. 16). Foram realizados dois tipos de ensaios de impacto: Charpy e queda de dardo e as normas utilizadas foram: a ***D 5942 - 96 – STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING CHARPY IMPACT STRENGTH OF PLASTICS*** (Método de teste padrão para determinação da resistência ao impacto Charpy de plásticos) da *ASTM* e a ***D 5628 - 96 – STANDARD TEST METHOD FOR IMPACT RESISTANCE OF FLAT, RIGID PLASTIC SPECIMENS BY MEANS OF A FALLING DART (TUP OR FALLING MASS)*** [Método de teste padrão para resistência ao impacto de corpos de prova em placas de plástico rígido por queda de dardo (martetele ou massa em queda)], também da *ASTM*.

Segundo Mueller e Krobjilowski (2003, p. 121), a resistência ao impacto para materiais compósitos reforçados por fibras naturais é freqüentemente inferior aos reforçados por fibras de vidro, porém, dependendo do processo de manufatura, a resistência ao impacto pode alcançar valores comparáveis aos compósitos com fibra de vidro. Para altas propriedades de impacto deve ser notado que um leve enfraquecimento da adesão entre fibra e polímero resulta em uma alta energia de

impacto para a degradação do compósito, contribuindo para o arrancamento das fibras (*fiber-pull-out*). A boa adesão, pelo contrário, resulta na fratura abrupta da fibra com uma menor degradação de energia.

2.6 Fratura em compósitos

Comparado aos metais, o estudo da mecânica da fratura em compósitos está ainda no princípio e, o que ocorre, é a aplicação de métodos padrões para materiais homogêneos aos materiais compósitos. Na FIG. 25, têm-se os vários mecanismos de falha que podem ocorrer em compósitos reforçados por fibras.

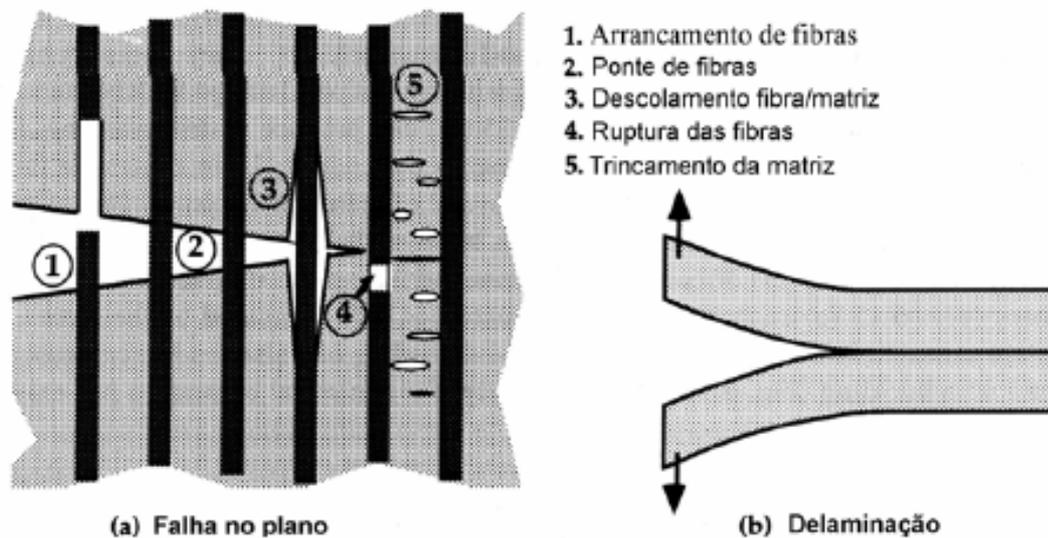


FIGURA 25 – Mecanismos de falha em materiais compósitos.
 Fonte: ANDERSON, 1995 in SILVA, 2003, p. 15.

Os mecanismos de falha que podem ocorrer durante a fratura de um compósito reforçado por fibras são: o arrancamento de fibras (*fiber pull out*) (FIG. 25a-1), a formação de ponte de fibras (*fiber bridging*) (FIG. 25a-2), o descolamento fibra/matriz (FIG. 25a-3), o deslizamento interfacial seguido da ruptura das fibras

(*pull out*) (FIG. 25a-4) e o trincamento da matriz (FIG. 25a-5), quando a falha ocorre no plano, e delaminação (FIG. 25b), quando se trata de um laminado. Esses mecanismos podem atuar simultaneamente durante o processo de fratura de um compósito. Nos compósitos que apresentam as fibras orientadas paralelamente à direção de propagação da trinca, observa-se, principalmente, o descolamento das fibras e quando as fibras estão orientadas perpendicularmente à trinca, ocorre deslizamento e fratura das fibras.

A fratura por delaminação (FIG. 25b) é bastante comum nos compósitos com fibras contínuas e ocorre devido às propriedades mecânicas ortotrópicas desses compósitos. A propagação da trinca, neste tipo de fratura, pode ocorrer entre as camadas do laminado e, neste caso, são denominadas de trincas interlaminares, ou entre as fibras, sendo denominadas de trincas intralaminares. As tensões que conduzem a delaminação podem surgir da própria estrutura geométrica do compósito, de tensões externas aplicadas ou ainda devido à diferença nos módulos de elasticidade da matriz e das fibras.

2.7 Divisórias

As divisórias são constituídas de painéis, ferragens de sustentação (perfis/batentes) e fechaduras e, servem para limitar, separar e individualizar espaços. Elas podem ser compostas de painéis em laminado estrutural, gesso acartonado (*dry wall*), de PVC, cimento-madeira, vidro, etc. Esses painéis podem receber tratamentos que melhorem a resistência superficial à abrasão, ao impacto, ao risco, a ação dos raios ultravioleta, retardantes de chama e também, tratamento estético como cores diversas, através de pinturas e revestimentos. Os painéis

podem apresentar miolos em fibra mineral, lã de vidro, isopor, esponjas, etc. As ferragens de sustentação e fechaduras podem ser em alumínio, aço galvanizado ou aço naval, dentre outros.

As divisórias podem ser empregadas para dividir ambientes sem umidade (escritórios, por exemplo) (FIG. 26), mas também, ambientes muito úmidos, como banheiros e copas. As vantagens de se utilizar divisórias são:

- instalação simples e rápida (praticidade);
- serem removíveis (versatilidade na mudança de espaços);
- permitir fácil acesso à manutenção de instalações elétricas, hidráulicas e ar condicionado;
- fácil limpeza (manutenção);
- resistência à umidade, a abrasão, a riscos, a agentes químicos, a insetos, a fungos e a luz solar;
- proporciona grande variedade de cores e combinações entre painéis e perfis (estética);
- isolamento termo-acústico;
- adaptáveis a qualquer ambiente, dentre outras.

As divisórias podem ser empregadas em diversos ambientes tais como: academias, hospitais, *shoppings*, escolas, hotéis, prédios comerciais, teatros, cinemas, igrejas, auditórios, bibliotecas, museus, casas de festas, casas de máquinas, galerias de exposição, sanitários públicos, etc (FIG. 27).



FIGURA 26 – Divisórias para ambientes sem umidade (escritórios).
Fonte: Site www.eucatex.com.br.



FIGURA 27 – Divisórias empregadas em hospitais.
Fonte: Site www.artesana.com.br

As dimensões das divisórias dependem do fornecedor e do emprego que se quer dar a elas. As divisórias, empregadas como divisórias de ambientes, divisórias sanitárias, tapa vistas (FIG. 28), portas, biombos (FIG. 29) e acessórios em laminado estrutural, geralmente apresentam a espessura entre 10-15mm. Se forem utilizadas como divisórias sanitárias, por exemplo, apresentam altura de

1,65m (elevadas em 0,15m), largura de 1,25m (deficientes: 1,50m) e espessura 15mm e as portas, dessas divisórias sanitárias, apresentam alturas de 1,65m, larguras de 0,60-0,80 (deficientes: 0,90m) e espessuras 10mm (FIG. 30).



FIGURA 28 – Divisórias sanitárias empregadas como tapa vistas.
Fonte: Site www.paineldivisorias.com.br.



FIGURA 29 – Divisórias empregadas como biombos.
Fonte: Site www.artesana.com.br.



FIGURA 30 – Portas e divisórias sanitárias.
Fonte: Site www.darcom.com.br.

As divisórias em gesso acartonado (*dry wall*) apresentam melhores qualidades termo-acústicas, porém, com a utilização de fibra mineral, lã de vidro, espumas, etc no miolo das divisórias, qualquer outro tipo de divisória consegue obter qualidades semelhantes. Na FIG. 31, tem-se um exemplo de divisória em gesso, que é a *Drywall Gypsum*, constituída por uma ou mais chapas *gypsum* em perfis de aço galvanizado permitindo a passagem de instalações elétricas e hidráulicas.



FIGURA 31 – Divisórias *Drywall Gypsum*.
Fonte: Site www.divimaster.com.br.

O mercado nacional oferece divisórias com painéis denominados Formidur BP Plus, que são chapas duras de fibras de eucalipto prensadas, com acabamento em resina melamínica de baixa pressão, o que confere ao produto ótima resistência superficial à abrasão, ao impacto e riscos. Tem, também, os painéis Eucaplac UV, que são chapas duras de eucalipto prensadas com acabamento em pintura à base d'água, com secagem ultravioleta, que alia resistência e beleza. Há divisórias denominadas Fibraroc, à base de vermiculita expandida e fibra de madeira, com face pintada em tinta acrílica, fornecida no padrão texturizada, onde a função da vermiculita é retardar o alastramento superficial de chamas.

Os painéis *Gypsum Eternit*, constituído de madeira maciça, laminada ou sarrafeada e cimento, são utilizados para o acabamento interno de paredes de fachadas, executadas em alvenarias ou em concretos ou no encontro de paredes *gypsum* com o sistema tradicional, evitando dessa forma o aparecimento de fissuras e trincas no encontro de materiais diferentes (FIG. 32).



FIGURA 32 – Painéis Gypsum Eternit.

Fonte: Site www.divisoriasecia.neomarkets.com.br.

Nesta pesquisa está a proposta de um material alternativo aos painéis tradicionalmente empregados, como o de laminado estrutural, de PVC, de gesso acartonado, de vidro, de gesso-madeira e de cimento-madeira, através do emprego do tecido de juta e das resinas termorrígidas de poliuretana à base de óleo de mamona e poliéster. Estudos com tecido de juta e poliéster já estão sendo realizados, inclusive com a proposta da casa ecológica (FIG. 33), na Alemanha. Para uma divisória com este tipo de painel, no miolo, poderá ser utilizada a fibra de coco prensada com borracha natural, estudo este sendo desenvolvido pelo grupo de acústica do curso de Engenharia Mecânica desta instituição de ensino, e perfis também em material compósito (FIG. 34).



FIGURA 33 – Casa ecológica: tecido de juta e poliéster.
Fonte: Site www.juta.org.



FIGURA 34 – Perfis e tubos em material compósito.
Fonte: Site www.compositesworld.com.

2.8 – Outras pesquisas sobre compósitos de matrizes poliméricas e fibras naturais

Mueller e Krobjilowski (2003), em sua pesquisa, compararam dados de resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência ao impacto, de vários materiais compósitos tendo como matriz o PP (polipropileno) e como reforço as fibras vegetais de linho (LI), cânhamo (CA) e juta de Java (também conhecida como juta do Sião) (JU), ao PP puro e a fibra de vidro-E (FV) e concluíram que a morfologia da fibra influencia nos resultados de resistência à tração. Os compósitos com linho apresentaram melhores propriedades de reforço devido à menor espessura e uniformidade na distribuição do diâmetro das fibras comparativamente ao cânhamo e a juta de Java (TAB. 2, p. 29), resultando num melhor embebedimento durante a moldagem à compressão e, conseqüentemente, melhorando as propriedades mecânicas do compósito. Esses autores concluíram que, a incorporação de um componente de reforço resultou num aumento da resistência à tração e impacto do compósito tendo como amostra de referência o PP puro e que os melhores resultados foram obtidos com 60% de fibra no compósito com fibra de

linho e que com porcentagens menores (50%) ou maiores (70%) dessa fibra, as resistências à tração diminuíram (FIG. 35).

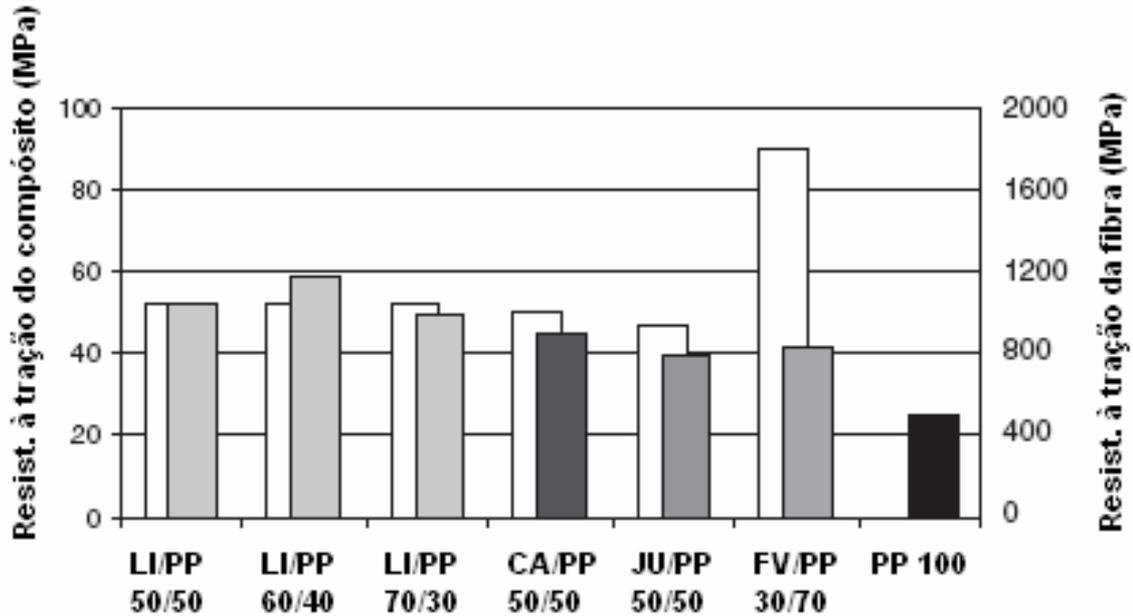


FIGURA 35 – Resistência à tração para compósitos com diferentes materiais fibrosos e o PP puro em comparação à resistência à tração das fibras isoladamente (barras brancas).
Fonte: MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 120.

Essa mesma porcentagem de fibra fez com que os compósitos com fibra de linho e PP apresentassem, também, os melhores resultados quanto ao módulo de elasticidade ou módulo de Young (FIG. 36).

Esses pesquisadores perceberam que para alcançar dados mecânicos semelhantes aos dos compósitos com fibra de vidro-E, o volume de fibras de linho teve que ser o dobro do volume de fibra de vidro-E, fato este, explicado pelos dados mecânicos superiores da fibra de vidro-E.

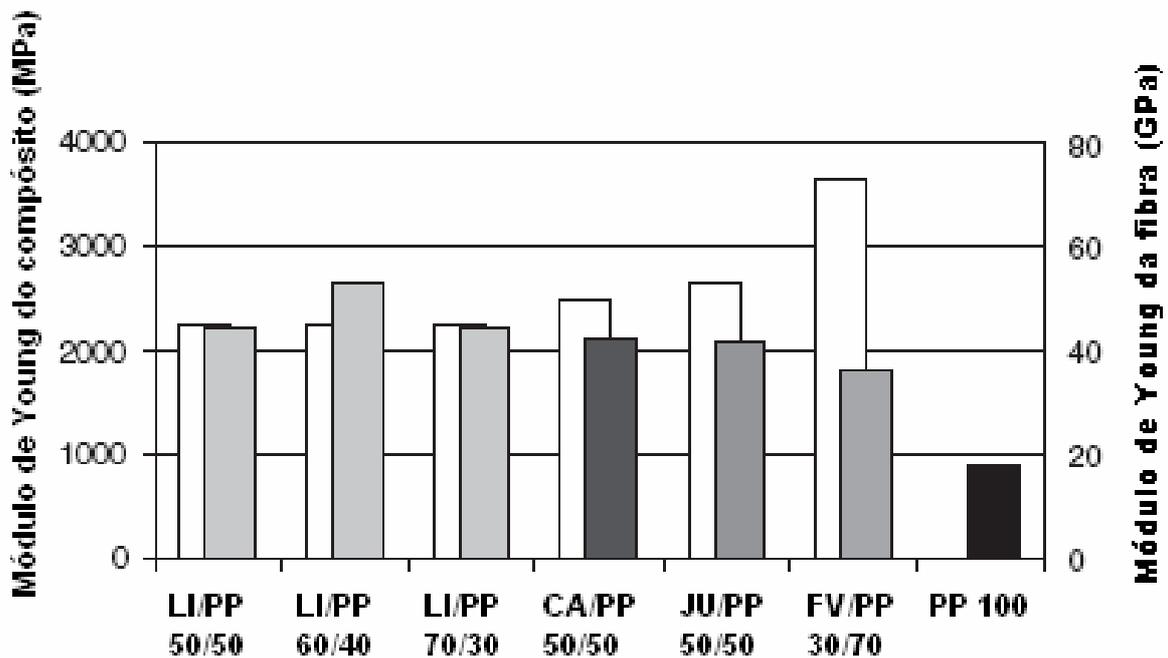


FIGURA 36 – Módulo de Young para compósitos com diferentes materiais fibrosos e o PP puro em comparação ao módulo de Young das fibras isoladamente (barras brancas).

Fonte: MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 120.

Quanto à resistência ao impacto, os pesquisadores concluíram que os materiais compósitos reforçados por fibras naturais apresentam comportamento inferior aos reforçados com fibras de vidro, porém, com otimização no processo de manufatura, principalmente com relação às condições de processamento térmico, os compósitos com fibras naturais podem alcançar resistência ao impacto comparável aos compósitos com fibra de vidro (FIG. 37).

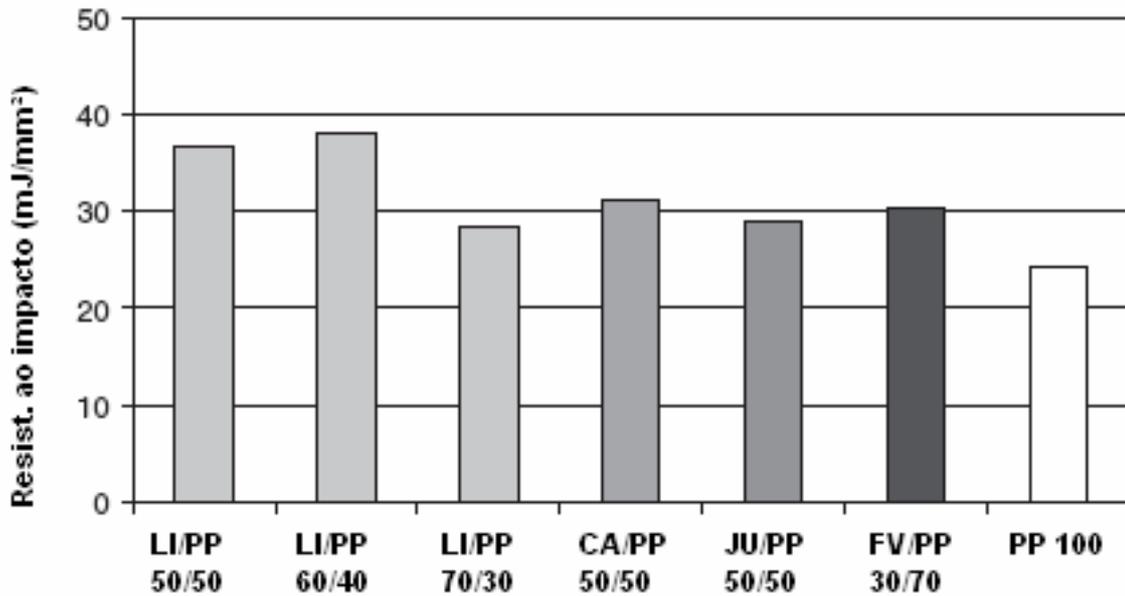


FIGURA 37 – Resistência ao impacto para compósitos com diferentes materiais fibrosos e o PP puro.

Fonte: MUELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 121.

Mohanty, Khan e Hinrichsen (2000), Gassan e Bledzki (1999) e Ray et al. (2001) fizeram pesquisas quanto ao tratamento alcalino nas fibras e chegaram a conclusões semelhantes relativas ao comportamento mecânico dos compósitos por eles estudados. **Mohanty, Khan e Hinrichsen (2000)** estudaram a modificação de dois tipos de tecido de juta (aniagem e carpete) que formaram compósitos com a resina termoplástica de poliéster biodegradável Biopol. Foi feito tratamento com 5% de NaOH por 30 min a 30°C. As propriedades mecânicas estudadas foram tração, flexão e impacto e os resultados mostraram um melhoramento de mais de 50% quanto à tração, 30% quanto à flexão e 90% quanto ao impacto em comparação ao Biopol puro. Quanto à adesão, as FIG. 38 e 39, mostram que o tratamento com NaOH foi fundamental para melhorar a adesão fibra/matriz. **Gassan e Bledzki (1999)** estudaram o melhoramento das propriedades mecânicas de fios de juta, utilizadas como reforço em compósito com a resina termorrígida epóxi. O tratamento foi feito com concentração maior que 28% de NaOH por 30 min a 20°C. Houve

aumento na resistência à tração de 120%, no módulo de 150% e na rigidez de mais de 60% em relação ao compósito com fibra não-tratada. **Ray et al. (2001)** realizaram a pesquisa com fibras de juta tratadas com 5% de NaOH por 2, 4, 6 e 8 horas a 30°C utilizadas em compósitos com uma resina vinílica. E chegaram a conclusão que os melhoramentos máximos foi para os compósitos com fibras tratadas por 4 horas e 35% de fibra. A resistência à flexão melhorou em 20% e o módulo em 23%.

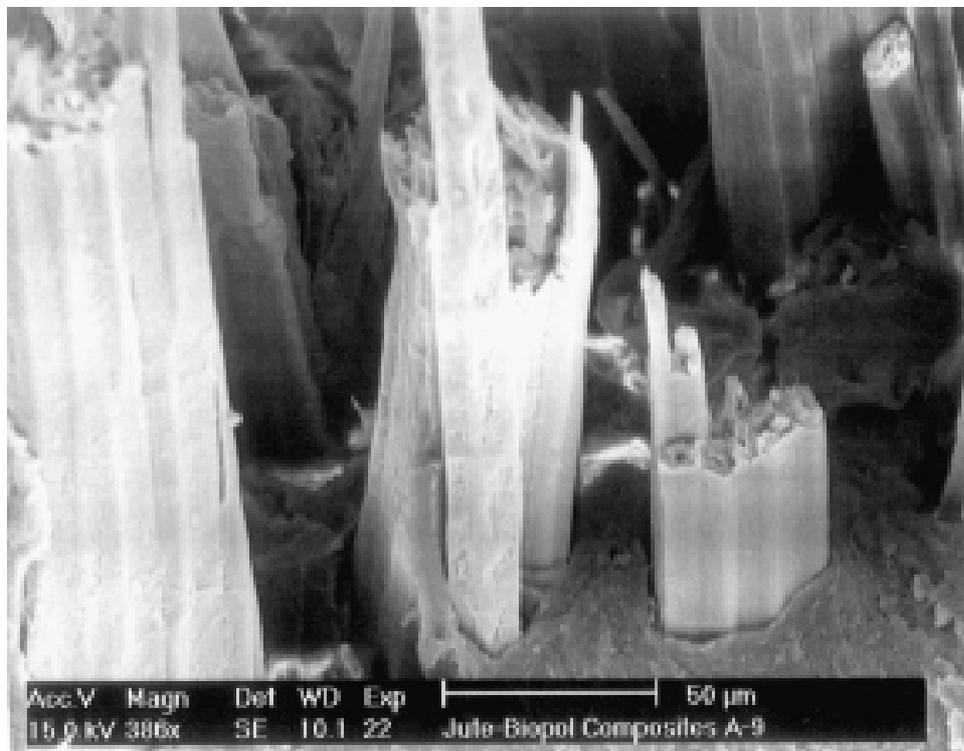


FIGURA 38 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos de aniagem com fibra lavada / Biopol, sugerindo o arrancamento das fibras em forma de feixes, provando que houve uma pobre interação fibra / matriz, devido a fibra ter sido somente lavada.

Fonte: MOHANTY; KHAN ; HINRICHSEN, 2000, p. 1122.

O arrancamento das fibras predominou até o tratamento por 4 horas. Nos tratamentos por tempo maior, a fratura transversal ocorreu com mínimo arrancamento das fibras devido a maior adesão, havendo aumento da tenacidade e baixa elasticidade das fibras. Para tratamento por mais de 4 horas, a resistência à

flexão foi menor 29% e 16% do que a das fibras não-tratadas e tratadas por 4 horas, respectivamente, e o módulo foi menor 51% e 37% do que o das fibras não-tratadas e tratadas por 4 horas, também respectivamente. Os autores afirmam que a redução na resistência à flexão foi devido à incorporação de defeitos nos compósitos durante o processamento.

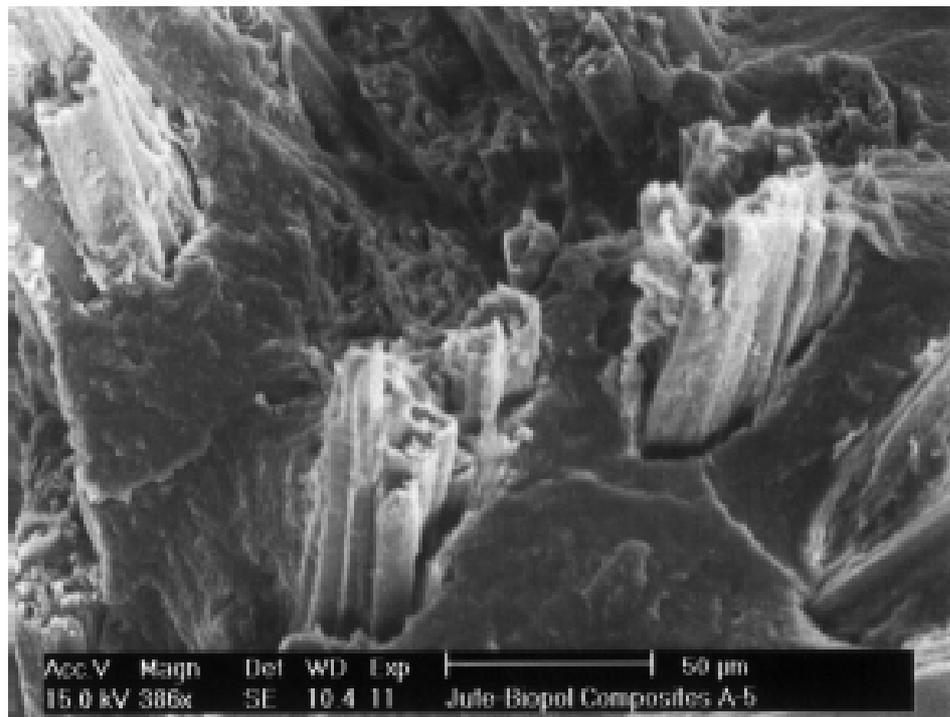


FIGURA 39 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos de aniação com fibra com tratamento alcalino / Biopol, sugerindo uma interação fibra / matriz superior ao do sistema da FIGURA 38, comprovando que o tratamento alcalino melhorou as propriedades mecânicas do compósito.

Fonte: MOHANTY et al, 2000, p. 1122.

Silva (2003) em sua pesquisa estudou um compósito formado pela resina de poliuretana derivada do óleo de mamona e fibras de sisal e coco, processado pela técnica de moldagem por compressão. A pesquisadora realizou ensaios de tração, flexão e impacto, dentre outros. Ela também avaliou o efeito do tratamento com hidróxido de sódio (10%), por 1 hora, nas fibras de sisal e nas fibras de coco. As fibras foram utilizadas da seguinte forma: fibras curtas de sisal e de coco com

aproximadamente 10mm de comprimento, tecido de sisal bidirecional com aproximadamente 2mm de espessura, fios contínuos de sisal, com aproximadamente 1mm de espessura e fibras longas de sisal.

A resina poliuretana foi fornecida pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química de São Carlos – USP, constando de um polioliol e um pré-polímero identificados pelos números 442 e 253, respectivamente. A densidade aproximada do pré-polímero foi de 1,17 g/cm³ e do polioliol foi de 0,98 g/cm³.

As densidades das fibras de sisal e coco, utilizadas nos cálculos de fração volumétrica, foram assumidas como sendo, respectivamente, 1,4 e 1,2 g/cm³. Os diâmetros médios das fibras, obtidos na pesquisa, estão na TAB. 12.

TABELA 12

Diâmetro médio das fibras conforme o seu condicionamento

FIBRAS	DIÂMETRO MÉDIO (μm)
Sisal não-tratada	194
Sisal tratada por 1 hora	187
Coco não-tratada	245
Coco tratada por 1 hora	196

Fonte: SILVA, 2003, p. 63.

Para o ensaio de tração a norma utilizada foi a ASTM D638-96 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* – Método de teste padrão para determinação das propriedades de tração de plásticos) e para o ensaio de flexão, a ASTM D790-96 (*Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials* – Método de teste padrão para determinação das propriedades de flexão de plásticos não-reforçados e reforçados e

materiais de isolamento elétrico), em uma máquina de ensaio Emic DL10000, utilizando o programa Mtest 3.00. As velocidades dos ensaios de tração e flexão foram, respectivamente, 5mm/min e 1mm/min. Para a determinação da resistência ao impacto pelo método Charpy, a norma utilizada foi a ASTM D256-93a (*Standard Test Method for Determining The Pendulum Impact Resistance Of Notched Specimens Of Plastics – Método de teste padrão para determinar a resistência ao impacto de um pêndulo em corpos de prova entalhados de plásticos*). O ensaio foi realizado a temperatura ambiente em uma máquina de impacto modelo PSd 50/15 – Heckert, com energia incidente de 15 J.

Em sua pesquisa, a autora fez comparações de compósitos com reforço de sisal de diferentes geometrias (tecido, fibras curtas, fios e fibras longas), com tratamento e sem tratamento, quanto às propriedades mecânicas de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento.

As conclusões da pesquisadora quanto aos ensaios de tração dos compósitos com reforço de sisal de diferentes geometrias foram:

- que os compósitos de tecido de sisal apresentaram a menor resistência à tração, inferior a matriz de poliuretana e aos demais compósitos e os fatores que contribuíram para este comportamento incluem: os fios orientados transversalmente à direção do carregamento que, reduzem a resistência do compósito, os pontos de entrelaçamento dos fios, que podem dificultar tanto a transferência de carga entre fibra e matriz como a molhabilidade das fibras nesta região e, também, o fato dos tecidos serem demasiadamente grosseiros e que, talvez, a utilização de tecidos com fios mais finos garantisse um melhor resultado, devido ao aumento da razão de aspecto (FIG. 40);

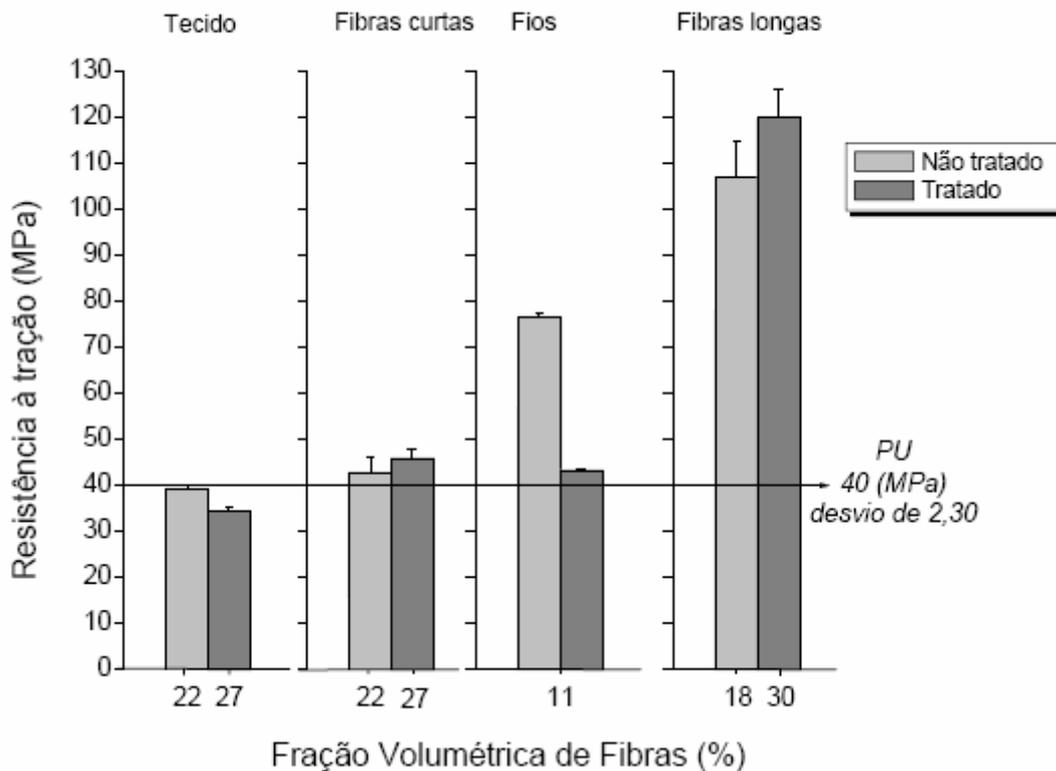


FIGURA 40 – Resistências à tração dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.
Fonte: SILVA, 2003, p. 67.

- os compósitos com fibras longas unidirecionais tratadas apresentaram a maior resistência à tração (um aumento de aproximadamente 200% em relação ao PU), seguidos dos compósitos com fios unidirecionais não-tratados, pois as fibras orientadas na direção do carregamento proporcionam uma efetiva transferência de carga entre fibra/matriz, garantindo um melhor desempenho mecânico em relação aos compósitos com tecido ou fibras curtas aleatórias;

- o tratamento alcalino teve um efeito negativo nos compósitos com tecido e fios unidirecionais, o oposto ao verificado para os compósitos com fibras curtas e longas. Para os compósitos com tecido houve um pequeno decréscimo da resistência à tração e para os compósitos com fios, uma redução brusca. Nos estudos de fotomicrografias, a pesquisadora observou que o tratamento alcalino

efetivamente melhorou a aderência entre fibra e matriz, porém, no caso do tecido de sisal, o tratamento alcalino também promoveu o aumento da fração volumétrica (tecido não-tratado: $v_f = 22\%$, tecido tratado: $v_f = 27\%$), tornando a trama mais fechada (tornando possível o contato fio/fio), diminuindo a molhabilidade externa dos fios e quanto aos compósitos com fios, o tratamento alcalino fez com que os fios perdessem parcialmente a sua compactação, natural do processo de fiação, permitindo uma melhor molhabilidade interna dos fios pela resina, porém, a carga máxima suportada pelos fios tratados (93N em média) foi cerca de 126% menor do que a suportada pelos fios não-tratados (211N em média), havendo também, aumento do alongamento total (FIG. 41), ficando esses compósitos, portanto, menos resistentes à tração.

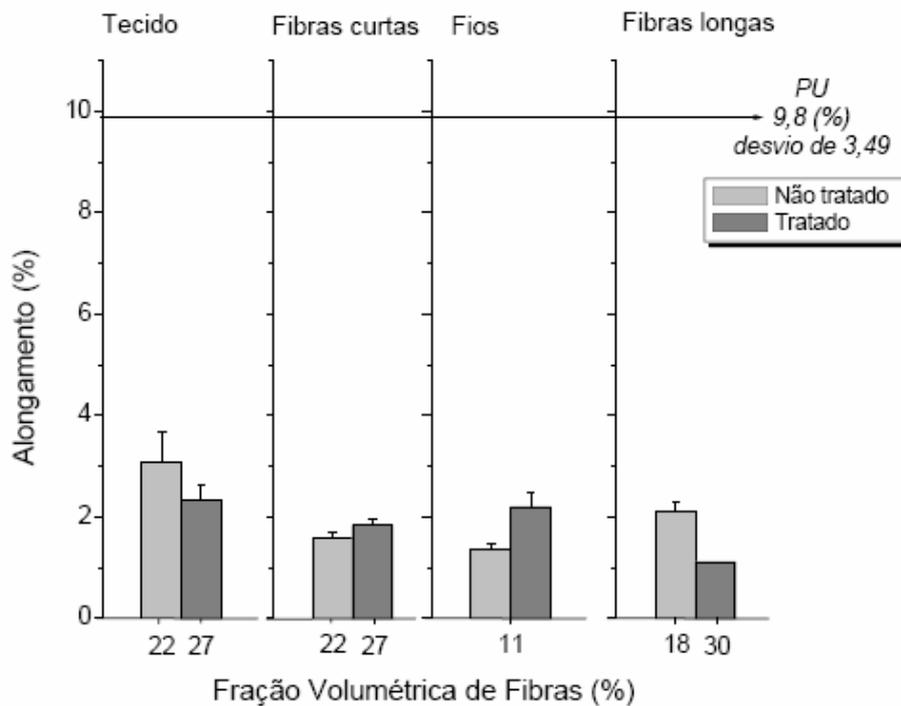


FIGURA 41 – Alongamentos à tração dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.

Fonte: SILVA, 2003, p. 68.

Quanto ao módulo de elasticidade à tração dos compósitos (FIG. 42), a pesquisadora concluiu que as fibras de sisal, independente da geometria e da condição de tratamento, atuaram efetivamente como reforços para os compósitos, e que o melhor desempenho foi obtido para os compósitos com fibras longas de sisal unidirecionais.

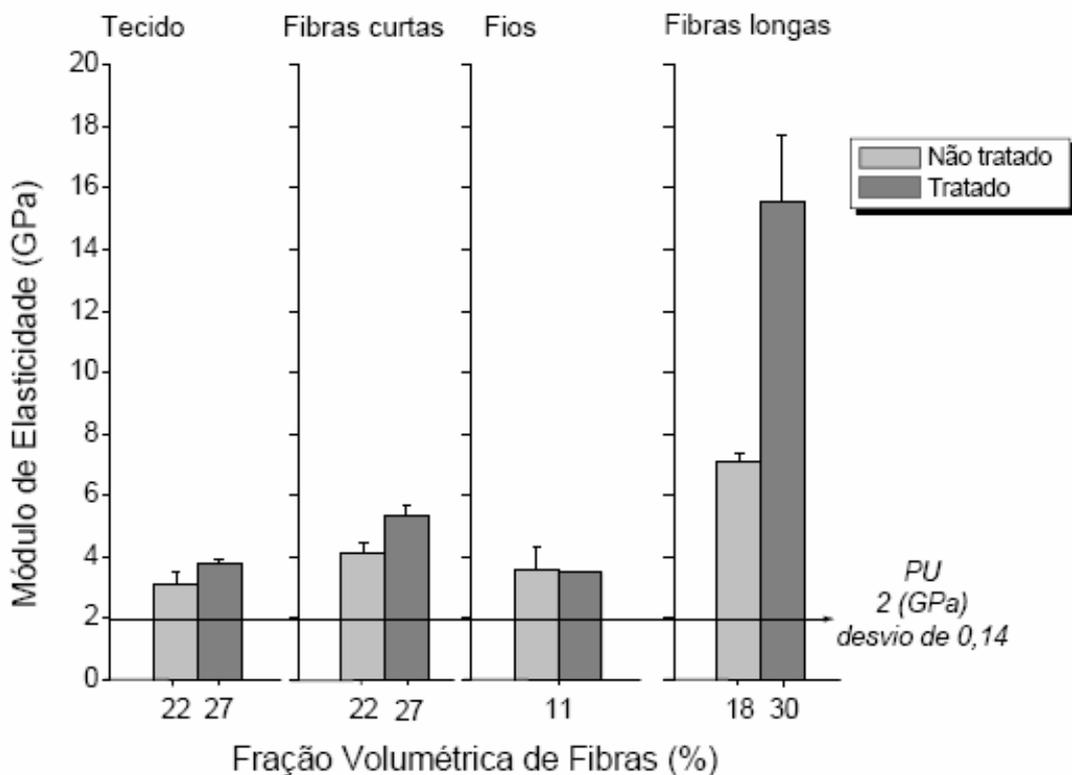


FIGURA 42 – Módulos de elasticidade à tração dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.

Fonte: SILVA, 2003, p. 67.

Quanto às propriedades mecânicas de resistência e módulo de elasticidade em flexão dos compósitos com reforço de sisal de diferentes geometrias (tecido, fibras curtas, fios e fibras longas), tratado e não-tratado, a pesquisadora, mesmo sem poder fazer uma comparação direta entre os compósitos, devido às diferenças nos percentuais de fração volumétrica, chegou as seguintes conclusões:

- no ensaio de flexão, a resistência e o módulo de elasticidade são controlados pela resistência do material localizado na superfície do compósito. A trinca sempre se inicia na região tracionada do corpo de prova e se propaga para o lado comprimido e que assim, as fibras que efetivamente atuam no reforçamento do compósito são as localizadas do lado tracionado do corpo de prova e orientadas na direção da tensão aplicada. As fibras com orientação perpendicular a esta, atuam no sentido de diminuir a resistência à flexão do compósito e, neste caso, a resistência à flexão é dominada pela resistência à flexão da matriz;

- os valores de resistência à flexão dos compósitos com fibras curtas foram inferiores ao da matriz e que os compósitos com fibras curtas de sisal mostraram diminuição da resistência à flexão com o aumento da fração volumétrica e a autora afirma que esses resultados se explicam pelo fato de que nos compósitos com fibras curtas, as extremidades das fibras atuam como pontos de concentração de tensão, funcionando como regiões de iniciação de trincas e com o aumento da fração volumétrica, as fibras atuam mais como defeito do que como reforço (FIG. 43);

- o melhor desempenho dos compósitos foi o com fibras longas, reconhecidamente a melhor configuração de reforço, pois quando as fibras estão alinhadas na direção da tensão aplicada, a transferência de carga entre fibra e matriz é maximizado;

- o segundo melhor desempenho foi dos compósitos com fios unidirecionais. Porém, como os fios foram posicionados nas proximidades da linha neutra de carregamento do corpo de prova, o seu efeito na resistência à flexão foi desprezível, predominando a resistência da matriz;

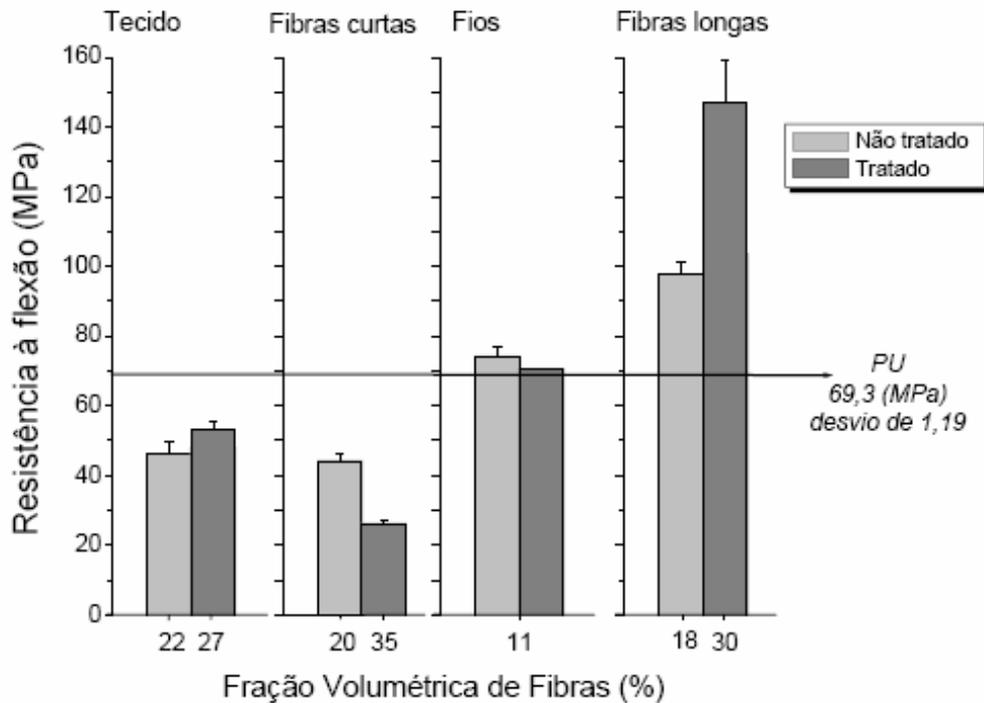


FIGURA 43 – Resistências à flexão dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.

Fonte: SILVA, 2003, p. 81.

- os compósitos com tecido e fibras curtas mostraram o terceiro e quarto piores desempenhos, respectivamente (valores menores que o da matriz). Nos compósitos com fibras curtas, as extremidades dessas fibras concentram tensão e funcionam como regiões de iniciação de trincas, como já foi descrito e nos compósitos com tecido, apesar de estar localizado nas proximidades da linha neutra, a sua espessura acaba por influenciar nas propriedades mecânicas em flexão do compósito, onde os fios orientados transversalmente à direção de tensão aplicada e os pontos de entrecruzamento dos fios dificultam a transferência de carga entre fibra e matriz;

- o efeito do tratamento alcalino foi positivo na resistência à flexão dos compósitos com fibras longas unidirecionais.

Com relação ao módulo de elasticidade (FIG. 44), a pesquisadora concluiu que os compósitos com fibras longas unidirecionais apresentaram o maior valor, seguidos dos compósitos com fibras curtas e que o módulo destes compósitos foram superiores ao da matriz, enquanto os compósitos com tecido e fios unidirecionais mostraram o mesmo módulo da matriz, devido ao posicionamento dos mesmos nas proximidades da linha neutra do corpo de prova, predominando o módulo de elasticidade em flexão da matriz.

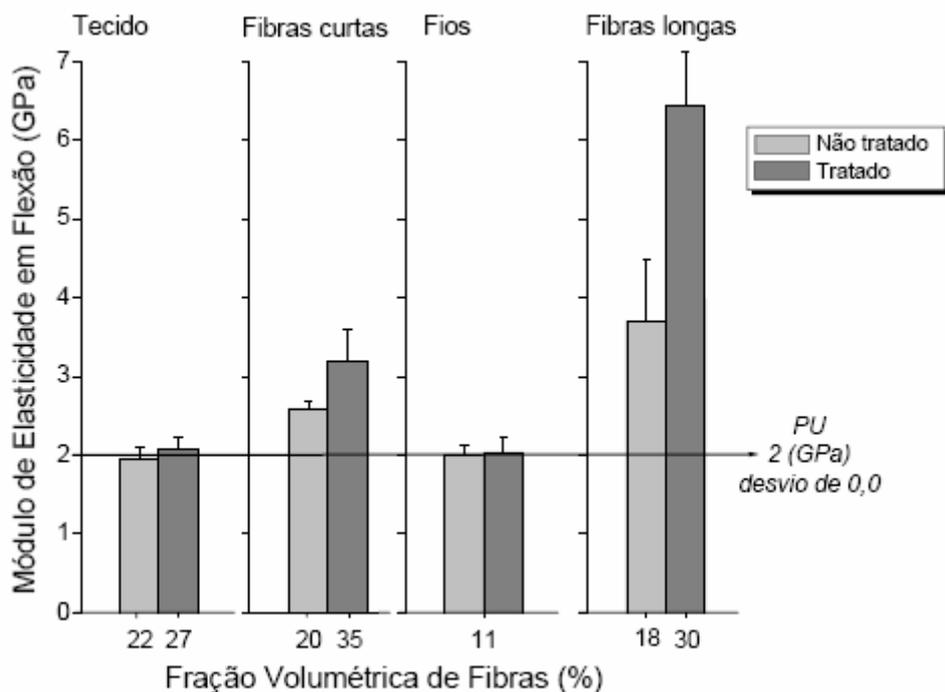


FIGURA 44 – Módulos de elasticidade à flexão dos compósitos com reforço de sisal não-tratado e tratado em solução de NaOH a 10% de diferentes geometrias e do PU.

Fonte: SILVA, 2003, p. 81.

Quanto ao ensaio de impacto Charpy, a pesquisadora estudou compósitos com fibras curtas de sisal, com fibras curtas de coco e com tecido de sisal (com 3, 4 e 5 camadas) e os resultados estão na FIG. 45.

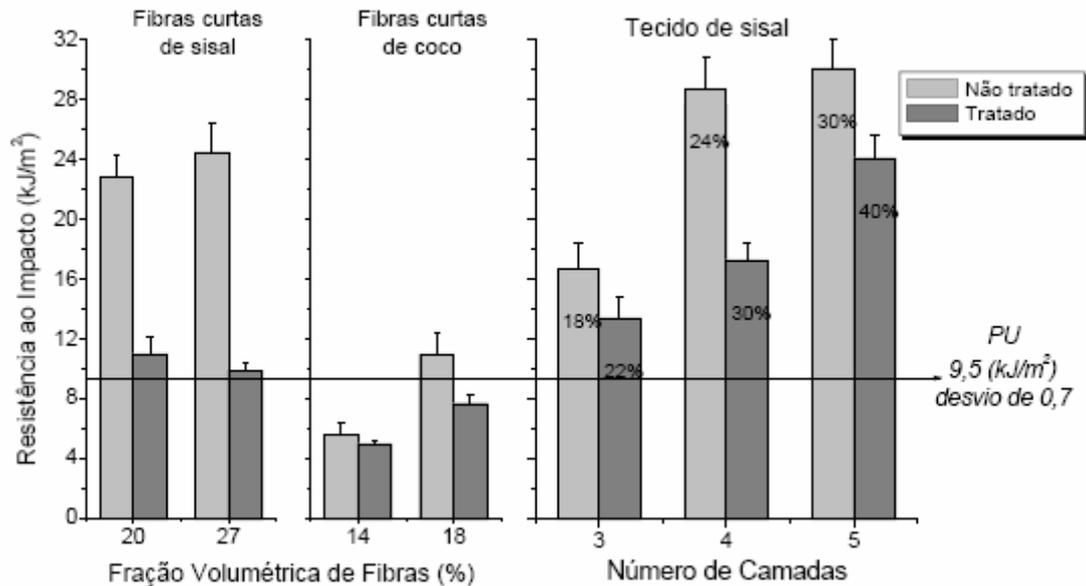


FIGURA 45 – Resistência ao impacto dos compósitos e do PU.
Fonte: SILVA, 2003, p. 108.

Os compósitos mostraram aumento da resistência ao impacto com o aumento da fração volumétrica de fibras, com isso, os principais mecanismos de absorção de energia são favorecidos, resultando em maior energia para a fratura.

Mesmo não tendo sido utilizado os mesmos percentuais de fração volumétrica para uma comparação mais exata, a pesquisadora concluiu:

- que os compósitos com fibras curtas de sisal apresentaram resistência ao impacto superior aos compósitos com fibras curtas de coco e à matriz de poliuretano, alcançando um máximo de $24,47 \text{ kJ/m}^2$ (acréscimo de 158% em relação à matriz) para o compósito com 27% de fibras não tratadas. Esse comportamento é atribuído às propriedades mecânicas superiores das fibras de sisal, comparadas as das fibras de coco;

- quanto aos compósitos com fibras de coco, os baixos desempenhos dos mesmos, frente à matriz de PU, foram devidos aos baixos percentuais de fibras utilizados e às características da fibra. Sabendo que as extremidades das fibras são

concentradoras de tensão e atuam como pontos de iniciação de trincas, a baixa fração volumétrica não forma barreiras para essas trincas durante o seu crescimento, causando a propagação das mesmas mais facilmente através da matriz;

- o tratamento alcalino prejudicou o desempenho dos compósitos sob carregamento por impacto. No caso dos compósitos com fibras curtas de coco, as baixas frações volumétricas fizeram com que os mecanismos de tenacidade devido às fibras fossem quase inoperantes;

Segundo a pesquisadora, os mecanismos de absorção de energia de maior contribuição para a tenacidade dos compósitos ocorrem durante a propagação da trinca e são a extração das fibras e o descolamento. Esses mecanismos consomem energia pela criação de uma maior área superficial de fratura dentro do compósito e pelo trabalho de fricção na interface. A FIG. 46 mostra corpos de prova após os ensaios de impacto Charpy. Nos corpos de prova com reforços não-tratados (NT), são visíveis algumas fibras expostas, caracterizando o mecanismo de extração de fibras. Os corpos de prova com reforço tratado (T), com melhor aderência interfacial, apresentam uma superfície de fratura mais regular. A maior parte dos corpos de prova com tecido não rompeu completamente devido à alta tenacidade apresentada.

A pesquisadora concluiu que o tratamento alcalino, ao melhorar a qualidade da interface fibra/matriz, diminuiu os mecanismos de absorção de energia do compósito e, conseqüentemente, sua resistência ao impacto e que o balanço entre as propriedades de tração, flexão e impacto dependerá da aplicação pretendida.

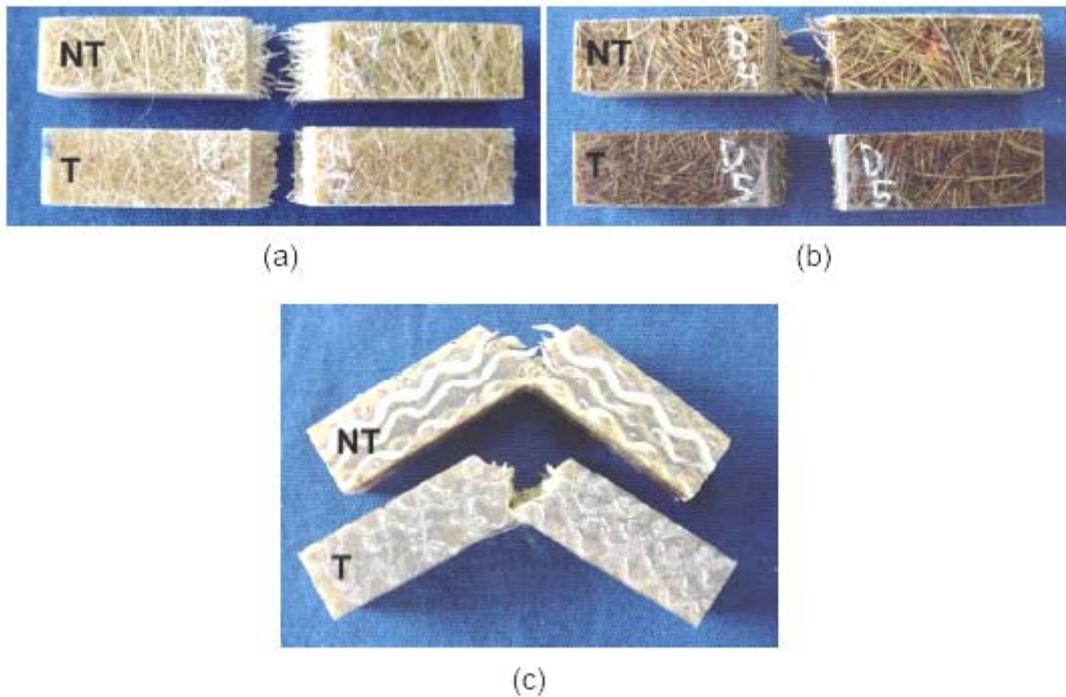


FIGURA 46 – Corpos de prova após ensaio Charpy: (a) compósitos com fibras curtas de sisal, (b) compósitos com fibras curtas de coco e (c) compósitos com tecido de sisal. NT – fibras não-tratadas, T – fibras tratadas.

Fonte: SILVA, 2003, p. 110.

Na TAB. 13 é apresentado um resumo das propriedades mecânicas dos compósitos estudados por Silva e de alguns compósitos encontrados na literatura pela pesquisadora e de interesse para este estudo.

TABELA 13

Resumo das propriedades mecânicas de alguns compósitos poliméricos com fibras naturais

COMPÓSITOS	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO TOTAL (%)	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	MÓDULO EM FLEXÃO (GPa)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO (kJ/m ²)
Sisal/PU (Silva, 2003)	38,4 - 120,0	3,0 - 15,5	1,1 - 3,0	22,9 - 147,0	1,9 - 6,4	9,9 - 30,0
Coco/PU (Silva, 2003)	21,0 - 32,0	2,0 - 2,6	1,1 - 2,3	42,5 - 51,0	1,6 - 2,19	5,0 - 11,0
Sisal/PU (Carvalho et al., 2002)	2,5 - 65,4	0,02 - 2,2	5,5 - 16,5	-	-	-
Juta/poliéster (Gowda et al., 1999)	35,0 - 60,0	3,5 - 7,0	-	-	-	-

Fonte: SILVA, 2003, p. 78.

Silvestre Filho (2001) realizou pesquisa de um compósito de poliuretano a base de óleo de mamona e fibra de carbono para projeto de hastes de implante de quadril. O poliuretano foi fornecido pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química de São Carlos – USP, constando de um polioliol e um pré-polímero identificados pelos números 471 e 329L, respectivamente. A relação estequiométrica para o poliuretano é de 1:0,7 (pré-polímero:polioliol). Segundo o fornecedor, após a cura o poliuretano tem, aproximadamente, uma massa específica de $1,1 \text{ g/cm}^3$. A fibra de carbono foi a Torayca T300. Foram realizados ensaios de tração, flexão e compressão. Para o ensaio de tração a norma utilizada foi a ASTM D638-96, com velocidade de $5,0 \text{ mm/min}$ e o equipamento de ensaio foi a máquina de ensaio universal SINTECH 6 da MTS Systems Corporation, interligada ao sistema de coleta de dados Test Works. A norma ASTM D790-96a foi utilizada para os ensaios de flexão, com velocidade de $1,0 \text{ mm/min}$ e distância entre os apoios de 51 mm , ensaios estes realizados no mesmo equipamento do ensaio de tração. Para o ensaio de compressão, a norma utilizada foi a ASTM D695-96 (*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics* – Método de teste padrão para determinação das propriedades de compressão de plásticos rígidos), com velocidade de $1,3 \text{ mm/min}$ e o ensaio foi realizado no mesmo equipamento do ensaio de tração e flexão.

Na FIG. 47 tem-se a curva do ensaio de tração da amostra do poliuretano e na TAB. 14 os valores encontrados nos ensaios de tração para o poliuretano (valores médios e desvios padrões) nesta pesquisa.

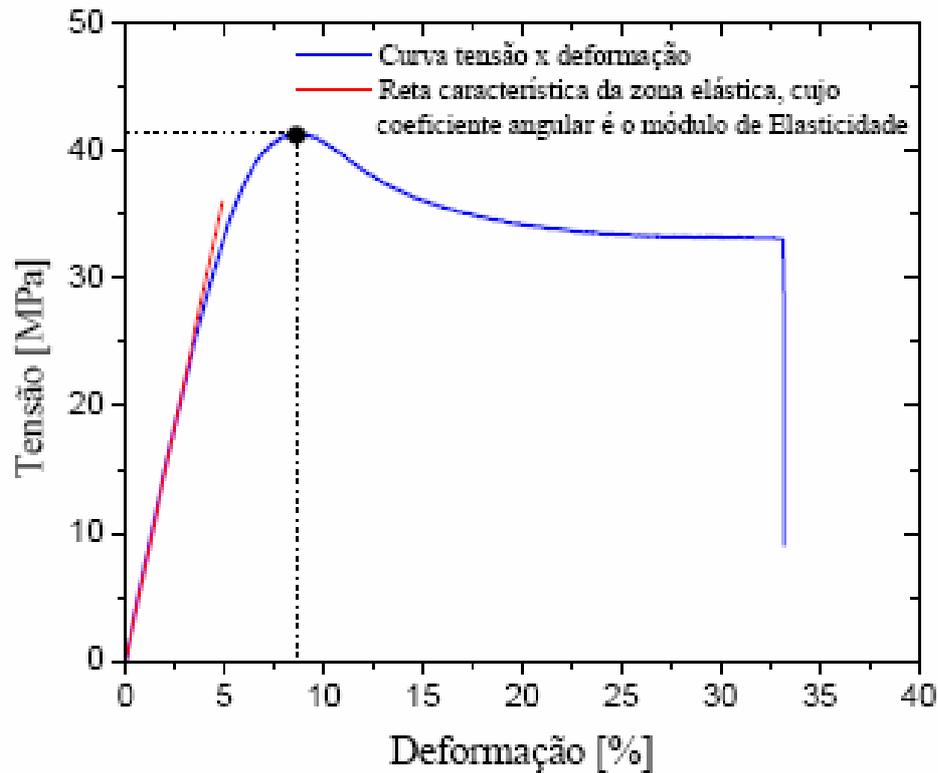


FIGURA 47 – Curva do ensaio de tração da amostra do poliuretano.
Fonte: SILVESTRE FILHO, 2001, p. 116.

O pesquisador afirma, através desta curva, que a resposta da poliuretana à tração é dúctil, apresentando uma curva característica dos polímeros que sofrem escoamento na tensão máxima após a região linear elástica, seguida de deformação plástica até a ruptura.

TABELA 14

Valores encontrados nos ensaios de tração das amostras do poliuretano

PROPRIEDADES	RESULTADOS
Resistência à tração no limite de escoamento (MPa)	$41,5 \pm 0,3$
Deformação no limite de escoamento (%)	$8,7 \pm 0,2$
Módulo de elasticidade (GPa)	$0,7 \pm 0$

Fonte: SILVESTRE FILHO, 2001, p. 117.

Na FIG. 48 tem-se a curva do ensaio de flexão da amostra do poliuretano e na TAB. 15 os valores encontrados nos ensaios de flexão para o poliuretano (valores médios e desvios padrões).

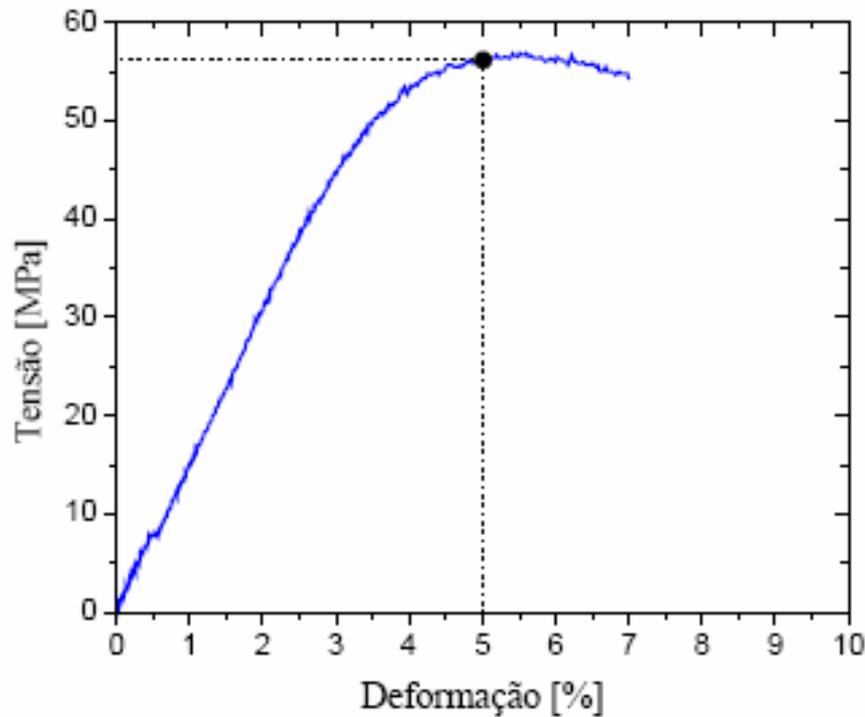


FIGURA 48 – Curva do ensaio de flexão da amostra do poliuretano.
Fonte: SILVESTRE FILHO, 2001, p. 118.

TABELA 15

Valores encontrados nos ensaios de flexão das amostras do poliuretano

PROPRIEDADES	RESULTADOS
Resistência à flexão para a deformação de 5% (MPa)	56,3 ± 0,8
Módulo de elasticidade em flexão (GPa)	1,5 ± 0

Fonte: SILVESTRE FILHO, 2001, p. 119.

Nestes ensaios não houve quebra dos corpos de prova e foi determinada a resistência à flexão para a deformação de 5%, seguindo a recomendação da norma.

Na FIG. 49 tem-se a curva do ensaio de compressão da amostra do poliuretano e na TAB. 16 os valores encontrados nos ensaios de compressão para o poliuretano (valores médios e desvios padrões).

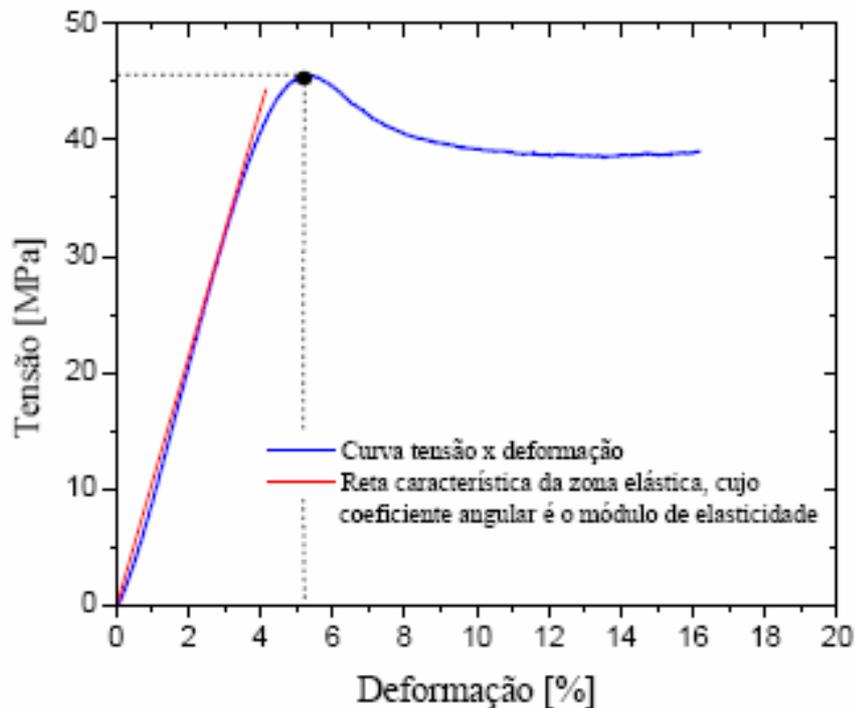


FIGURA 49 – Curva do ensaio de compressão da amostra do poliuretano.
 Fonte: SILVESTRE FILHO, 2001, p. 119.

No gráfico a resposta do poliuretano à compressão é dúctil, sofrendo escoamento na tensão máxima, seguida pelo início do processo de plastificação. Neste caso, o pesquisador afirma que só se pode determinar com certa precisão as propriedades referentes à zona elástica, sendo impossível medir a carga máxima atingida ou de ruptura, pois o corpo de prova cilíndrico do poliuretano sujeito a um esforço axial de compressão tende, na zona plástica, a aumentar a sua seção transversal com o acréscimo de carga. Considerando-se a tensão real (carga dividida pela área instantânea), com o aumento da carga, essa tensão diminui, aumentando assim a resistência do material. Por essa razão, o corpo de prova do

poliuretano não se rompe, ficando cada vez mais achatado até se transformar num disco.

TABELA 16

Valores encontrados nos ensaios de compressão das amostras do poliuretano

PROPRIEDADES	RESULTADOS
Resistência à compressão no limite de escoamento (MPa)	45,6 ± 1,20
Deformação no limite de escoamento (%)	5,3 ± 0,10
Módulo de elasticidade (GPa)	1,1 ± 0,00

Fonte: SILVESTRE FILHO, 2001, p. 120.

Mathur (2006) em seu artigo apresenta algumas propriedades físico-mecânicas de compósito laminado de resina de poliéster insaturada e manta de juta. Os resultados estão na TAB. 17.

TABELA 17

Propriedades físico-mecânicas dos compósitos laminados de juta (30%) / poliéster (70%)

PROPRIIDADE	COMPÓSITO
Densidade (g/cm ³)	1,22
Absorção d'água, 24 hs (%)	1,09
Resistência à tração (MPa)	66,01
Alongamento (%)	2,31
Módulo à tração (GPa)	4,42
Resistência à flexão (MPa)	93,08

Fonte: MATHUR, 2006, p. 474.

O'Dell (1997) estudou o comportamento mecânico de compósitos de juta (não-tratada e tratada com glicol) e poliéster quanto à tração (ASTM 638-90), flexão (ASTM 790-90) e impacto Izod entalhado e não-entalhado (ASTM 256), comparativamente aos compósitos de fibra de vidro tratada com silano e poliéster. A

fibra de juta utilizada foi em forma de manta e a resina foi uma ortofitáfica de poliéster-estireno insaturada (também chamada poliéster) da Owens Corning, Inc., escolhida por sua flexibilidade sob condições de carga dinâmica e baixa viscosidade (150 cm/sec em temperatura ambiente). Na TAB. 18 estão as propriedades mecânicas da resina utilizada segundo seu fabricante.

TABELA 18

Propriedades mecânicas da resina de poliéster

PROPRIEDADE	VALOR (UNIDADE)	NORMA DE ENSAIO
Resistência à tração	68,95 MPa	ASTM 638
Módulo à tração	3,93 GPa	ASTM 638
Alongamento à tração	2,0%	ASTM 638
Resistência em flexão	120,7 MPa	ASTM 790
Módulo em flexão	4,45 GPa	ASTM 790

Fonte: Owens-Corning, Inc. in O'Dell, 1997, p. 281.

A fração volumétrica de fibra foi de 10 a 15%. A moldagem foi por injeção da resina sobre a manta de juta (tratada e não-tratada) e a manta de fibra de vidro, cortadas e dispostas em três camadas em moldes, separadamente. A temperatura de moldagem foi 55°C no início da injeção da resina.

Os resultados quanto à tração, flexão e impacto Izod dos compósitos de poliéster e juta não-tratada, poliéster e juta tratada com glicol e poliéster e fibra de vidro tratada com silano estão nas TAB. 19, 20 e 21.

TABELA 19

Propriedades de tração e módulo dos compósitos de poliéster

FIBRA/TRATAMENTO	RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO (GPa)
Juta/não-tratada	45,81 ± 1,71	3,69 ± 0,31
Juta/glicol	43,48 ± 2,93	3,22 ± 0,20
Fibra de vidro/silano	114,23 ± 1,66	7,08 ± 0,29

Fonte: O'Dell, 1997, p. 283.

TABELA 20

Propriedades de flexão e módulo dos compósitos de poliéster

FIBRA/TRATAMENTO	RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO (GPa)
Juta/não-tratada	61,64 ± 1,93	3,05 ± 0,20
Juta/glicol	63,15 ± 1,60	3,21 ± 0,11
Fibra de vidro/silano	161,91 ± 11,57	6,20 ± 0,33

Fonte: O'Dell, 1997, p. 283.

TABELA 21

Propriedades de impacto Izod dos compósitos de poliéster

FIBRA/TRATAMENTO	ENTALHADO (J/m)	NÃO-ENTALHADO (J/m)
Juta/não-tratada	32,50 ± 3,45	38,73 ± 4,26
Juta/glicol	28,64 ± 1,15	32,40 ± 3,23
Fibra de vidro/silano	376,81 ± 5,52	376,63 ± 18,19

Fonte: O'Dell, 1997, p. 284.

A pesquisadora não encontrou problemas durante o processamento dos corpos de prova. A resina fluiu normalmente pelas três camadas das mantas (tanto entre as de juta quanto entre as de fibra de vidro). Os compósitos tinham uma quantidade mínima de bolhas de ar entre as mantas. A molhabilidade foi a mesma para a juta e para a fibra de vidro. Os compósitos com juta eram mais leves e menos abrasivos quanto ao equipamento de corte do que os com fibra de vidro.

Os valores de resistência à tração, módulo à tração, resistência em flexão e módulo em flexão dos compósitos com fibra tratada e não-tratadas foram similares, indicando que o tratamento das fibras não melhorou as propriedades do compósito. Esses resultados foram inferiores aos dos compósitos com fibra de vidro, porém na mesma ordem de magnitude. Quanto ao impacto Izod, os valores dos compósitos com fibra de juta tratada e não-tratada foram inferiores em magnitude aos dos compósitos com fibra de vidro. Através da micrografia eletrônica de varredura dos corpos de prova de impacto com fibra não-tratada, foi observado o arrancamento das fibras, indicando uma fraca adesão fibra/matriz. A pesquisadora conclui que as fibras de juta podem ser utilizadas sem modificação em muitos compósitos, onde custo e baixo peso sejam mais importantes do que altas resistências.

Nesta mesma pesquisa, aparecem outros resultados importantes sobre as propriedades mecânicas de compósitos de resina termorrígida de poliéster e juta e essas informações estão na TAB. 22.

TABELA 22

Propriedades mecânicas de compósitos de poliéster / juta

FRAÇÃO VOLUMÉTRICA (%)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	REFERÊNCIA
30	125	CHAWLA; BASTOS (1979)
22	84	SHAH; LAKKAD (1981)

Fonte: O'Dell, 1997, p. 281.

Joseph, Medeiros e Carvalho (1999) em sua pesquisa de compósitos de poliéster (Resapol 10-225, da Resana S. A., com catalizador MEK a 1%) e fibras curtas de sisal (Brascorda S. A.), moldados por compressão, chegaram aos valores,

dispostos na TAB. 23, de resistência à tração, módulo e alongamento da resina poliéster.

TABELA 23

Propriedades mecânicas da resina poliéster Resapol 10-225

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA RUPTURA (MPa)	MÓDULO ELÁSTICO (GPa)	ALONGAMENTO NA RUPTURA (%)
34,8 ± 2,51	1,36 ± 0,08	2,07 ± 0,13

Fonte: JOSEPH; MEDEIROS; CARVALHO, 1999, p. 139.

Apesar de se tratar de reforço de sisal, na TAB. 24 estão dados importantes quanto ao efeito da orientação das fibras nas propriedades dos compósitos.

TABELA 24

Efeito da orientação das fibras nas propriedades dos compósitos poliéster/sisal

TIPO DE COMPÓSITO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA RUPTURA (MPa)	MÓDULO ELÁSTICO (GPa)	ALONGAMENTO NA RUPTURA (%)
I	43,36 ± 1,85	2,13 ± 0,01	6,12 ± 0,25
II	115,82 ± 3,01	3,07 ± 0,09	6,28 ± 0,27
III	11,59 ± 1,33	0,91 ± 0,06	1,02 ± 0,22

Fonte: JOSEPH; MEDEIROS; CARVALHO, 1999, p. 139.

Tipo I - compósito com fibras de 35mm distribuídas ao acaso;

Tipo II - compósito reforçado por fibras longas orientadas, testados na direção longitudinal e

Tipo III – compósito reforçado por fibras longas orientadas e testado na direção transversal ao reforço.

Em todos os casos o teor de fibras foi de 30% em peso.

Pelos resultados, os pesquisadores observaram que a resistência à tração de compósitos unidirecionais testados longitudinalmente foi 300% maior do que a dos compósitos com fibras dispostas ao acaso e muito maior (quase 1000%) do que a dos compósitos com fibras orientadas transversalmente à direção do teste, demonstrando que a orientação das fibras é fundamental para a resistência de

materiais compósitos, ou seja, com o alinhamento das fibras paralelo à direção de teste, a resistência à tração do compósito é máxima, com o alinhamento das fibras perpendicular à direção de teste, a resistência é quase inexistente e com o alinhamento aleatório das fibras em relação à direção de teste, a resistência é intermediária. Justificativa similar explica os resultados quanto ao módulo e alongamento.

Albuquerque *et al.* (1999) estudaram o comportamento mecânico quanto à resistência à tração, flexão e impacto de um compósito de fio de juta unidirecional e poliéster. O fio de juta tinha diâmetro de 2,5mm, doado pela Companhia Têxtil de Castanhal (Belém, Pará) e dois tipos de resina insaturada de poliéster: da empresa Elekeiroz S.A. e outra da empresa Resana S.A. Essas resinas tinham essencialmente as mesmas características, exceto pelo fato de que a resina da Resana S.A. foi formulada com um agente de molhabilidade BYK-A515, da empresa química BYK (Brasil). Na TAB. 25 estão os resultados dos ensaios com os fios de juta não-tratados com variação da fração volumétrica de fibra nos compósitos.

As melhores respostas quanto às propriedades mecânicas obtidas pelos compósitos preparados com a resina Resana são atribuídas à presença do agente de molhabilidade na sua fórmula. Esse agente é um aditivo que libera as bolhas de ar melhorando as propriedades de molhabilidade da fibra. Os pesquisadores afirmam que a maior limitação da alta velocidade de processamento de compósito é a molhabilidade da fibra, pois uma molhabilidade ou impregnação incompleta freqüentemente resulta na formação de vazios ou aprisionamento de ar. A molhabilidade incompleta produz defeitos interfaciais e, portanto, reduz a resistência de adesão pela indução de falhas provocadas pela concentração de tensão. O aumento da fração volumétrica de fibra também contribuiu para esses resultados.

TABELA 25

Influência do agente de molhabilidade nas propriedades mecânicas dos compósitos de poliéster reforçados pelos fios de juta em função da proporção de fibra

TIPO DE RESINA USADA	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRA (%)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	ALONGAMENTO NA RUPTURA (%)	RESISTÊNCIA EM FLEXÃO (MPa)	MÓDULO EM FLEXÃO (GPa)	DEFLEXÃO (%)
Elekeiroz	0	46,1	0,68	7,96	72,6	2,19	3,46
	10	49,0	0,80	6,31	72,6	2,50	1,98
	20	64,7	0,93	6,7	96,1	3,13	2,64
	30	62,8	0,93	6,64	96,1	3,13	2,75
Resana	0	38,1	0,81	5,98	72,7	2,20	2,88
	10	48,6	1,29	4,97	71,0	3,54	1,92
	20	63,7	1,39	6,00	104,7	3,98	2,53
	30	68,7	1,40	6,15	115,0	4,25	2,90

Fonte: ALBUQUERQUE *et al.*, 1999, p. 836.

Esses autores também fizeram estudo da influência de diferentes tratamentos alcalinos nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster Resana reforçados pelos fios de juta e a influência da proporção de fibra. O resultado está na TAB. 26.

Os compósitos com fibra refluxada em 10% de solução aquosa de NaOH por 3 horas apresentaram melhor resistência mecânica no geral, maior alongamento na ruptura, menor módulo de elasticidade, mais alto módulo em flexão e a mais baixa resistência ao impacto do que os compósitos com fibra imersa em 10% de solução aquosa de NaOH por 3 horas em temperatura ambiente e os compósitos com fibra não-tratada. Isto ocorreu devido ao fato de que o tratamento alcalino mais severo fez com que o álcali penetrasse mais efetivamente nos fios abrindo mais locais para a impregnação do polímero. O tratamento alcalino também melhorou as características de adesão da superfície ao remover as impurezas naturais e artificiais, contribuindo para maior rugosidade na superfície da fibra e, ainda, provocando o desfibrilamento em fibras menores, reduzindo o diâmetro das fibras e, conseqüentemente, aumentando a razão de aspecto. O desenvolvimento de uma superfície mais rugosa e a maior razão de aspecto melhoram a adesão interfacial fibra-matriz e melhoram as propriedades mecânicas do compósito. Porém, quanto à resistência ao impacto, as respostas foram opostas: com tratamento alcalino mais rigoroso e também com o aumento da fração volumétrica da fibra houve decréscimo nesta propriedade. A resistência ao impacto é muito sensível à adesão, pois uma grande adesão interfacial leva a um detrimento das propriedades de impacto. A tenacidade de um compósito reforçado por fibra depende principalmente do comportamento tensão-deformação da fibra. As fibras de juta são fibras comparativamente muito fortes com alta deformação na falha e conseqüentemente,

concede um alto trabalho de fratura dos compósitos. O arrancamento da fibra, a fratura interfacial e a delaminação são as maiores contribuições para a tenacidade dos compósitos. Os mecanismos de absorção de energia dependem da utilização da energia necessária para descolar as fibras e arrancá-las completamente da matriz e do uso de uma fraca adesão interfacial entre a fibra e a matriz. A baixa resistência ao impacto dos compósitos de poliéster e juta reflexada foi devida ao melhor travamento entre fibra e matriz, que resultou na fratura da fibra no plano de falha com pouco arrancamento de fibra. Os autores concluem que a resistência máxima e a máxima tenacidade não podem ser alcançadas simultaneamente e que os compósitos devem ser projetados para uma combinação de propriedades mecânicas desejada.

TABELA 26

Influência de diferentes tratamentos alcalinos nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster Resana e fios de juta em função da proporção de fibras

TIPO DE TRATAMENTO ALCALINO	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRA (%)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (GPa)	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	ALONGAMENTO NA RUPTURA (%)	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	MÓDULO EM FLEXÃO (GPa)	DEFLEXÃO (%)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO (J/m)
Caso I	0	38,1	0,81	5,98	72,7	2,20	2,88	20,8
	10	48,6	1,29	4,97	71,0	3,54	1,92	26,2
	20	63,7	1,39	6,00	104,7	3,98	2,53	50
	30	68,7	1,4	6,15	115,0	4,25	2,90	84,2
Caso II	0	-	-	-	-	-	-	-
	10	50,0	1,16	5,4	69,4	3,24	2,33	24
	20	64,8	0,98	6,7	89,7	4,02	2,64	47,1
	30	61,8	1,22	6,6	96,0	4,31	2,75	80
Caso III	0	-	-	-	-	-	-	-
	10	51,1	1,15	6,2	71,8	3,33	3,0	19,4
	20	71,8	0,97	7,7	78,3	4,92	2,61	38,5
	30	63,2	1,15	6,8	90,5	4,54	2,83	38,5

Fonte: ALBUQUERQUE *et al.*, 1999, p. 838.

Caso I – Fibra não-tratada.

Caso II – Fibra imersa em 10% de solução aquosa de NaOH por 3 horas em temperatura ambiente.

Caso III – Fibra refluxada em 10% de solução aquosa de NaOH por 3 horas.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais e equipamentos

Os materiais utilizados para a elaboração dos compósitos foram:

- 5 metros de tecido de fibra de juta F9;
- 8,2 quilos da resina de poliuretano à base de óleo de mamona com catalizador;
- 8,6 litros da resina de poliéster cristal com catalizador (172 g);
- 6 placas de compensado de 30 x 30 cm;
- 20 placas de vidro temperado de 30 x 30 cm;
- 1 lata de cera desmoldante PVA, da DIOSIL;
- Estopa;
- 10 trinchas de 1 ½”;
- 1 rolo compressor com ranhuras;
- 1 espátula plástica;
- 3 misturadores para resina;
- 10 bases de garrafas de refrigerante de 2 litros (PET) cortadas, para mistura das resinas;
- 1 tesoura;
- 1 estilete;
- Acetona para limpeza do rolo;
- Álcool para limpeza das placas dos vidros;
- Fita crepe;
- Isopor 1mm.

Na FIG. 50 estão alguns dos materiais utilizados.



FIGURA 50 – Alguns materiais utilizados: acetona, cera de carnaúba, rolo com ranhuras, trincha, misturador plástico, espátula e vidro temperado.

Os laboratórios e equipamentos utilizados foram:

1 No Laboratório de Eco-compósitos, no prédio do LABEM (Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA):

- Máquina de ensaio universal EMIC (FIG. 51);
- Balança digital BG 1000 – capacidade 1000g (FIG. 52);

- Equipamento para ensaio de impacto Charpy, marca Gunt WP410, limite 300Nm (FIG. 53);
- Equipamento para ensaio de impacto por queda de dardo (FIG. 54);
- Prensa de 1 tonelada (FIG. 55);
- Serra elétrica.
- Paquímetro digital.



FIGURA 51 – Máquina de ensaio universal EMIC.

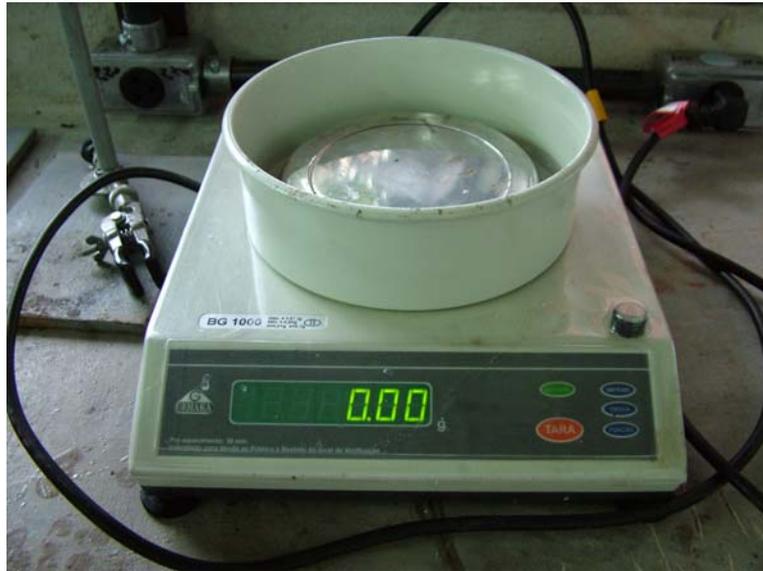


FIGURA 52 - Balança digital BG1000.



FIGURA 53 – Equipamento para o ensaio de impacto Charpy.



FIGURA 54 - Equipamento para o ensaio de impacto por queda de dardo.



FIGURA 55 – Prensa de 1 tonelada.

2 No laboratório de Metalografia, no prédio do LABEM da UFPA:

- Máquina de ensaio universal KRATOS, modelo KE 3000MP, capacidade 3000Kgf (para os ensaios de compressão e flexão) (FIG. 56).



FIGURA 56 – Máquina de ensaio universal KRATOS, modelo KE 3000MP, capacidade 3000Kgf com software aplicativo.

3 No Museu Emílio Goeldi:

- Microscópio eletrônico de varredura LEO 1550 VP (FIG. 57).

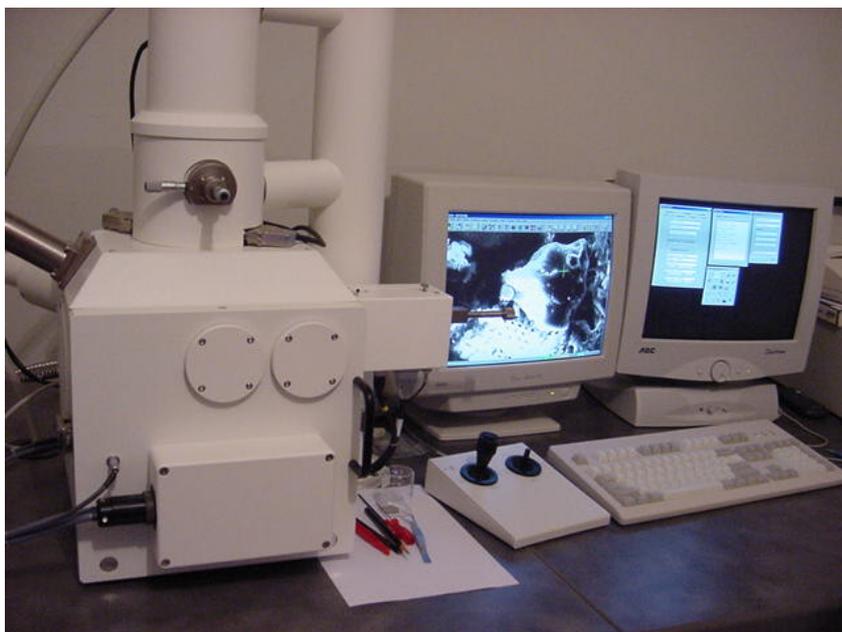


FIGURA 57 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).
Fonte: Museu Emílio Goeldi.

3.2 Procedimentos experimentais

Tratando-se de um compósito laminado, constituído de três lâminas (duas externas de tecido de juta com poliéster e uma interna de tecido de juta com poliuretana à base de óleo de mamona), para aplicação como painéis divisórios de ambientes e da realização dos ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão e impacto, o procedimento experimental foi estabelecido segundo o tipo de compósito, seus materiais constituintes, as normas de padronização dos ensaios e o número de corpos de prova necessários segundo cada norma. Ele está resumido no fluxograma da FIG. 58.

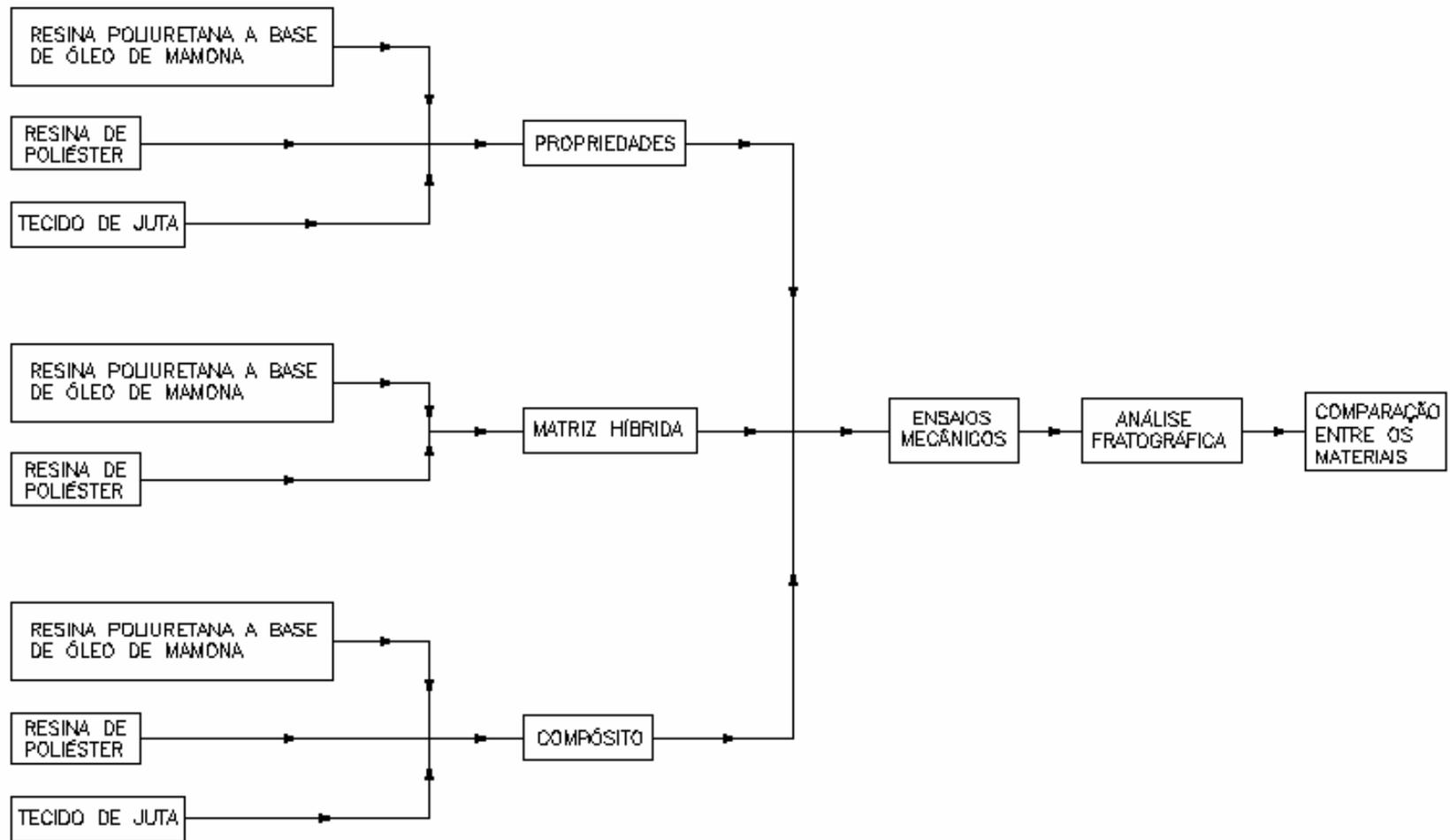


FIGURA 58 – FLUXOGRAMA DO EXPERIMENTO

3.2.1 Propriedades dos materiais constituintes do compósito

3.2.1.1 Propriedades do tecido de juta

As propriedades da fibra de juta estão nas TAB. 2, 3 e 4, nas p. 29, 33 e 34, respectivamente.

O tecido de juta utilizado nesta pesquisa foi o classificado como F9, segundo a Companhia Têxtil de Castanhal que o produziu (FIG. 59). Esse tecido, segundo a TAB. 6, p. 37, é fornecido em peças com largura de 1.00m e gramatura de 320g/cm². Esse tecido recebeu tratamento químico com NaOH em seu processo de fabricação pela Companhia Têxtil de Castanhal.



FIGURA 59 – Tecido de juta F9.

3.2.1.2 Propriedades da resina de poliuretana a base de óleo de mamona

A resina de poliuretana a base de óleo de mamona utilizada foi a resina industrializada RESCON 301-40, adquirido 10kg da mesma, em embalagens de 200g, da PROQUINOR, Produtos Químicos do Nordeste Ltda. A escolha entre as resinas RESCON 301 e a RESCON 301-40 foi feita pelo critério do tempo de gel, pois a RESCON 301 apresenta tempo de gel de 15-30 minutos e a RESCON 301-40 apresenta um tempo de gel maior, permitindo melhor trabalhabilidade com a resina (30-45 min). As características técnicas desta resina estão na TAB. 27. Esta resina já vem em embalagem aluminizada dividida na porção polioliol / pré-polímero na proporção 1:0,43. Para iniciar a polimerização, bastou eliminar o separador entre o polioliol e o pré-polímero da embalagem e amassá-la por 10 minutos (FIG. 60).



FIGURA 60 – Embalagem da resina RESCON 301-40.
Fonte: site www.proquinor.com.br.

TABELA 27

Características técnicas da resina RESCON 301-40

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICAÇÃO DA RESCON 301 - 40
Tempo de Gel a 25°C	30 - 45 min
Viscosidade da mistura 20 min	2.500 - 8.000 cps
Dureza	60 - 80 Shore A
Proporção Polioli / Prepolímero	1 : 0,43
Cura de trabalho	24 h
Polimerização total	De 7 a 10 dias
Máxima temperatura de cura (ASTM D – 2471)	95 °C máx.
Massa específica (20°C) (ASTM D - 792)	1,0 - 1,1 g/cm ³
Viscosidade da mistura 25°C (inicial)	550 - 750 cps
Absorção de água % (ASTM D - 570)	1,0%

Fonte: site www.proquinor.com.br.

3.2.1.3 Propriedades da resina de poliéster

A outra resina utilizada foi a resina cristal de poliéster AM-100 AEROJET com catalizador Mek na proporção de 2%. A resina de poliéster AM-100 é translúcida, transparente. Para dar cor ao compósito, este fabricante oferece uma linha completa de pigmentos e corantes que podem alterar o aspecto da resina. Trata-se de uma resina ortofitálica, cujas características gerais estão apresentadas nas TAB. 9, 10 e 11, nas p. 45, 46 e 47.

A resina AM-100, da AEROJET Brasileira de fiberglass Ltda, é uma resina poliéster insaturada cujas características gerais e técnicas do fabricante estão, respectivamente, nas TAB. 28 e 29. Foram adquiridos 10 litros da mesma.

TABELA 28

Características gerais da resina AM-100 da Aerojet

CARACTERÍSTICAS GERAIS	
Tipo	Pré-acelerada
Características	Alta viscosidade, média reatividade, alto brilho, alta transparência, rígida
Uso	Peças de adorno, vitrais, telhas (laminação manual)
Tecnologia de aplicação	Moldagem por contato
Garantia de estocagem	Ao abrigo do sol e a temperatura inferior a 25°C
Garantia de uso	3 meses da data de fabricação

Fonte: Aerojet Brasileira de fiberglass Ltda.

TABELA 29

Características técnicas da resina AM-100 da Aerojet

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Propriedades da resina líquida	Método de teste	Especificações	Unidade
Cor	Visual	Transparente	-
Viscosidade Brookfield 25°C	Spindle 2-30RPM	1600-2000	cP
Tempo de gel	10g de resina +1,0cc Butanox M-50	9-13	Minuto
Intervalo de reação	Tempo de gel e pico exotérmico	Máx. 17	Minuto
Índice de acidez	ASTM D-1639/83	Máx. 30	Mg KOH / g de resina
Massa específica	ASTM D-1475	1,08-1,12	g/cm ³
Estabilidade	Estufa 93°C	48	hora
Sólidos	ASTM d-1259/61	67-71	%

Fonte: Aerojet Brasileira de fiberglass Ltda.

3.2.2 Os ensaios normalizados

Os ensaios mecânicos realizados foram: de tração, de compressão, de flexão, de impacto Charpy e de impacto por queda de dardo.

3.2.2.1 O ensaio de tração

a) A norma

A norma utilizada para a realização deste ensaio foi a **D 638 – 90 – STANDARD TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTIES OF PLASTIC** (Método de teste padrão para determinação das propriedades de tração de plásticos) da *American Society for Test and Materials (ASTM)*. Esse método de teste determina as propriedades de tração de plásticos reforçados ou não reforçados.

b) As dimensões do corpo de prova

As dimensões dos corpos de prova foram escolhidas segundo a tabela da FIG. 1 - Corpos de provas para chapa, lâmina e plásticos moldados (*Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics*), na pág. 159 da norma: corpos de prova com 7mm ou menos quanto à espessura, pois com a sobreposição das três camadas o compósito ficou com 6mm de espessura e foi escolhido o Tipo I, porque trata de um compósito reforçado, segundo o item 6.1.3 Compósitos reforçados (*Reinforced Composites*), na pág. 160 da norma, que inclui laminados altamente ortotrópicos. Segundo essas considerações, os corpos de prova para o ensaio de tração apresentaram as seguintes dimensões e o formato está na FIG. 61:

W (largura da seção estreita): 13mm;

L (comprimento da seção estreita): 57mm;

WO (largura total): 19mm;

LO (comprimento total): 165mm;

G (comprimento do medidor): 50mm;

D (distância entre as garras): 115mm;

R (raio de concordância): 76mm e

T (espessura): 6mm (medida das placas de onde os corpos de prova foram retirados).

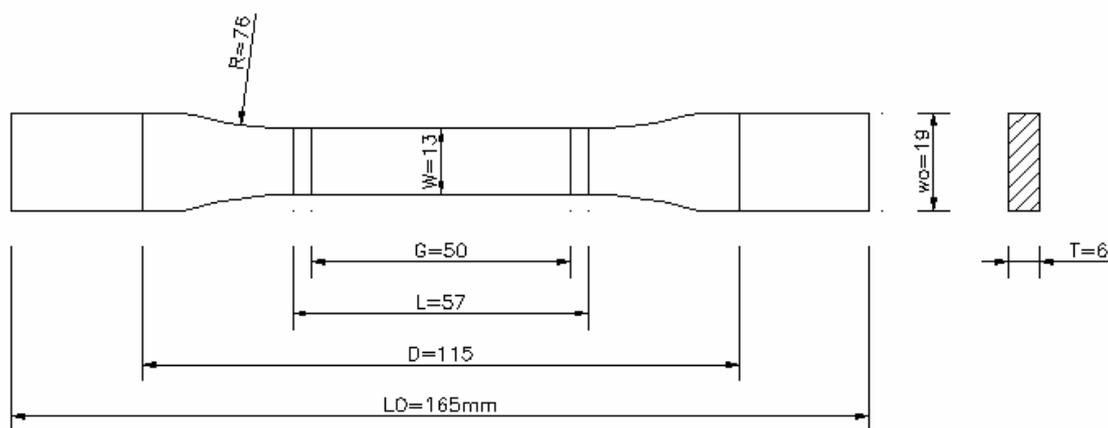


FIGURA 61 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de tração.
Fonte: Desenho realizado conforme a norma ASTM D 638 - 90.

c) O número de corpos de prova

Com os tecidos do reforço alinhados a 45° com os fios da trama nas lâminas externas e a 90° com os fios da trama na lâmina interna, pode-se considerar o material quase isotrópico e, portanto, houve a necessidade de testar cinco corpos de prova de cada amostra [item 8 – Número de corpos de prova para teste (*Number of Test Specimens*), pág. 162 da norma].

3.2.2.2 O ensaio de compressão

a) A norma

A norma utilizada para a realização deste ensaio foi a **D 695 - 90 – STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE PROPERTIES OF RIGID PLASTICS** (Método de teste padrão para determinação das propriedades de compressão de plásticos rígidos) da *ASTM*. Esta norma determina as propriedades mecânicas quanto à compressão de plásticos rígidos reforçados e não reforçados.

b) As dimensões do corpo de prova

As dimensões dos corpos de prova foram determinadas segundo o sub-item 6.2 da norma, na pág. 196, onde o corpo de prova deve ser um prisma reto onde o comprimento deva ser duas vezes sua largura, ou seja:

W (largura): 12.7mm;

L (comprimento): 25.4mm;

T (espessura): 12.7 mm.

Para obtenção dessa espessura foram coladas duas placas de 6mm cada com a resina de óleo de mamona.

Este corpo de prova está representado na FIG. 62.

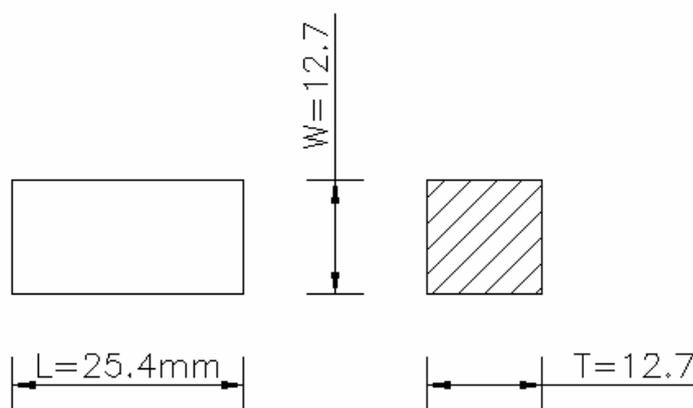


FIGURA 62 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de compressão.
Fonte: Desenho realizado segundo a norma ASTM D 695 - 90.

c) O número de corpos de prova

Com os tecidos do reforço alinhados a 45°, 90° e 45° com os fios da trama, pode-se considerar o material quase isotrópico e, portanto, houve a necessidade de testar cinco corpos de prova de cada amostra [item 8 – Número de corpos de prova para teste (*Number of Test Specimens*), subitem 8.1, pág. 197 da norma].

3.2.2.3 O ensaio de flexão

a) A norma

A norma utilizada para a realização deste ensaio foi a **D 790M - 86 – STANDARD TEST METHODS FOR FLEXURAL PROPERTIES OF UNREINFORCED AND REINFORCED PLASTICS AND ELECTRICAL INSULATING MATERIALS [METRIC]** (Métodos de teste padrões para

determinação das propriedades de flexão de plásticos reforçados e não-reforçados e materiais de isolamento elétrico) da *ASTM*. Estes métodos de teste cobrem a determinação de propriedades de flexão de plásticos reforçados e não-reforçados, incluindo compósitos de alto módulo e materiais de resistência elétrica na forma de barras retangulares moldadas diretamente ou cortadas de chapas, placas ou moldes. Estes métodos de teste são geralmente aplicados a materiais rígidos e semi-rígidos. O método de teste escolhido foi o sistema de carregamento por três pontos, utilizando um carregamento centralizado em uma viga simplesmente apoiada (Método de Teste I). O procedimento B foi escolhido por ser designado particularmente para materiais que apresentem grandes deflexões durante o teste, principalmente devido à lâmina central com a matriz de óleo de mamona.

b) As dimensões do corpo de prova

As dimensões do corpo de prova foram escolhidas segundo o item 6.3 Materiais termorrígidos laminados e materiais em lâminas e chapas para isolamento elétrico, incluindo fibras vulcanizadas e ligas de mica e vidro (*Laminated Thermosetting Materials and Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation, Including Vulcanized Fiber and Glass-Bonded Mica*) e de acordo com a tabela 1 para o método de teste I. A relação do vão do suporte pela espessura do corpo de prova deveria ser escolhida dentre as três proporções recomendadas: 16, 32 e 40 para 1. Como regra geral, uma proporção de 16 para 1 é satisfatória quando a proporção da resistência à tração pela resistência à

ruptura é menor que 8 para 1. Logo, pela Tabela 1 e relação $L / d = 16$ para 1 da norma, os corpos de prova tiveram as seguintes dimensões:

T (espessura): 6mm;

L (comprimento): 125mm;

W (largura): 10mm.

O vão do suporte foi de 96mm.

Este corpo de prova está representado na FIG. 63.

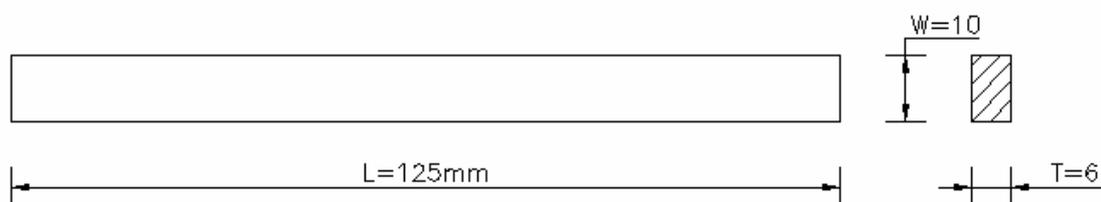


FIGURA 63 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de flexão.
Fonte: Desenho realizado segundo a norma ASTM D 790M - 86.

c) O número de corpos de prova

Com os tecidos do reforço alinhados a 45° , 90° e 45° com os fios da trama, pode-se considerar o material quase isotrópico e, portanto, houve a necessidade de testar cinco corpos de prova de cada amostra (item 7 – Número de corpos de prova para teste (*Number of Test Specimens*), subitem 7.1, pág. 284 da norma).

3.2.2.4 O ensaio de impacto Charpy

a) A norma

A norma utilizada para a realização deste ensaio foi a **D 5942 - 96 – STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING CHARPY IMPACT STRENGTH OF PLASTICS** (Método de teste padrão para determinação da resistência ao impacto Charpy de plásticos) da *ASTM*. Este método de teste é utilizado para determinar o comportamento de materiais de acordo com a energia exigida para rachar ou quebrar corpos de prova de plástico rígido sob condições definidas e para estimar a fragilidade e a rigidez dos corpos de prova dentro das limitações inerentes às condições de teste. Este método de teste é apropriado para ser aplicado em compósitos termoplásticos ou termorrígidos com reforços unidirecionais ou não, tais como, manta, tecidos, fios torcidos, reforços híbridos e fibra picotada. Aplicável também a materiais com camadas pré-impregnadas (*prepegs*). O teste consiste de um corpo de prova suportado como uma viga horizontal, sendo quebrado por um único balanço do pêndulo, com a linha de impacto centralizada entre os suportes.

b) As dimensões dos corpos de prova

As dimensões dos corpos de prova foram selecionadas considerando o item 6.3.2 Materiais que apresentam fratura de ruptura interlaminar (por exemplo, materiais reforçados por fibras longas) (*Materials Exhibiting Interlaminar Shear Fracture*), na pág. 6 da norma e seus sub-itens. Os corpos de prova não são

entalhados e do tipo 3 da Tabela 4 Designações do método, tipos de corpos de prova, tipos entalhados e dimensões do entalhe – Materiais que apresentam fratura de ruptura interlaminar (*Method Designations, Specimen Types, Notch Types, and Notch Dimensions – Materials Exhibiting Interlaminar Shear Fracture*). Nos testes normais à superfície a largura dos corpos de prova deve ser de 15mm por se tratar de um material reforçado por tecido com estrutura larga (subitem 6.3.2.2) e nos testes paralelos ao perfil, as dimensões dos corpos de prova perpendicular à direção do impacto deve ser a espessura do laminado de onde os corpos de prova foram cortados (subitem 6.3.2.3). O comprimento do corpo de prova deve ser 11 vezes a espessura, ou seja, já que a espessura é de 6mm, o comprimento do corpo de prova será 66mm, segundo a tabela 2 Tipos de corpos de prova, Dimensões e Vão (*Specimen Types, Dimensions, and Span*), na pág. 5 da norma. E nesta mesma tabela, temos o tamanho do vão do ensaio que é 6 vezes a espessura do corpo de prova, ou seja, 36mm. Concluindo, as dimensões dos corpos de prova foram:

Largura: 15mm;

Comprimento: 66mm e

Espessura: 6mm.

Este corpo de prova está representado na FIG. 64.

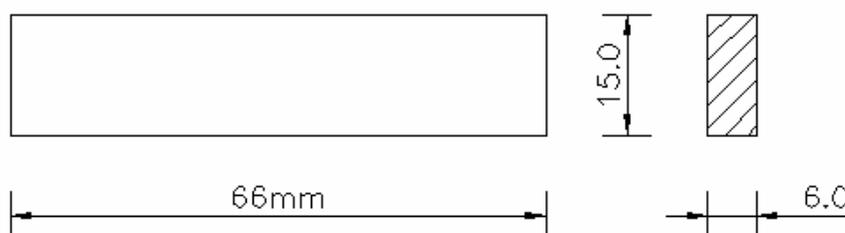


FIGURA 64 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de impacto Charpy.
Fonte: Desenho realizado segundo a norma ASTM D 5942 - 96.

c) O número de corpos de prova

Os laminados foram testados nas direções paralela e normal num total de 10 corpos de prova para cada direção.

3.2.2.5 O ensaio de impacto por queda de dardo

a) A norma

A norma utilizada para a realização deste ensaio foi a **D 5628 - 96 – STANDARD TEST METHOD FOR IMPACT RESISTANCE OF FLAT, RIGID PLASTIC SPECIMENS BY MEANS OF A FALLING DART (TUP OR FALLING MASS)** [Método de teste padrão para resistência ao impacto de corpos de prova em placas de plástico rígido por queda de dardo (martetele ou massa em queda)] da *ASTM*.

Esta norma engloba a determinação de diversos materiais de acordo com a energia requerida para a quebra de corpos de prova de plásticos rígidos e lisos sob diversas condições específicas de impacto de um dardo em queda livre. Neste ensaio é permitido que um dardo caia diretamente sobre o corpo de prova. Este dardo pode ter uma massa fixa e ser atirado de várias alturas ou ter uma massa ajustável e ser atirado de uma altura fixa.

b) Os corpos de prova

Para a escolha do tipo de corpo de prova, inicialmente, foi considerado o tipo de dardo a ser utilizado. A norma referencia que devido à natureza do teste de impacto, a seleção de um dardo deve ser arbitrária. Foi escolhido o tipo da *Fig. 1 (d)*, classificado com **FD**, na pág. 2 da norma. Após esta escolha, na Tabela 2 Tamanho mínimo dos corpos de prova (*Minimum Size of Specimen*), na pág. 6 da norma, obtivemos o tamanho mínimo do corpo de prova, que é 89 x 89mm (seção quadrada). A espessura foi de 6mm. Este corpo de prova está representado na FIG. 65.

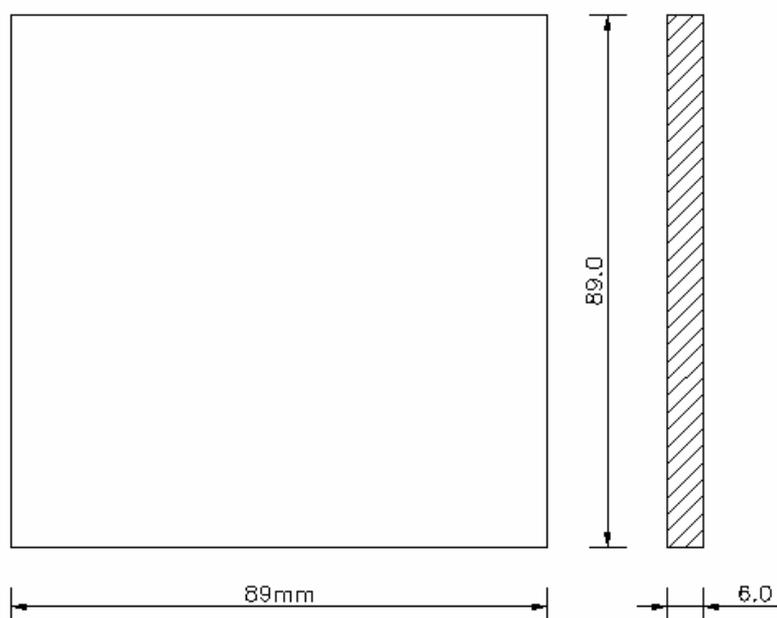


FIGURA 65 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de impacto por queda de dardo.
Fonte: Desenho realizado segundo a norma ASTM D 5628 -96.

c) O número de corpos de prova

Um total de 20 corpos de prova foi testado segundo o subitem 10.3 da norma.

3.2.3 Quantificação de material segundo os ensaios mecânicos

Ao totalizar os corpos de prova pelos ensaios (TAB. 30), houve a necessidade de se fabricar 20 (vinte) placas de 200 x 200 x 6mm do compósito com os corpos de prova distribuídos segundo a FIG. 66. Foram marcados dois corpos de prova de compressão que foram colados para alcançar a espessura estabelecida pela norma. Essas placas foram pequenas também devido ao tamanho das placas da máquina de prensa que são de 100 x 200 mm, para que a força aplicada fosse mais uniformemente distribuída sobre as placas do compósito. Foi estabelecida a elaboração de 4 amostras constituídas de 5 placas cada uma.

TABELA 30

Totalização dos corpos de prova por ensaio

ENSAIO	NÚMERO DE CORPOS DE PROVA
Tração	- 5 CP's por amostra
Compressão	- 5 CP's por amostra
Flexão	- 5 CP's por amostra
Impacto Charpy	- 10 CP's na direção normal ao plano do laminado - 10 CP's na direção paralela ao plano do laminado
Impacto por queda de dardo	- 20 corpos de prova

Para avaliação da contribuição quanto às propriedades dos materiais constituintes do compósito, foram confeccionadas também 10 placas de 200 x 200 x 6mm somente da matriz de poliéster, 10 placas de 200 x 200 x 6mm da

matriz de poliuretano a base de óleo de mamona e mais 10 placas de 200 x 200 x 6mm da matriz híbrida (uma lâmina de 2mm de poliuretano a base de óleo de mamona entre duas lâminas de 2mm cada de poliéster, coladas pela poliuretano), para avaliar o efeito do reforço no compósito.

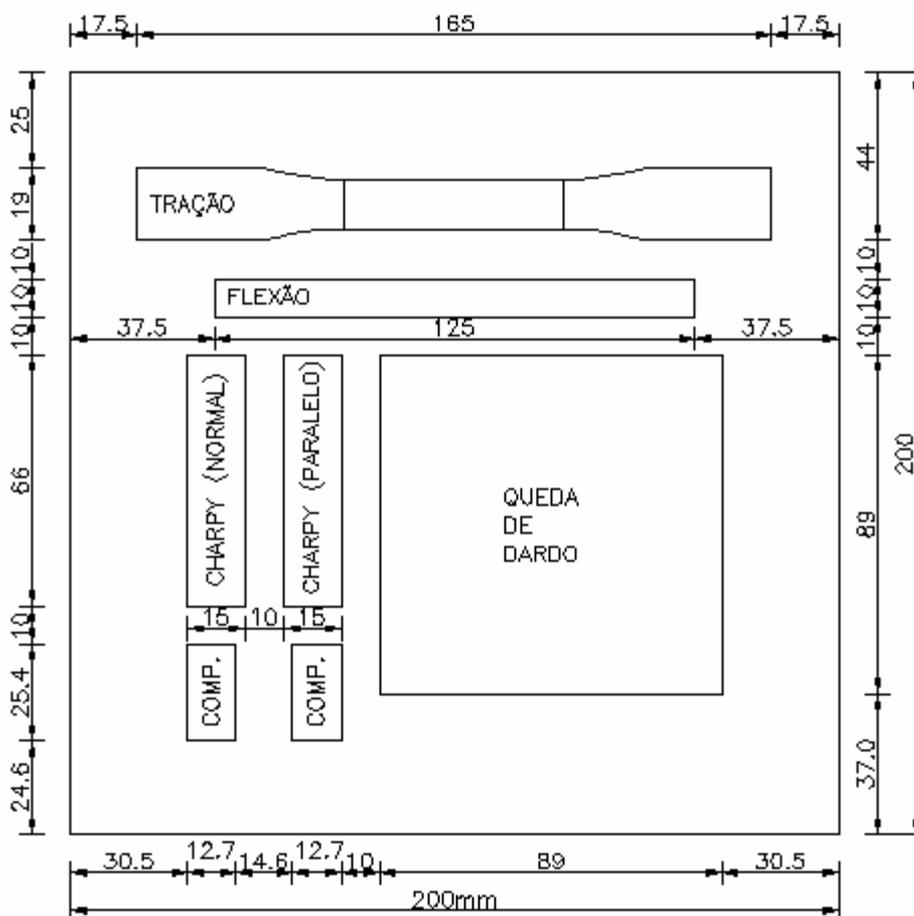


FIGURA 66 – Placa do compósito com a distribuição dos corpos de prova de tração, de compressão, de flexão, de impacto Charpy e de impacto por queda de dardo.

Com esse levantamento, pode-se estipular a quantificação de material necessária para esta pesquisa: 5 metros de tecido de fibra de juta F9, 10 kg da resina de poliuretano à base de óleo de mamona com catalizador e 10 litros da resina de poliéster cristal com 4 garrafas de 50g de catalizador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Preparação do compósito

4.1.1 Corte dos pedaços de tecido de juta e obtenção das massas respectivas

Foram cortados 20 pedaços de 200 x 200 mm a 90° com a direção dos fios da trama do tecido e 40 pedaços de 200 x 200 mm a 45° com a direção dos fios da trama do tecido, pois os compósitos foram constituídos de três lâminas, sendo que, as duas externas são de tecido de juta a 45° com aplicação de resina de poliéster e a lâmina interna de tecido de juta a 90° com aplicação de resina de poliuretano à base de óleo de mamona (FIG. 67).

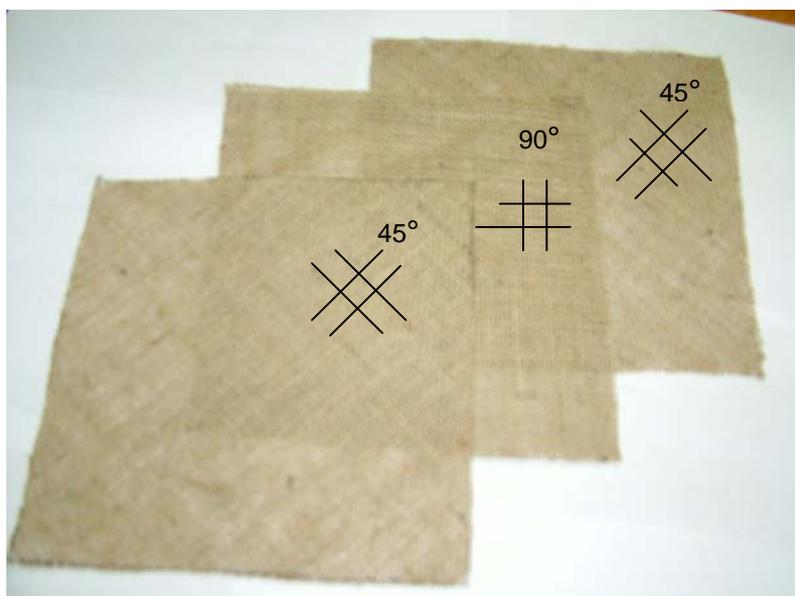


FIGURA 67 - Os três pedaços de tecido de juta do compósito: o interno, a 90° e, os externos, a 45° com os fios da trama do tecido.

Foi feita a separação dos pedaços de tecido de três em três (duas a 45° e uma a 90°) e os mesmos foram identificados e, obtidas as suas massas individualmente. Os resultados estão na TAB. 77, nas p. 253 e 254, no ANEXO A. Na TAB. 31 são apresentadas as médias aritméticas e os respectivos desvios padrões das massas dos pedaços de tecido de juta por amostra para cada direção da trama e a média aritmética e o desvio padrão das quatro amostras. Neste documento estão registrados apenas dados relativos as 20 placas utilizadas para os ensaios válidos, porém outras placas foram feitas para determinar a quantidade de resina para produção de 5 placas para constituir uma amostra e para realizar ensaios prévios para testar a garra da máquina universal e familiarização com os ensaios. Os pedaços de tecido a 90° foram identificados, com fita crepe e caneta, em 1, 2 até 20. Os dois pedaços de tecido repetidos a 45° foram identificados, com fita crepe e caneta, em 1 (a) e (b), 2 (a) e 2 (b) até 20 (a) e (b).

TABELA 31

Médias aritméticas e desvios padrões das massas dos pedaços de 200 x 200 mm do tecido de juta

AMOSTRA	TECIDO A 45°(a) (g)	TECIDO A 90° (g)	TECIDO A 45°(b) (g)
Amostra 1	12,666 ± 0,1048	11,712 ± 0,3947	12,042 ± 0,2837
Amostra 2	12,636 ± 0,2377	11,616 ± 0,3544	12,132 ± 0,4561
Amostra 3	12,498 ± 0,1532	12,334 ± 0,2172	12,09 ± 0,4045
Amostra 4	12,066 ± 0,3128	12,38 ± 0,6630	12,47 ± 0,3609
Das quatro amostras	12,4665 ± 0,2769	12,011 ± 0,3821	12,1835 ± 0,1944

4.1.2 Preparação das lâminas de tecido de juta a 90° com a resina de poliuretana a base de óleo de mamona

Foi feita a preparação das 20 placas de vidro temperado através da aplicação de cera desmoldante PVA com estopa. O excesso foi retirado, ficando apenas uma fina película de cera sobre as superfícies internas dos vidros. Após a secagem da cera, foram distribuídos sobre os vidros untados os 10 primeiros pedaços de tecido de juta a 90°.

A resina de poliuretana a base de óleo de mamona Rescon 301-40 foi misturada ao seu catalizador na proporção polioliol – prepolímero de 1:0,43, proporção pré-determinada pelo tipo de embalagem (FIG. 60, pág. 102). Duas embalagens foram despejadas numa base de garrafa PET (400 g) e misturadas, com um misturador plástico, por 10 minutos e, depois de homogênea, aplicada com trincha sobre 5 pedaços de tecido de juta e distribuída com o rolo com pressão manual (cada 200 g de resina deu para preparar 3 lâminas de tecido de juta com poliuretana, porém, como era desejada a preparação de 5 lâminas para constituir uma amostra, foram misturadas duas embalagens).

Após a aplicação da resina, as lâminas de tecido de juta com poliuretana foram prensadas entre as placas de vidro e deixadas curar por 24 horas. No outro dia, essas lâminas foram desformadas com a espátula (FIG. 68). Este processo foi repetido para preparação das outras 5 (cinco) lâminas. Depois da limpeza das placas de vidro e aplicação novamente da cera desmoldante de PVA, foram preparadas mais 10 (dez) lâminas para completar as 20 (vinte) lâminas de tecido de juta com a

resina de poliuretana. Ao todo, foram utilizadas 8 (oito) embalagens de 200 g (1,60 kg) de resina de poliuretana para fazer as 20(vinte) lâminas internas do compósito.



FIGURA 68 – Lâmina de tecido de juta a 90° com a resina de óleo de mamona.

Devido à presença de umidade nos tecidos de juta, houve uma reação química do isocianato da resina de poliuretana a base de óleo de mamona com a água presente no tecido, liberando, segundo Villar (2001), uréia e gás carbônico, provocando formação de bolhas, que expandiu a resina em espuma. A característica esponjosa foi desejada, tanto para melhorar a aderência entre as lâminas ao serem coladas, como também, para efeito acústico no painel, pois a presença de ar dificulta a passagem das ondas sonoras.

Essas lâminas foram devidamente identificadas com fita crepe e caneta em 1, 2 até 20 e delas foram obtida as massas que estão na TAB. 78, na p. 255, no ANEXO A. Na TAB. 32 são apresentados as médias aritméticas e os respectivos desvios padrões das massas das lâminas prontas de tecido de juta a 90° com

poliuretana a base de óleo de mamona por amostra e a média aritmética e o desvio padrão das quatro amostras.

TABELA 32

Médias aritméticas e desvios padrões das massas das lâminas prontas de tecido de juta a 90° com poliuretana a base de óleo de mamona

AMOSTRA	MASSA (g)
Amostra 1	45,296 ± 7,4407
Amostra 2	50,73 ± 2,7382
Amostra 3	55,082 ± 4,9421
Amostra 4	53,208 ± 2,4129
Das quatro amostras	51,079 ± 4,2474

4.1.3 Preparação das lâminas de tecido de juta a 45° com a resina de poliéster

Fez-se a preparação das 20 placas de vidro através da aplicação de cera desmoldante de PVA com estopa, igual ao processo de preparação do item anterior.

Após a secagem da cera, foram distribuídos, sobre os vidros untados, 5 pedaços de tecido de juta a 45°, identificados como (a) e 5 pedaços de tecido de juta a 45°, identificados como (b), para constituir, juntamente com as 5 lâminas de tecido de juta a 90° uma amostra.

A resina cristal de poliéster AM-100 AEROJET foi misturada ao seu catalizador MEK na quantidade de 2% sobre a quantidade de resina, proporção esta determinada pelo fabricante. Foram despejados 400 g da resina de poliéster em uma garrafa PET cortada, sobre a balança, acrescidos de 8 g do catalizador e misturados

até adquirir uma espessura tal qual uma goma. Antes de aplicar o poliéster sobre os pedaços de tecido, foram aplicadas finas camadas de resina de poliéster sobre as 5 placas de vidro untadas para garantir um bom acabamento em uma das faces da lâmina, que se apresentou externamente no compósito. Após 30 segundos, foram colocados os pedaços de tecido de juta sobre essa película de poliéster e, sobre os mesmos, aplicada a resina com trincha sobre cada pedaço de tecido (FIG. 69) e distribuída com o rolo com pressão manual (FIG. 70).

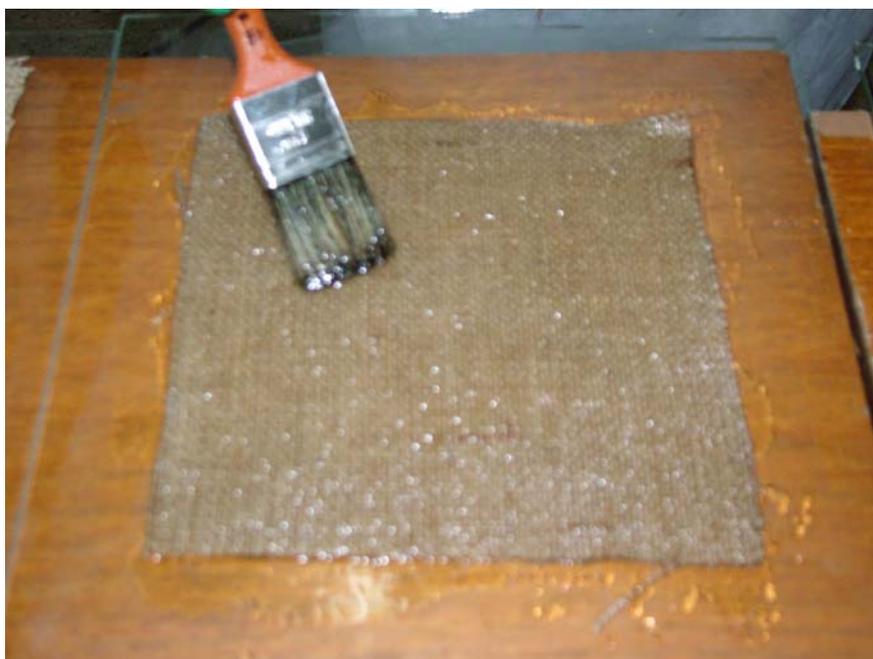


Figura 69 – Aplicação da resina de poliéster com trincha.

Após a aplicação da resina, as lâminas de tecidos de juta com poliéster foram prensadas entre as placas de vidro temperado e deixadas curar por 24 horas. No outro dia, essas placas foram desformadas com a espátula (FIG. 71). Cada 400ml de resina deu para preparar 5 lâminas de tecido de juta com poliéster. Depois o

processo foi repetido até serem obtidas as 40 lâminas desse tipo. Foram consumidos 3,6 kg de resina poliéster.



Figura 70 – Espalhamento da resina de poliéster com rolo para melhorar a molhabilidade do tecido.

Essas lâminas foram devidamente identificadas, com fita crepe e caneta, em 1 (a), 2 (a) até 20 (a) e 1 (b), 2 (b) até 20 (b) e foram obtidas suas respectivas massas. Essas massas estão na TAB. 79, na p. 256, no ANEXO A. Na TAB. 33 são apresentadas as médias aritméticas e os respectivos desvios padrões das massas das lâminas prontas de tecido de juta a 45°(a) e (b) com poliéster por amostra e a média aritmética e o desvio padrão das quatro amostras.



FIGURA 71 – Lâmina de tecido de juta a 45° com a resina de poliéster.

TABELA 33

Média aritmética e desvio padrão das massas das lâminas prontas de tecido de juta a 45° (a) e (b) com poliéster

AMOSTRA	A 45°(a) (g)	A 45°(b) (g)
Amostra 1	72,97 ± 5,8847	81,044 ± 4,3976
Amostra 2	73,074 ± 2,5977	74,06 ± 4,4861
Amostra 3	76,276 ± 5,0970	79,498 ± 6,6078
Amostra 4	76,782 ± 5,9015	80,104 ± 4,9344
Das quatro amostras	74,7755 ± 2,0357	78,6765 ± 3,1427

4.1.4 Montagem dos compósitos

Após as lâminas prontas individualmente, elas foram separadas três a três [uma lâmina de tecido de juta com poliuretano, uma lâmina de tecido de juta a 45° com poliéster (a) e uma lâmina de tecido de juta a 45° com poliéster (b)] e assim sucessivamente, para, posteriormente, serem coladas e constituir as placas do

compósito, respeitando as seqüências das lâminas (união das lâminas 1, das 2, das 3 até as das lâminas 20) (FIG. 72). Depois, as lâminas foram coladas com a resina de poliuretana para que os vazios das placas de tecido de juta e poliéster fossem preenchidos com esta resina, contribuindo para melhorias acústicas e de aderência. Para fazer 5 placas do compósito, foram misturadas duas embalagens de 200g cada (total de 400g) para serem aplicadas em cada face interna das lâminas a serem coladas. Esses compósitos foram preparados de 5 em 5, para constituírem cada grupo de 5 em uma amostra. Para a colagem das lâminas para constituir os compósitos foram consumidos 1,6 kg de resina de poliuretana. Após a colagem das lâminas, as placas do compósito foram colocadas, cada uma, entre duas pranchas de compensado de 30 x 30 cm e levados à máquina de prensa onde foram submetidas a uma pressão de 0,5 tonelada por 1 minuto para retirada do excesso de resina entre as lâminas e ajudar a aderência das mesmas. Essas placas do compósito (FIG. 73) foram devidamente identificadas, com caneta para retroprojeter, em 1, 2 até 20 e na TAB. 80, na p. 257, no ANEXO A, são apresentadas as massas das placas do compósito pronto. Na TAB. 34 são apresentadas as médias aritméticas e os respectivos desvios padrões das massas das placas do compósito por amostra e a média aritmética e o desvio padrão das quatro amostras. Dessas placas de compósito serão retirados corpos de prova para os ensaios de tração, compressão, flexão, Charpy e queda de dardo.



FIGURA 72 – As três lâminas prontas do compósito: a interna, de poliuretana e as duas externas, de poliéster.



FIGURA 73 – Compósito pronto.

TABELA 34

Médias aritméticas e desvios padrões das massas das placas do compósito

AMOSTRA	MASSA (g)
Amostra 1	216,136 ± 12,3314
Amostra 2	236,262 ± 19,3157
Amostra 3	237,206 ± 6,3741
Amostra 4	235,642 ± 14,4849
Das quatro amostras	231,3115 ± 10,1374

4.2 Preparação das matrizes de poliuretana a base de óleo de mamona

Foram feitas molduras de 200 x 200 mm de isopor de 10 mm, coladas e vedadas com fita crepe sobre 10 placas de vidro e aplicada com estopa uma fina camada de desmoldante de PVA. Na moldura de isopor foram marcadas as espessuras de 6mm, que equivalem à espessura do compósito final. Foram misturados 3 saches de resina com catalizador em uma base de garrafa PET (600 g) e depois, foram despejadas em 2 moldes, constituindo uma amostra (foram feitas 5 amostras com 2 placas de cada). Ao todo foram utilizadas 15 saches de resina (3 kg) para fazer as 10 placas para obtenção da matriz de 6mm para os ensaios de tração, compressão, queda de dardo e Charpy. Essas matrizes ficaram nos moldes por 24 horas e, posteriormente, foram desformadas com espátula (FIG. 74). Dessas placas de poliuretana serão retirados corpos de prova para os ensaios de tração, compressão, Charpy e queda de dardo.

As massas das placas de 200 x 200 x 6mm da matriz de poliuretana estão na TAB. 81, na p. 258, no ANEXO A. Na TAB. 35 estão as médias aritméticas e os desvios padrões das placas da matriz de poliuretana.



FIGURA 74 – Matriz de poliuretana a base de óleo de mamona.

TABELA 35

Médias aritméticas e desvios padrões das massas das placas de matriz de poliuretana

AMOSTRA	MASSA (g)
Amostra 1	275,395 ± 2,538513
Amostra 2	221,64 ± 60,82533
Amostra 3	172,94 ± 12,50165
Amostra 4	210,285 ± 55,26039
Amostra 5	168,585 ± 1,364716
Das cinco amostras	209,769 ± 43,30259

4.3 Preparação das matrizes de poliéster

Foram preparadas molduras iguais as do processo anterior e marcadas, também, as espessuras de 6 mm. Foram despejadas sobre a balança, em uma base de garrafa PET, 600 g de resina de poliéster, adicionados de 2% de catalizador (12 g) e misturados até a obtenção da consistência desejada. Essa quantidade deu para preparar 2 placas de matriz. Para fazer as 10 foram utilizadas 3 kg de poliéster e 60g de catalizador. Essas matrizes ficaram nos moldes por 24 horas e, posteriormente, foram desformadas com espátula (FIG. 75). Essas placas serão utilizadas para ensaios de tração, compressão, flexão, Charpy e queda de dardo.



FIGURA 75 – Matriz de poliéster.

As massas das placas de 200 x 200mm da resina de poliéster estão na TAB. 82, na p. 259, no ANEXO A. Na TAB. 36, estão as médias aritméticas e os desvios padrões das placas da matriz de poliéster.

TABELA 36

Médias aritméticas e desvios padrões das massas das placas de matriz de poliéster

AMOSTRA	MASSA (g)
Amostra 1	212,185 ± 21,51726
Amostra 2	220,93 ± 18,2575
Amostra 3	242,82 ± 14,96238
Amostra 4	220,04 ± 26,48822
Amostra 5	229,52 ± 38,15548
Das cinco amostras	225,099 ± 11,65466

4.4 Preparação das matrizes híbridas

As matrizes híbridas foram preparadas com duas lâminas de poliéster e uma de poliuretana a base de óleo de mamona, todas com 2 mm de espessura para alcançar a espessura do compósito, que é de 6 mm. Semelhante aos dos processos anteriores, foram feitos moldes com isopor e fita crepe sobre a superfície de vidro, porém as espessuras marcadas no isopor foram de 2 mm. Foram preparadas 20 lâminas de poliéster e 10 lâminas de poliuretana. O processo para obtenção das

lâminas de poliéster consistiu em preparar 5 lâminas de cada vez, porque a resina endurece rapidamente. Foi preparado 600 g de resina, com 12 g de catalizador e a mesma foi despejada dentro de 5 moldes sobre as placas de vidro. Houve a repetição da mesma quantidade de resina por três vezes, para preparar as 15 lâminas restantes, num total de 2,4 kg de resina de poliéster. Foram desmoldadas após 24 horas. Quanto as lâminas de poliuretana, no outro dia, foram despejados, numa base de garrafa PET, 3 saches (600 g) de resina com catalizador e misturada por 10 min, posteriormente despejadas em 5 moldes. Houve a repetição da mesma quantidade para obter as 5 lâminas restantes, num total de 1,2 kg de resina de poliuretana. Foram desmoldadas após 24 horas.

Para a montagem da placa de matriz híbrida, foram agrupadas 2 lâminas de poliéster e 1 de poliuretana, num total de 10 grupos (FIG. 76). Após isso, foi iniciado o processo de colagem das lâminas. Foram preparado 2 saches de 200 g de poliuretana (400 g) em uma base de garrafa PET e aplicado, com pincel, sobre a lâmina de poliéster. Houve a sobreposição da lâmina de poliuretana e sobre esta, aplicada a resina de poliuretana e posicionada a outra lâmina de poliéster. Com esta quantidade de resina foram preparadas 5 placas de matriz híbrida. Para fazer as 10 placas de matriz híbrida, foram consumidas 800 g de resina de poliuretana. Essas placas foram colocadas entre placas de compensado e, igualmente as placas do compósito, levadas à máquina de prensa onde foram submetidas a uma pressão de 0,5 tonelada por 1 minuto para retirada do excesso de resina entre as lâminas e ajudar a aderência das mesmas (FIG. 77).

As massas das placas de 200 x 200 x 6mm das matrizes híbridas estão na TAB. 83, na p. 260, no ANEXO A. Na TAB. 37 estão as médias aritméticas e os desvios padrões das placas da matriz híbrida.



FIGURA 76 – As três lâminas de 2mm para constituir a placa de matriz híbrida: a do meio é de poliuretana e as duas externas são de poliéster.



FIGURA 77 – Placa da matriz híbrida.

TABELA 37

Médias aritméticas e desvios padrões das massas das placas de matriz híbrida

AMOSTRA	MASSA (g)
Amostra 1	325,058 ± 48,96739
Amostra 2	326,4 ± 43,30009
Das duas amostras	325,729 ± 0,948937

4.5 Determinação da fração em massa de fibra e de matriz no compósito

A fração em massa da fibra e da matriz no compósito são determinadas pelas fórmulas:

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} \quad (4)$$

$$\text{e } m_m = \frac{M_m}{M_c} \quad (5)$$

Para uma placa de 200 x 200 x 6mm, os valores médios das massas foram os seguintes:

Do tecido de juta a 90°: 12,011g.

Do tecido de juta a 45°(a): 12,4665g.

Do tecido de juta a 45°(b): 12,1835g.

Do compósito: 231,3115g (M_c).

Da lâmina de PU + tecido a 90°: 51,079g.

Da lâmina de poliéster + tecido de juta a 45°(a): 74,7755g.

Da lâmina de poliéster + tecido de juta a 45°(b): 78,6765g.

A Massa de fibra é a somatória das massas dos tecidos:

$$M_f = 36,661\text{g}$$

Logo, a fração em massa de fibras é:

$$m_f = \frac{36,661}{231,3115} = 0,1585 \text{ ou } 15,85\% \text{ da massa do compósito.}$$

Como $m_f + m_m = 1$ ou 100% (3), a fração em massa da matriz híbrida é:

$$m_m = 0,8415 \text{ ou } 84,15\% \text{ da massa do compósito (} M_m = 194,6486\text{g).}$$

Como a massa da matriz híbrida é de 194,6486g e o compósito é constituído de três lâminas (PU+tecido de juta a 90° e duas de poliéster + tecido de juta a 45°), ao ser subtraída a parte dos tecidos de juta (36,661g), foi possível obter a proporção de PU e a de poliéster na matriz, considerando a porção de poliuretana que foi utilizada como material colante das lâminas:

$$194,6486 = (51,079 - 12,011) + (74,7755 - 12,4665) + (78,6765 - 12,1835) +$$

$$M_{\text{PU(colante)}}$$

$$194,6486 = 39,068 + 62,309 + 66,493 + M_{\text{PU(colante)}}$$

$$M_{\text{PU(colante)}} = 26,7786\text{g.}$$

Logo, as quantidades em massa de poliuretana e de poliéster na matriz híbrida (desprezando as bolhas de ar presentes no compósito) são:

$$M_{\text{PU}}: 65,8466\text{g (} 39,068+26,7786 \text{) [} 33,8284\% \text{ da massa da matriz híbrida (} M_m \text{)].}$$

$M_{\text{poliéster}}$: 128,802g (62,309+66,493) [66,1716% da massa da matriz híbrida (M_m)].

Então, a fração em massa de poliuretano e de poliéster no compósito corresponde, respectivamente, a:

$$m_{m(PU)} = \frac{M_{m(PU)}}{M_c} = \frac{65,8466}{231,3115} = 0,2847 \text{ ou } 28,47\% \text{ de } m_m$$

$$m_{m(\text{poliéster})} = \frac{M_{m(\text{poliéster})}}{M_c} = \frac{128,802}{231,3115} = 0,5568 \text{ ou } 55,68\% \text{ de } m_m$$

Ou seja, a fração em massa da matriz é constituída de:

$$m_m = 28,47\% \text{ de } PU + 55,68\% \text{ de } \text{poliéster}$$

4.6 Determinação da fração volumétrica de fibra e de matriz no compósito

A fração volumétrica de fibra e de matriz no compósito são determinadas pelas fórmulas:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (8)$$

$$\text{e } v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (9)$$

A correlação da massa e do volume é feita através da massa específica.

Logo:

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_f} \text{ e } \rho_m = \frac{M_m}{V_m} \quad (10)$$

As massas específicas médias são:

Da juta: $1,47\text{g/cm}^3$ (TAB. 2, p. 29).

Da resina RESCON 301-40: $1,05\text{ g/cm}^3$ (valor médio da TAB. 27, p. 103).

Da resina de poliéster AM-100: $1,1\text{g/cm}^3$ (valor médio da TAB. 29, p. 104).

Portanto:

$$V_f = \frac{36,661}{1,47} = 24,9395\text{cm}^3$$

$$V_m = V_{m(PU)} + V_{m(\text{poliéster})}$$

$$V_m = \frac{65,8466}{1,05} + \frac{128,802}{1,1} = 62,7110 + 117,0927$$

$$V_m = 179,8037\text{cm}^3$$

O volume do compósito é:

$$V_c = V_f + V_m \tag{6}$$

Só que:

$$V_m = V_{PU} + V_{\text{poliéster}}$$

Logo:

$$V_c = V_f + V_{PU} + V_{\text{poliéster}}$$

$$V_c = 204,7432\text{cm}^3$$

De posse do volume do compósito pode se determinar a fração volumétrica da fibra e a da matriz híbrida nesse compósito:

$$v_f = \frac{24,9395}{204,7432} = 0,1218 \text{ ou } 12,18\% \text{ do volume do compósito e}$$

$$v_m = \frac{179,8037}{204,7432} = 0,8782 \text{ ou } 87,82\% \text{ do volume do compósito, onde}$$

a fração volumétrica da matriz de poliuretana e de poliéster são:

$$v_{PU} = \frac{62,7110}{204,7432} = 0,3063 \text{ ou } 30,63\% \text{ do volume do compósito e}$$

$$v_{poliéster} = \frac{117,0927}{204,7432} = 0,5719 \text{ ou } 57,19\% \text{ do volume do compósito.}$$

Ou seja, a fração volumétrica da matriz é constituída de:

$$v_m = 30,63\% \text{ de PU} + 57,19\% \text{ de poliéster}$$

4.7 Marcação dos corpos de prova sobre as placas do compósito, da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster e da matriz híbrida

Os corpos de prova foram desenhados sobre um molde de papel cartão segundo a distribuição da FIG. 66 (p. 116). Com o molde vazado por estilete, houve a marcação dos corpos de prova sobre as 10 placas da matriz de poliuretana, sobre as 10 placas da matriz de poliéster, sobre as 10 placas da matriz híbrida e sobre as 20 placas do compósito (FIG. 78). Posteriormente, esses corpos de prova foram recortados com serra elétrica, foram classificados e separados em sacos plásticos identificados por material, por amostra e por ensaio (FIG. 79). E ao final, levados para a realização dos ensaios.

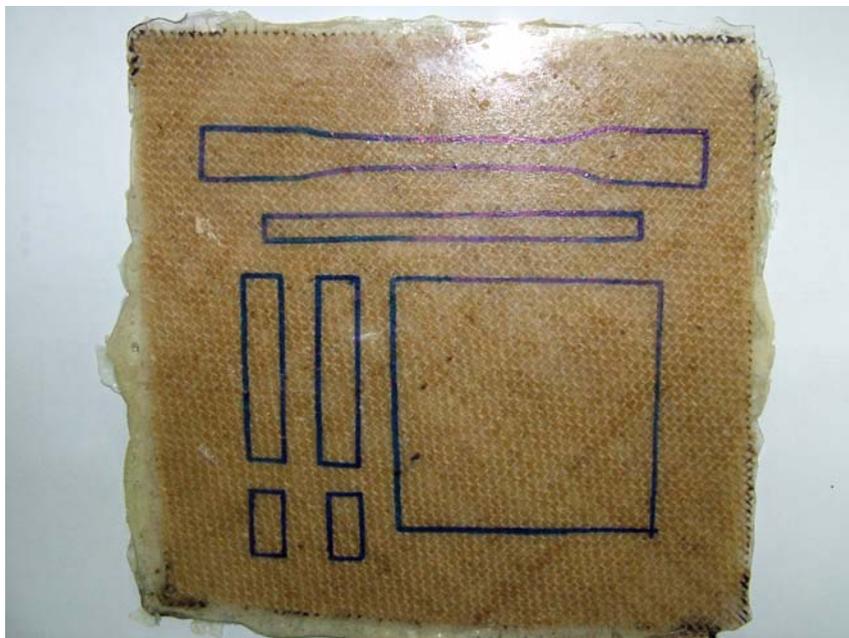


FIGURA 78 - Placa de compósito com a marcação dos corpos de prova.

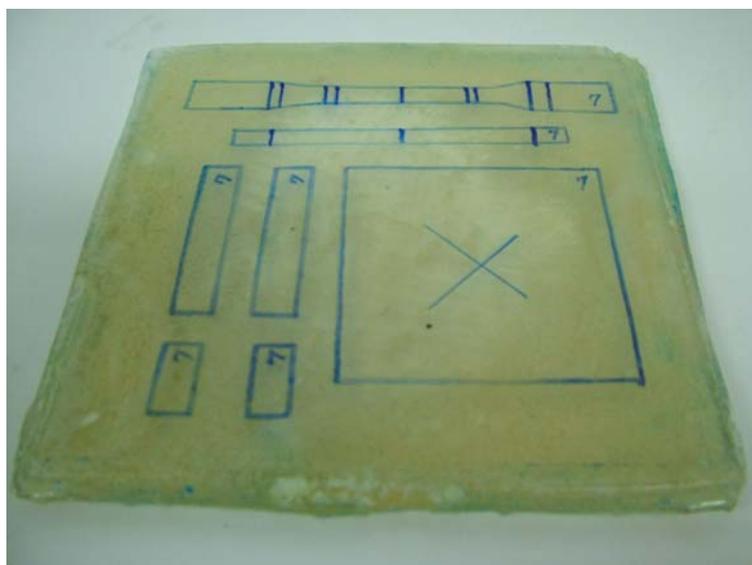


FIGURA 79 - Placa de matriz híbrida com a marcação e identificação dos corpos de prova. Foi marcado o centro do corpo de prova quadrado para o ensaio de impacto por queda de dardo.

4.8 Os ensaios de tração

Os ensaios de tração nos corpos de prova da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito foram realizados no laboratório do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPQD – em Campinas, São Paulo, em março de 2007. Os testes foram conduzidos a uma temperatura de 23°C e 55% de umidade relativa. Os extensômetros utilizados foram o E-10 para pequenas deformações (nos corpos de prova da matriz de poliéster e da matriz híbrida) e o E-20 para grandes deformações (nos corpos de prova da matriz de poliuretana e do compósito). Os ensaios de tração nos tecidos de juta foram realizados na máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL 2000, no programa TESC, versão 3.01, do laboratório de eco-compósito, no prédio do Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPa.

A velocidade do ensaio segundo a classificação rígido e semirígido, tipo de corpo de prova I, na Tabela 1 Designações para a velocidade de teste (*Designations for Speed of Testing*), subitem 8.1, pág. 163 da norma, foi de 5 mm/min. Na FIG. 80 estão apresentados os corpos de prova antes da realização dos ensaios.



FIGURA 80 – Corpos de prova de tração: (a) do compósito, (b) da matriz de poliéster, (c) da matriz de poliuretana e (d) da matriz híbrida.

4.8.1 Ensaio de tração nos corpos de prova da matriz de poliuretana

Para o ensaio de tração nos corpos de prova da matriz de poliuretana a célula de carga utilizada foi de 200kgf, com uma pré-carga de 1,00% e o extensômetro acoplado foi o E-20, usado para corpos de prova que apresentam grandes deformações.

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos bases, as forças máximas, os módulos de elasticidade, os limites de resistência e os alongamentos dos corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de tração estão na TAB. 84, na p. 261, no ANEXO B, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 85, na p. 263, também no ANEXO B. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade, através do programa de estatística SPSS, versão 13.0, e o GRAF. 20, na p. 262, no ANEXO B, mostra que nenhum valor deveria ser descartado, excetuando os

outros corpos de prova que tiveram problemas nos ensaios, principalmente de escorregamento da garra. Na TAB. 38 está o resumo desses resultados.

TABELA 38

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de tração

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
71,47 ± 33,03	1,18 ± 0,41	0,003 ± 0,00	45,98 ± 2,96	Dos cinco corpos de prova com ensaios válidos, um corpo de prova partiu em duas partes separadas no meio e os outros quatro partiram em duas partes separadas no limite do extensômetro

Na FIG. 81 está representado um corpo de prova da matriz de poliuretana após ser submetido ao ensaio de tração. No ensaio, foi observado que este material é bastante elástico e apresentou uma ruptura frágil, característica de material polimérico.

Na TAB. 39 estão os resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração na poliuretana a base de óleo de mamona.



FIGURA 81 – Corpo de prova n°2 da matriz de poliuretana após ensaio de tração: partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro.

TABELA 39

Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração na resina de poliuretana a base de óleo de mamona

PESQUISADORES	IDENTIFICAÇÃO DA RESINA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	ALONGAMENTO (%)
SILVA (2003)	Poliol n° 442 e pré-polímero n° 253, fornecido pelo GQATP (USP – São Carlos)	$2,00 \pm 0,14$	$40,00 \pm 2,30$	$9,80 \pm 3,49$
SILVESTRE FILHO (2001)	Poliol n° 471 e pré-polímero n° 329L, fornecido pelo GQATP (USP – São Carlos)	$0,70 \pm 0,00$	$41,50 \pm 0,30$	$8,70 \pm 0,20$

Pelos resultados da TAB. 39 foi possível observar que essas poliuretanas são mais rígidas, com alongamentos entre 8 a 10%, apresentando valores de módulos de elasticidade e de limites de resistência bem maiores do

que a utilizada neste estudo, que é uma poliuretana mais elástica. Isso é confirmado pelo alongamento desta poliuretana que foi de 45,98%.

4.8.2 Ensaio de tração nos corpos de prova da matriz de poliéster

Para o ensaio de tração nos corpos de prova da matriz de poliéster a célula de carga utilizada foi de 2000kgf, com uma pré-carga de 1,00% e o extensômetro acoplado foi o E-10, usado para corpos de prova que apresentam pequenas deformações.

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos bases, as forças máximas, os módulos de elasticidade, os limites de resistência e os alongamentos dos corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de tração estão na TAB. 86, na p. 264, no ANEXO B e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 87, na p. 266, no ANEXO B. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 21, na p. 265, no ANEXO B, mostra que nenhum valor deveria ser descartado, excetuando os outros corpos de prova que tiveram problemas nos ensaios, principalmente de escorregamento da garra. Na TAB. 40, está o resumo desses resultados.

Na FIG. 82 está representado um corpo de prova da matriz de poliéster após ser submetido ao ensaio de tração. Através do ensaio, foi observado que este material não é muito elástico (alongamento de 0,99%) e apresentou uma ruptura frágil, característica de material polimérico, semelhante a da matriz de poliuretana. O módulo de elasticidade e o limite de resistência deste material são bem maiores do que os da matriz de poliuretana.

TABELA 40

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de tração

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
1.392,57 ± 740,65	25,22 ± 14,14	2,62 ± 0,31	0,99 ± 0,60	Dos oito corpos de prova com ensaios válidos, um corpo de prova partiu em duas partes separadas no meio e os outros sete partiram em duas partes separadas no limite do extensômetro



FIGURA 82 – Corpo de prova n°1 da matriz de poliéster após ensaio de tração: partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro.

Na TAB. 41 estão os resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração em resina de poliéster. Pelos resultados nesta tabela, pode-se observar que as variações entre os mesmos dependem da formulação química de cada fabricante, mesmo sendo todas elas resinas ortofitálicas insaturadas e que a

resina utilizada nesta pesquisa ao se enquadrar nessa classificação, apresenta resultados quanto ao módulo de elasticidade que se assemelha a da resina utilizada na pesquisa de O'Dell, para um alongamento de 0,99%.

TABELA 41

Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração na resina de poliéster

PESQUISADORES	IDENTIFICAÇÃO DA RESINA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	RESISTÊNCIA (MPa)	ALONGAMENTO (%)
O'DELL (1997)	Ortofítica insaturada da Owens Corning, Inc	3,93	68,95	2,00
JOSEPH, MEDEIROS e CARVALHO (1999)	Resapol 10-225	1,36	34,80	2,07
ALBUQUERQUE <i>et al.</i> (1999)	Elekeiroz	0,68	46,10	7,96
ALBUQUERQUE <i>et al.</i> (1999)	Resana S.A.	0,81	38,10	5,98

4.8.3 Ensaio de tração nos corpos de prova da matriz híbrida

Para o ensaio de tração nos corpos de prova da matriz híbrida a célula de carga utilizada foi de 2000kgf, com uma pré-carga de 1,00% e o extensômetro acoplado foi o E-10, usado para corpos de prova que apresentam pequenas deformações.

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos bases, as forças máximas, os módulos de elasticidade, os limites de resistência e os alongamentos dos corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de tração estão na TAB. 88, na p. 267, no ANEXO B, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 89, na p. 269, no ANEXO B. Foi feita a validação dos

resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 22, na p. 268, no ANEXO B, mostra que nenhum valor deveria ser descartado, excetuando os outros corpos de prova que tiveram problemas nos ensaios, principalmente de escorregamento da garra. Na TAB. 42 está o resumo desses resultados.

TABELA 42

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de tração

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
1.064,36 ± 387,63	14,29 ± 4,77	1,33 ± 0,56	1,17 ± 0,49	Dos oito corpos de prova com ensaios válidos, um corpo de prova partiu em duas partes separadas no meio e os outros sete partiram em duas partes separadas no limite do extensômetro

Na FIG. 83 está apresentado um corpo de prova de matriz híbrida após ser submetido ao ensaio de tração. Por se tratar de uma matriz constituída de duas lâminas de poliéster e uma interna de poliuretana, as propriedades mecânicas que predominaram foram as da matriz de poliéster, porém diminuídas devido à influência da lâmina de poliuretana.



FIGURA 83 – Corpo de prova n°9 da matriz híbrida após ensaio de tração: partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro. As ranhuras nas extremidades foram feitas para melhorar a aderência para a garra não escorregar.

4.8.4 Ensaio de tração nos corpos de prova dos tecidos de juta

Foram realizados ensaios de tração no tecido de juta que constituiu o reforço do compósito. Eles foram feitos com o fio da trama do tecido a 45°, a 90° e com tecidos sobrepostos conforme estão dispostos no compósito: a 45° (externo), a 90° (a interna) e a 45° (externo). O objetivo destes ensaios foi para observar a contribuição de cada orientação de tecido (a 45° e a 90°) para o reforço, além de obter informações do reforço para verificar sua participação no compósito.

4.8.4.1 Ensaio de tração nos corpos de prova do tecido de juta a 45°

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos bases, as forças máximas, os módulos de elasticidade, os limites de resistência e os

alongamentos dos corpos de prova do tecido de juta com o alinhamento dos fios a 45° submetidos ao ensaio de tração estão na TAB. 90, na p. 270, no ANEXO B, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 91, na p. 273, no ANEXO B. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e os GRAF. 23 e 24, nas p. 271 e 272, no ANEXO B, mostram que os corpos de prova n^{os} 2 e 5 deveriam ser descartados. Na TAB. 43 está o resumo desses resultados.

Na FIG. 84 está um corpo de prova de tecido de juta a 45° após ensaio de tração. Pode ser observado que, pelo fato do tecido não estar alinhado com a direção dos esforços solicitantes neste tipo de ensaio, os fios romperam quase sem resistência e apresentaram um grande alongamento.

TABELA 43

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do tecido de juta a 45° submetidos ao ensaio de tração

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	ALONGAMENTO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
4,48 ± 0,96	0,30 ± 0,07	0,92 ± 0,01	41,46 ± 45,02	Dos cinco corpos de prova com ensaios válidos, em três, a fibra rompeu no meio do corpo de prova e em dois, a fibra rompeu no limite do extensômetro



FIGURA 84 – Corpo de prova nº 4 do tecido de juta com fios da trama a 45°: por não estarem paralelos à solicitação dos esforços apresentou pequena resistência à tração.

4.8.4.2 Ensaio de tração nos corpos de prova do tecido de juta a 90°

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos bases, as forças máximas, os módulos de elasticidade, os limites de resistência e os alongamentos dos corpos de prova do tecido de juta com o alinhamento dos fios a 90° submetidos ao ensaio de tração estão na TAB. 92, na p. 274, no ANEXO B, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 93, na p. 277, no ANEXO B. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e os GRAF. 25 e 26, nas p. 275 e 276, no ANEXO B, mostra que o corpo de prova nº5 deveria ser descartado. Na TAB. 44 está o resumo desses resultados.

TABELA 44

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do tecido de juta a 90° submetidos ao ensaio de tração

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	ALONGAMENTO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
160,73 ± 44,86	10,76 ± 3,01	93,69 ± 12,96	17,19 ± 2,01	Dos cinco corpos de prova com ensaios válidos, as fibras não romperam

Na FIG. 85 está um corpo de prova de tecido de juta a 90° após ensaio de tração. Pelo fato dos fios da trama do tecido estarem alinhados com a direção dos esforços solicitados, os corpos de prova não romperam, porém os fios certamente perderam a compactação. Ficou comprovado através do ensaio que os fios paralelos à solicitação dos esforços atuam efetivamente como reforço, porém seus fios transversais atuam desfavoravelmente quanto à tração.



FIGURA 85 – Corpo de prova n° 5 com tecido de juta com fios da trama a 90°: fios paralelos à solicitação dos esforços, atuam como reforço e os transversais, não.

Os corpos de prova com tecido a 90° apresentaram o limite de resistência e o módulo de elasticidade maiores que os corpos de prova com tecido a 45°, comprovado pelo menor alongamento.

4.8.4.3 Ensaio de tração nos corpos de prova do reforço

Para o ensaio de tração no reforço do compósito, os tecidos de juta foram sobrepostos conforme estão dispostos no mesmo (os dois externos com o tecido a 45° e o interno a 90°) e costurados nas extremidades para garantir a união dos tecidos.

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos bases, as forças máximas, os módulos de elasticidade, os limites de resistência e os alongamentos dos corpos de prova com tecidos de juta sobrepostos submetidos ao ensaio de tração estão na TAB. 94, na p. 278, no ANEXO B, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 95, na p. 280, no ANEXO B. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 27, na p. 279, no ANEXO B, mostra que o corpo de prova nº 3 deveria ser descartado. Na TAB. 45 está o resumo desses resultados.

Os corpos de prova do reforço não foram mais resistentes à tração do que os corpos de prova do tecido a 90°, porém apresentaram módulos de elasticidade muito maiores, com alongamentos menores.

Na FIG. 86 está um corpo de prova do reforço submetido ao ensaio de tração.

TABELA 45

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do reforço submetidos ao ensaio de tração

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	ALONGAMENTO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
77,48 ± 23,03	1,72 ± 0,51	155,55 ± 8,48	1,23 ± 0,23	Dos cinco corpos de prova com ensaios válidos, as fibras não romperam de quatro e romperam somente de um corpo de prova



FIGURA 86 – Corpo de prova nº 2 do reforço: essa sobreposição foi efetiva para melhorar o módulo de elasticidade do reforço.

Na TAB. 46 está o resultado de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração na fibra de juta e na TAB. 47 estão os resultados do ensaio de tração no tecido de juta a 45°, a 90° e no reforço obtidos nesta pesquisa.

TABELA 46

Resultado de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração na fibra de juta

PESQUISADOR	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	RESISTÊNCIA (MPa)	ALONGAMENTO (%)
MUELLER e KROBJILOWSKI (2003)	26,5	393-773	1,5-1,8

TABELA 47

Resultados do ensaio de tração nos tecidos a 45°, a 90° e no reforço

TECIDO	FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	ALONGAMENTO (%)
A 45°	4,48 ± 0,96	0,30 ± 0,07	0,92 ± 0,01	41,46 ± 5,02
A 90°	160,73 ± 44,86	10,76 ± 3,01	93,69 ± 12,96	17,19 ± 2,01
Reforço	77,48 ± 23,03	1,72 ± 0,51	155,55 ± 8,48	1,23 ± 0,23

Mesmo não podendo fazer uma comparação direta quanto à resistência à tração da fibra com a do tecido, pode-se observar pelas TAB. 46 e 47 que a fibra de juta é muito mais resistente do que o tecido constituído por ela, pois o tecido passou pelo processo de fiação, que incluíram torções nos fios e pela constituição da trama que não deixam os fios esticados, fatores estes que diminuem a resistência e o módulo do tecido em relação à resistência da fibra.

4.8.5 Ensaio de tração nos corpos de prova do compósito

Para o ensaio de tração nos corpos de prova do compósito a célula de carga utilizada foi de 200kgf, com uma pré-carga de 1,00% e o extensômetro

acoplado foi o E-10, usado para corpos de prova que apresentam pequenas deformações.

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos bases, as forças máximas, os módulos de elasticidade, os limites de resistência e os alongamentos dos corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de tração estão na TAB. 96, na p. 281, no ANEXO B, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 97, na p. 283, no ANEXO B. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 28, na p. 282, no ANEXO B, mostra que nenhum valor deveria ser descartado. Na TAB. 48 está o resumo desses resultados.

TABELA 48

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de tração

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
379,45 ± 102,68	6,95 ± 2,64	1,51 ± 0,17	0,73 ± 0,22	Dos seis corpos de prova com ensaios válidos, em três apareceram uma trinca em uma das lâminas de poliéster e juta e nos outros três, houve rompimento de uma lâmina externa de poliéster e juta e apareceu uma trinca no poliéster da lâmina oposta

A FIG. 87 mostra um corpo de prova do compósito com extensômetro sendo ensaiado quanto à tração e na FIG. 88 está um outro corpo de prova do

compósito após este ensaio. Nele apenas a lâmina externa de poliéster e juta a 45° foi rompida.

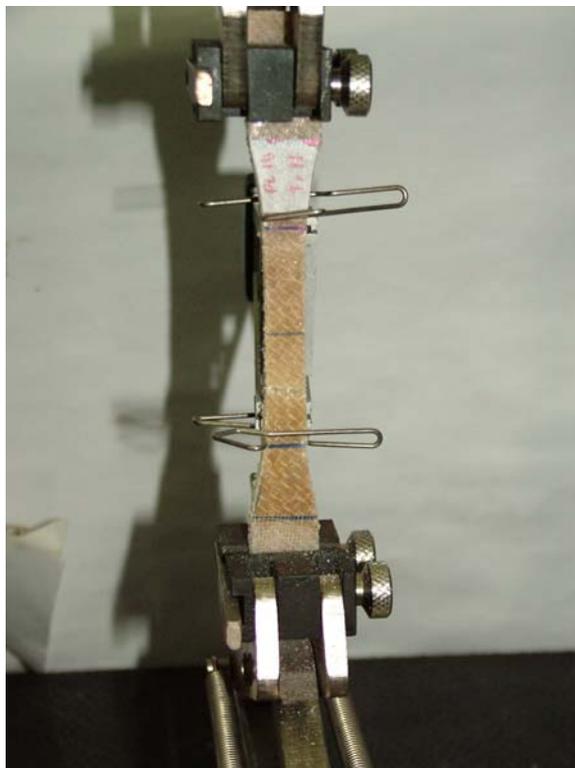


FIGURA 87 - Corpo de prova do compósito sob ensaio de tração com extensômetro.



(a)

(b)

FIGURA 88 – Corpo de prova n°15 do compósito após ensaio de tração: em (a) uma das lâminas externas e a interna não romperam e em (b) o rompimento de uma das lâminas externas de poliéster e juta.

Na TAB. 49 estão os resultados de alguns pesquisadores sobre compósitos que apresentaram algumas similaridades com o desta pesquisa.

TABELA 49

Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de tração em compósitos similares

PESQUISADORES	COMPÓSITO	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA EM FIBRA (%)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	ALONGAMENTO (%)
SILVA (2003)	Tecido de sisal não-tratado/PU	22	3,00	39,00	3,00
SILVA (2003)	Tecido de sisal tratado/PU	27	4,00	35,00	2,50
GOWDA <i>et al.</i> (1999)	Juta/poliéster	-	3,50 – 7,00	35,00 – 60,00	-
O'DELL (1997)	Manta de juta/poliéster (3 camadas)	10 a 15	3,69	45,81	-
CHAWLA e BASTOS (1979)	Juta/poliéster	30	-	125,00	-
SHAH e LAKKAD (1981)	Juta/poliéster	22	-	84,00	-
ALBUQUERQUE <i>et al.</i> (1999)	Fios de juta/poliéster Elekeiroz	10	0,80	49,00	6,31
		20	0,93	64,70	6,70
		30	0,93	62,80	6,64
ALBUQUERQUE <i>et al.</i> (1999)	Fios de juta/poliéster Resana	10	1,29	48,60	4,97
		20	1,39	63,70	6,00
		30	1,40	68,70	6,15

No compósito desta pesquisa a fração volumétrica de fibra foi de 12,18%, a fração da resina de poliuretana foi de 30,63% e a fração da resina de poliéster foi de 57,19%. A resistência à tração deste compósito foi muito inferior aos resultados dos compósitos das pesquisas da TAB. 49, porém o módulo de elasticidade foi significativo. Quanto à pesquisa de Silva com tecidos de sisal, esses valores superiores foram alcançados pela maior fração volumétrica de fibras nos compósitos e, também, pelo emprego de uma resina de poliuretana

mais resistente do que a utilizada nesta pesquisa. Em O'Dell, os resultados maiores foram devido a sobreposição de 3 camadas de manta. Em Albuquerque *et al.*, as resistências à tração foram maiores pelo emprego de fios de juta orientados na direção dos esforços, porém os módulos, foram até inferiores aos resultados desta pesquisa, mesmo com maiores frações volumétricas de fibra. Quanto às pesquisas de Gowda *et al.*, de Chawla e Bastos e de Shah e Lakkad não foi possível comparações mais diretas devido a serem dados obtidos de outras pesquisas, sem maiores informações.

4.8.6 Análise dos resultados dos ensaios de tração

O reforço do compósito foi constituído de dois tecidos externos com os fios da trama a 45° e um tecido interno com os fios da trama a 90°. A seguir, são apresentados as resistências à tração, os módulos de elasticidade e os alongamentos dos tecidos a 45°, do tecido a 90° e do reforço do compósito (com os tecidos sobrepostos) para análise da contribuição de cada disposição da trama para o reforço.

Os resultados quanto à resistência à tração (GRAF. 1), mostram que o tecido de juta a 45° apresentou a menor resistência do que o tecido a 90° e o reforço. Este fato é devido aos fios da trama não estarem orientados com a direção dos esforços solicitantes, enquanto que, o tecido de juta a 90°, por teve fios orientados com a direção dos esforços solicitantes, apresentou a maior resistência, apesar de conter fios transversais em sua trama, que em nada contribuem e inclusive, podem influenciar negativamente nos resultados. Quanto

ao reforço, a existência de duas lâminas a 45° influenciou para que sua resistência fosse menor do que a do tecido a 90°.

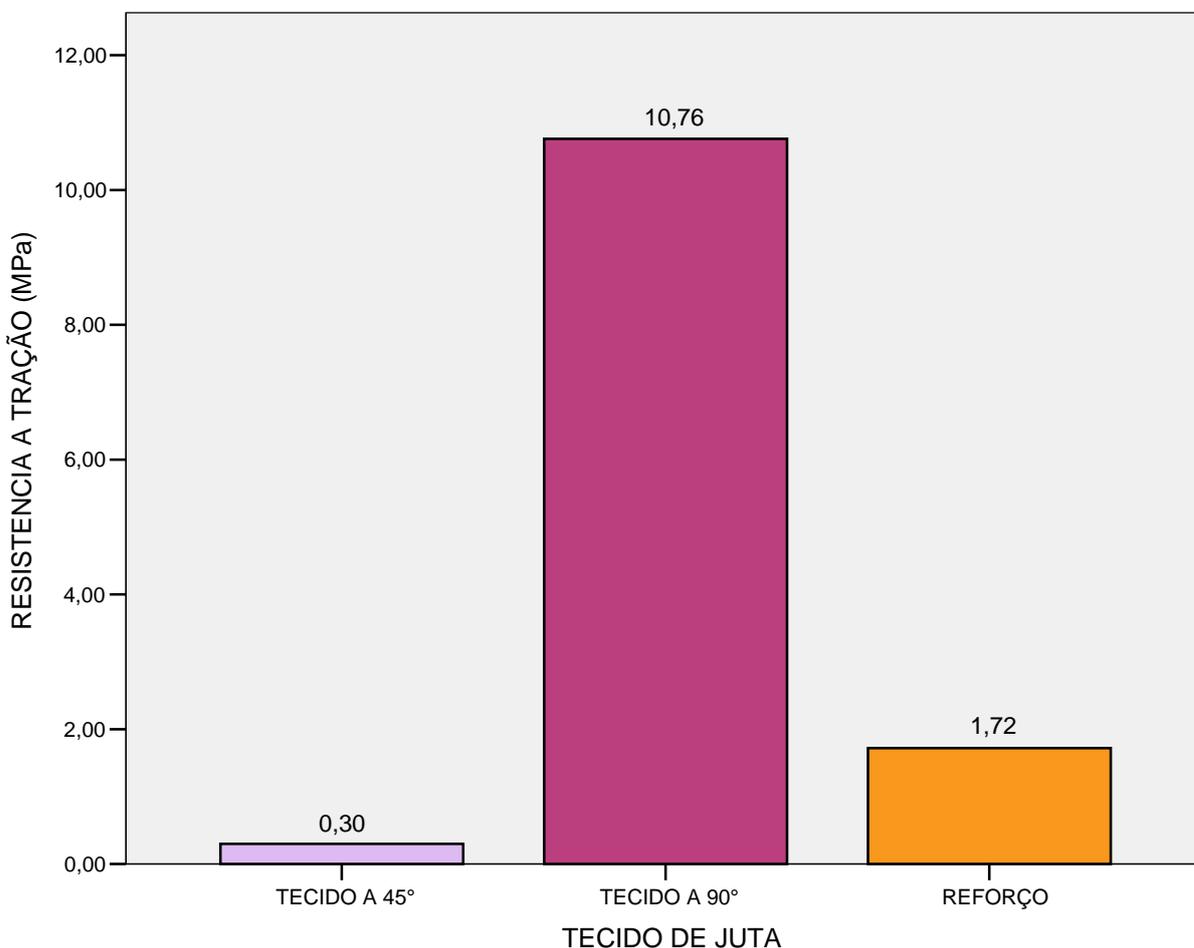


GRÁFICO 1 – Resistências à tração dos tecidos e do reforço: a melhor resposta foi a do tecido a 90°, por apresentar fios orientados na direção dos esforços solicitantes.

Quanto ao módulo de elasticidade (GRAF. 2), o tecido de juta a 90° apresentou módulo muito maior do que o do tecido a 45° e o reforço apresentou quase o dobro do módulo do tecido a 90°, comprovando que a sobreposição dos tecidos foi bastante eficaz quanto ao módulo, mesmo ele sendo constituído com apenas um tecido a 90° e com dois tecidos a 45°. O alongamento (GRAF. 3) através de valores inversos ao módulo de elasticidade, confirmou que o maior

alongamento foi o do tecido a 45°, seguido do tecido a 90° e o menor alongamento foi o do reforço. Quando esses tecidos foram reunidos no reforço, diferentemente do que ocorreu com o limite de resistência, o módulo foi muito superior aos dos tecidos separadamente, comprovado também, pelo menor alongamento.

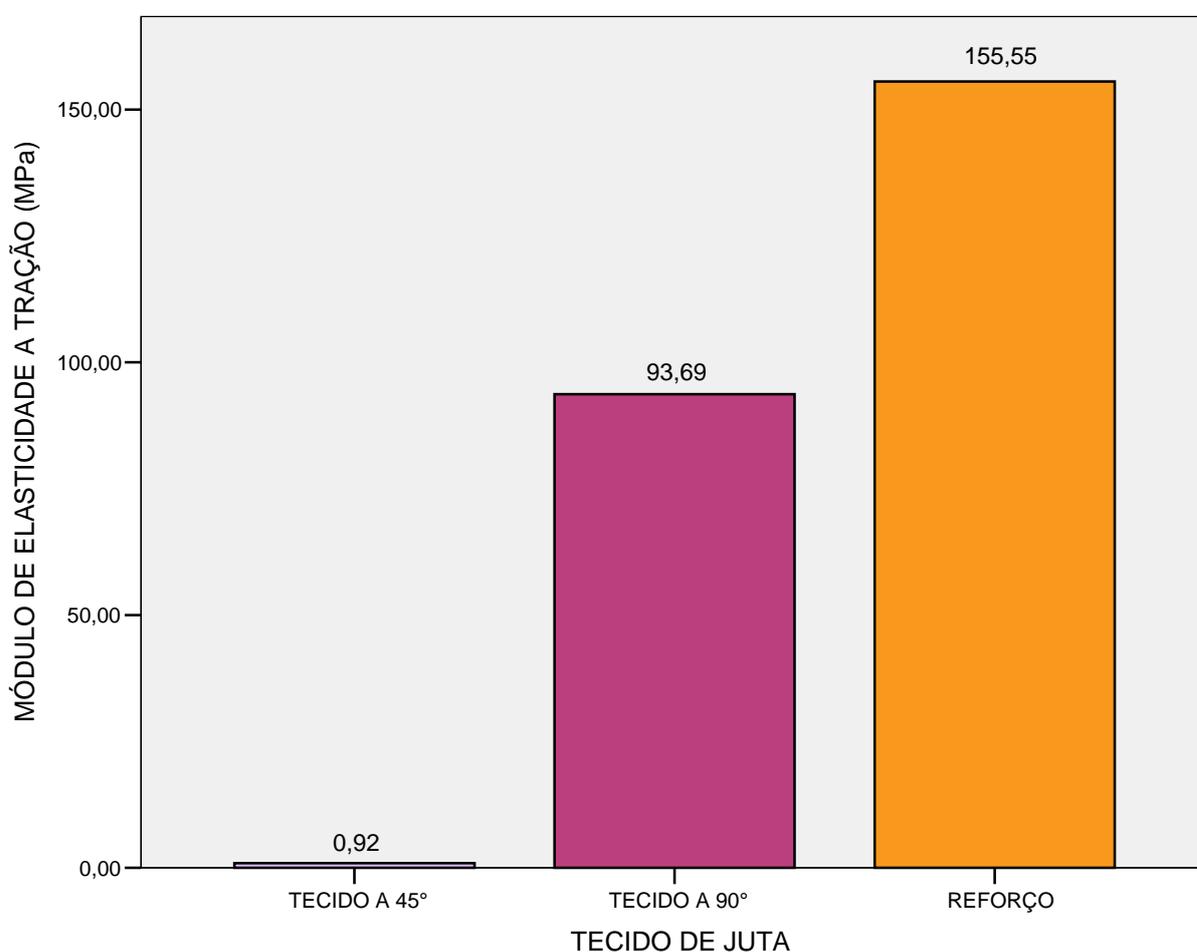


GRÁFICO 2 – Módulos de elasticidade à tração dos tecidos e do reforço: a sobreposição dos tecidos foi significativa para o resultado muito maior do reforço.

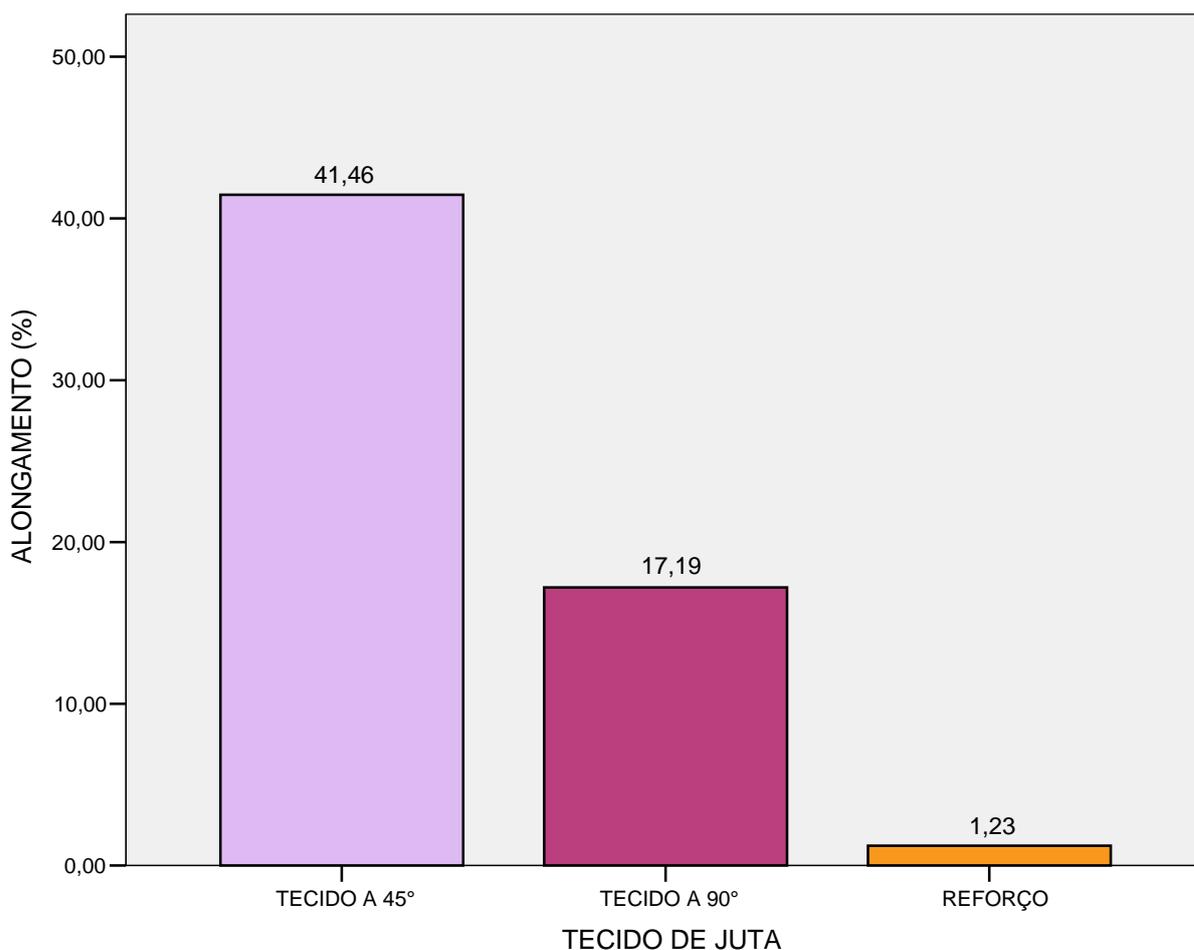


GRÁFICO 3 – Alongamentos dos tecidos e do reforço: o reforço apresentou o menor valor devido à sobreposição das três lâminas de tecido.

Após a análise do tecido de juta e comprovação, através dos ensaios de tração, de que a utilização dos tecidos de juta sobrepostos como reforço apresentou o melhor comportamento quanto a essa propriedade, segue a análise quanto às resistências à tração, aos módulos de elasticidade e os alongamentos dos materiais constituintes do compósito (da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do reforço) e da combinação desses materiais resultante no compósito.

Quanto à resistência à tração (GRAF. 4), a matriz de poliuretana apresentou o comportamento mais desfavorável em comparação aos demais

materiais e a matriz de poliéster apresentou o melhor comportamento. A matriz híbrida sofreu grande influência da lâmina interna de poliuretana, pois, apesar de ser constituída de duas lâminas externas de poliéster, essa matriz tem uma lâmina interna de poliuretana e, essas lâminas ainda são coladas com a resina de poliuretana. O reforço, por ser constituído de tecidos sobrepostos, não apresentou boa resistência à tração, portanto, sua existência como reforço no compósito não serviu para aumentar a resistência do mesmo, e sim, influenciou negativamente no compósito, reduzindo a metade a resistência à tração do compósito em relação a matriz híbrida.

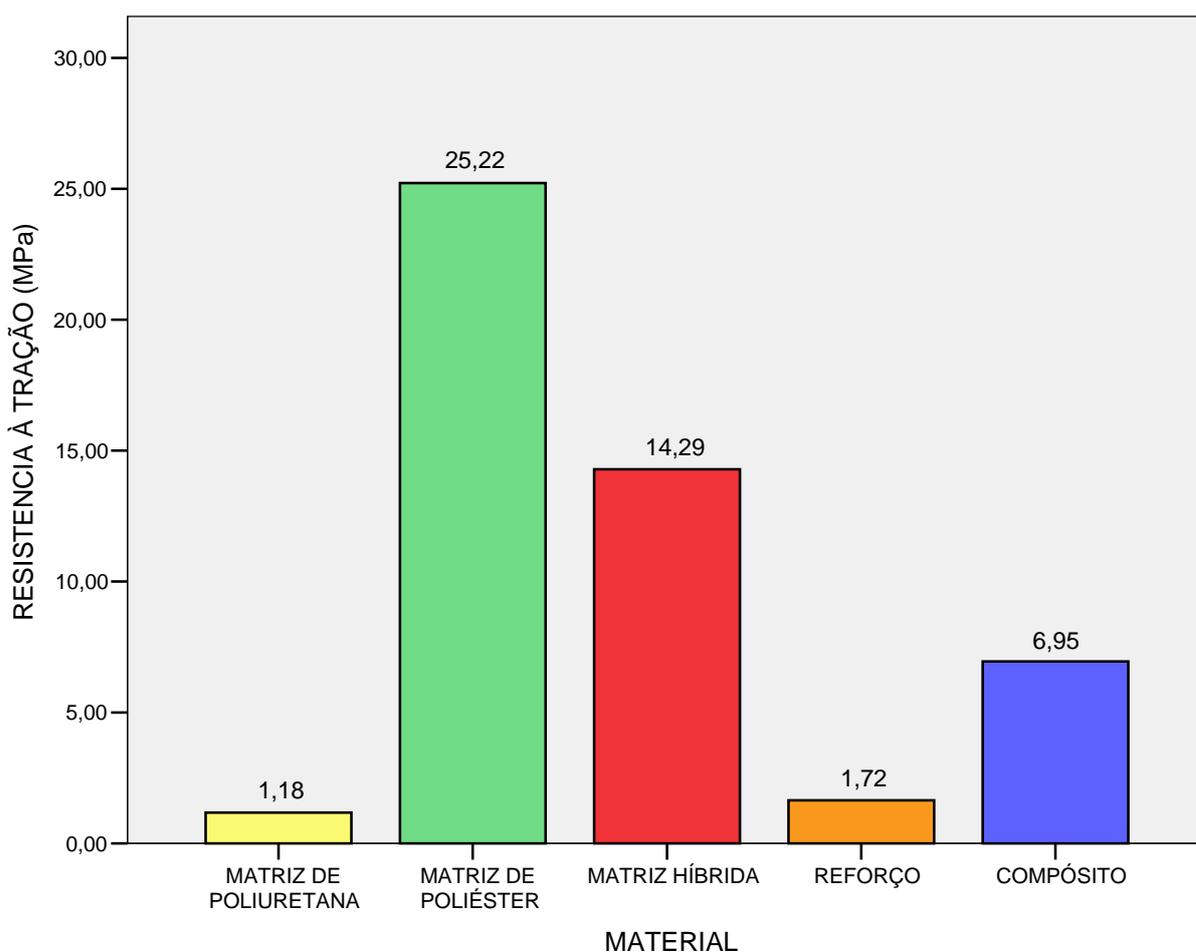


GRÁFICO 4 – Resistências à tração dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o reforço, ao ser inserido na matriz híbrida, não contribuiu para aumentar a resistência do compósito.

Quanto ao módulo de elasticidade à tração (GRAF. 5) e ao alongamento (GRAF. 6), a matriz híbrida, teve o seu módulo reduzido a metade da matriz de poliéster devido a presença da poliuretana. Porém, a introdução do reforço nessa matriz serviu para melhorar um pouco o módulo do compósito, pois o alongamento da matriz híbrida é semelhante ao da matriz de poliéster e ao da fibra. Pode-se observar que o compósito não sofreu muito a influência da matriz de poliuretana (de grande alongamento) e sim, muito mais da resina de poliéster e também, do reforço. Aqui, a inclusão do reforço na matriz híbrida contribuiu para melhorar o comportamento do compósito quanto ao módulo de elasticidade.

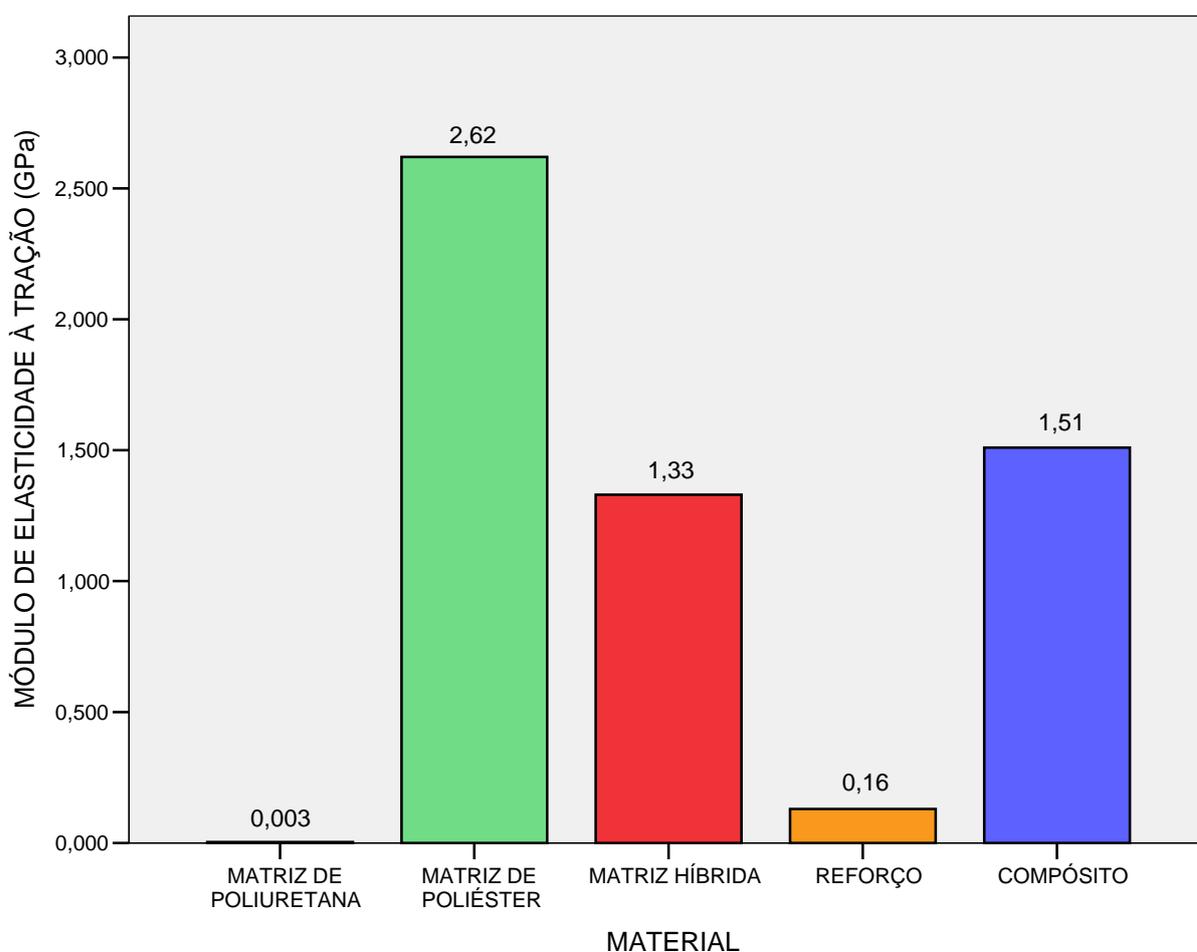


GRÁFICO 5 – Módulos de elasticidade à tração dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o reforço contribuiu para aumentar o módulo do compósito, em relação à matriz híbrida.

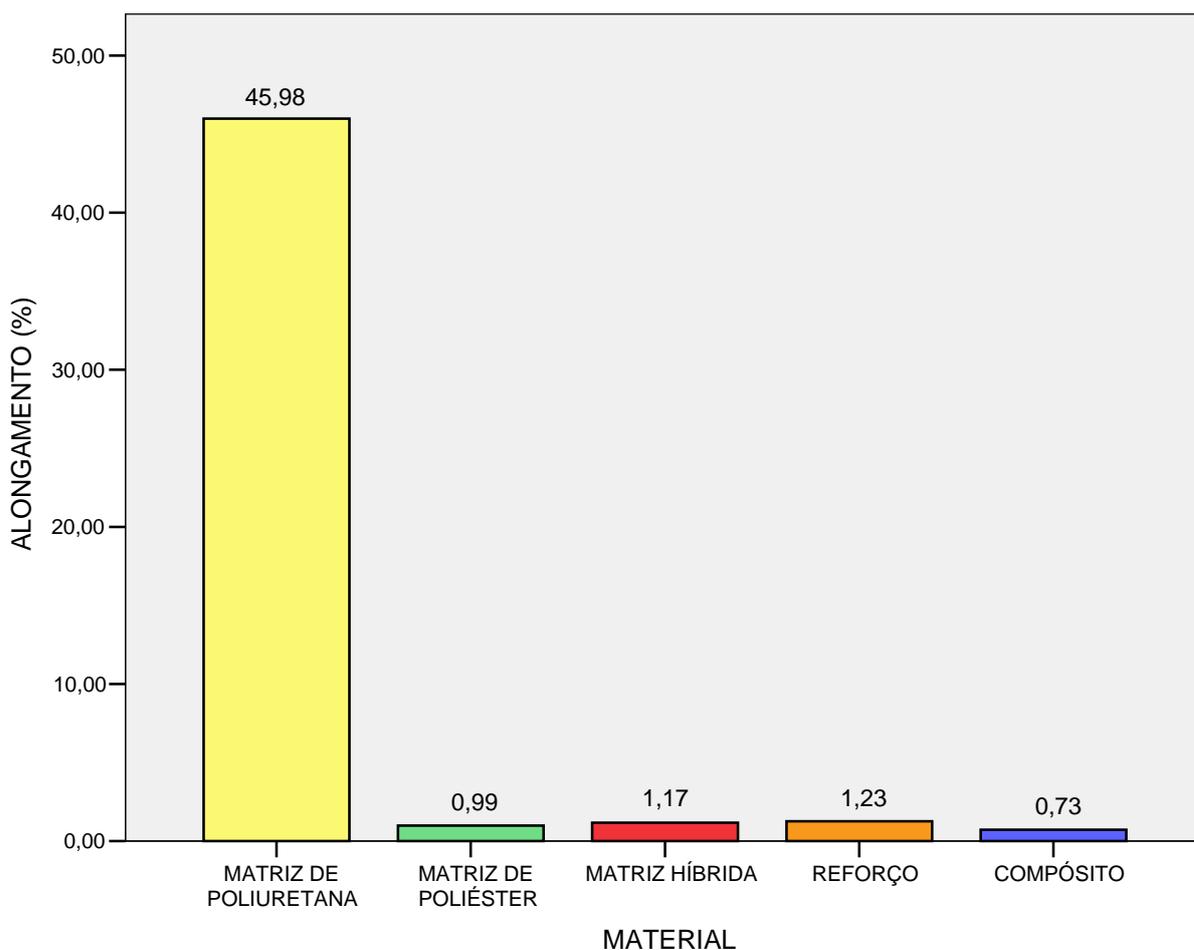


GRÁFICO 6 – Alongamentos dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o compósito foi fortemente influenciado pelos alongamentos da resina de poliéster e do reforço.

Os resultados confirmam que para as propriedades de módulo de elasticidade e de alongamento, os materiais apresentam comportamentos opostos: materiais com módulos de elasticidade pequenos têm alongamentos grandes. E quanto à resistência à tração, essa propriedade apresenta comportamento semelhante ao módulo de elasticidade, pois o aumento no módulo de elasticidade corresponde a um aumento na força por unidade de área para um deslocamento unitário.

Poderia ser esperado que a introdução do reforço na composição da matriz híbrida aumentaria bastante o módulo do compósito, o que não ocorreu. Alguns fatores podem ter interferido para que isso não acontecesse, tais como:

- o reforço em forma de tecido: sabe-se que fios orientados paralelos à direção da solicitação dos esforços são efetivos para aumentar a resistência à tração, já os não paralelos à direção do carregamento reduzem a resistência do compósito. Também, os fios que constituem esses tecidos não estavam retos e sim, sinuosos entre si para formar a trama, além das torções dos mesmos no processo de fiação, dificultando, desta forma, a transferência dos esforços. Os pontos de entrelaçamento dos fios podem ter dificultado tanto a transferência de carga entre fibra e matriz como a molhabilidade das fibras nesta região (esse tecido de juta apresenta trama bastante fechada), sendo que esses pontos de entrelaçamento atuam como concentradores de tensão. Outra consideração é o fato do tecido ser demasiadamente grosseiro. Talvez, a utilização de tecidos com fios mais finos garantiria um melhor resultado, devido ao aumento da razão de aspecto ou, então, a utilização de fibras longas orientadas paralelas à direção de solicitação (FIG. 89);

- O processo de fabricação do compósito: a não utilização de forno a vácuo (a cura foi na temperatura ambiente) e a fabricação de cinco placas ao mesmo tempo, fez com que o compósito liberasse, no processo de cura das resinas, bolhas de ar e muitas dessas bolhas ficaram aprisionadas também nas resinas. As placas foram retiradas da prensa antes da cura para permitir a prensagem de outra placa e, assim, as bolhas de ar não foram convenientemente retiradas (FIG. 89 e 90), constituindo pontos de concentração de tensão.

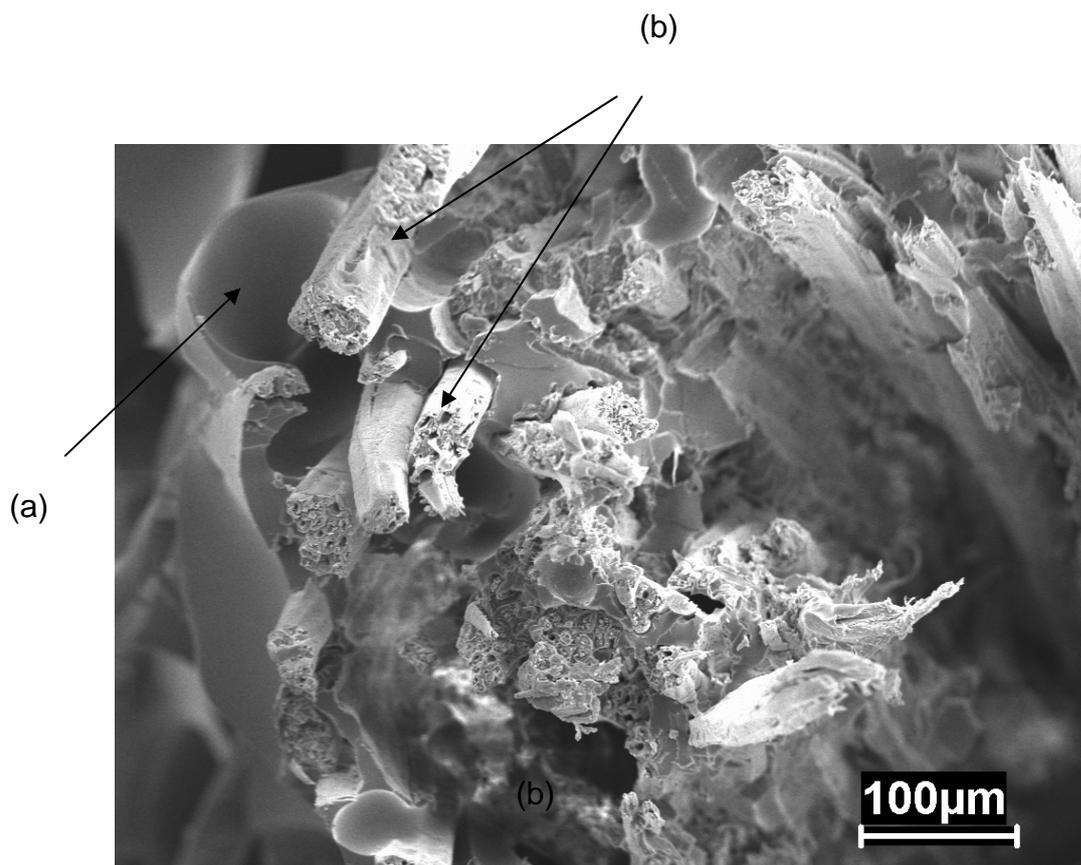


FIGURA 89 – Morfologia da fratura do corpo de prova do compósito submetido ao ensaio de tração: presença de bolhas de ar (a) e pobre molhabilidade das fibras, com extração de fibras da matriz (b).

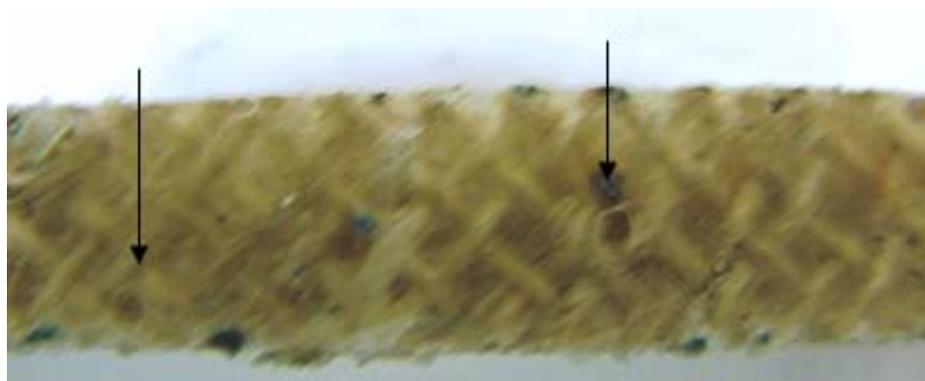


FIGURA 90 – Bolhas de ar na superfície do corpo de prova de tração: são pontos de concentração de tensão, que diminuem a resistência quando solicitados aos esforços. Nesta mesma figura pode-se observar o entrelaçamento dos fios para constituir o tecido de juta que também dificultam a transferência de esforços.

- A espessura da lâmina de poliéster: a resina de poliéster apresentou o melhor comportamento quanto à tração e ao módulo de elasticidade. A resistência à tração e o módulo do compósito foram influenciados pela presença de duas lâminas de poliéster e juta, o que ocorreu também com a matriz híbrida, porém, a quantidade dessa resina presente no compósito foi diferente da quantidade presente na matriz híbrida. As duas lâminas de poliéster no compósito tiveram menor espessura de resina de poliéster (o tecido de juta foi impregnado de resina de poliéster e depois, o excesso foi retirado com o rolo), já na matriz híbrida, as duas lâminas de poliéster foram mais espessas do que no compósito (2-2,5mm), fazendo com que a resistência à tração da matriz híbrida fosse maior do que no compósito. Porém, foi observado que quanto ao módulo de elasticidade, a diferença entre o compósito e a matriz híbrida foi muito pequena. Esse resultado talvez seja devido a presença, na matriz híbrida, de uma maior quantidade de resina de poliuretana na lâmina interna e na colagem das lâminas, resultando numa espessura de $\pm 3\text{mm}$, que pode ter sido efetivo para a diminuição da resposta da mesma quanto a essa propriedade e, de qualquer forma, o reforço também teve a sua contribuição, talvez pelo seu pequeno alongamento, no módulo do compósito.

Na TAB. 50 é apresentado um quadro que resume as propriedades à tração (resistência, módulo de elasticidade e alongamento) da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster, da matriz híbrida, do reforço e do compósito.

TABELA 50

Resumo dos resultados dos materiais ensaiados quanto à tração

MATERIAL	FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)
Matriz de poliuretana	71,47	1,18	0,003	45,98
Matriz de poliéster	1.392,57	25,22	2,62	0,99
Matriz híbrida	1.064,36	14,29	1,33	1,17
Reforço	77,48	1,72	0,16	1,23
Compósito	379,45	6,95	1,51	0,73

4.9 Os ensaios de compressão

Para o ensaio de compressão nos corpos de prova da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito a célula de carga utilizada foi de 3000kgf, com uma pré-carga de 10,00N.

Os testes foram conduzidos a uma temperatura de 23°C e 50% de umidade relativa e a velocidade do ensaio foi de 1,3 mm/min.

Na FIG. 91 estão os corpos de prova dos materiais que foram colados com a poliuretana e depois ensaiados.

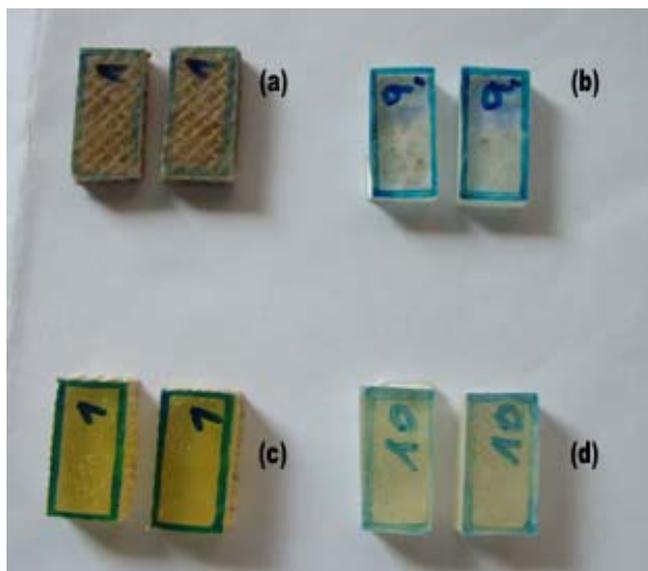


FIGURA 91 – As duas partes que foram coladas para obter a espessura do corpo de prova do ensaio de compressão: (a) do compósito, (b) da matriz de poliéster, (c) da matriz de poliuretana e (d) da matriz híbrida.

4.9.1 Ensaio de compressão nos corpos de prova da matriz de poliuretana

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos, as forças máximas, os módulos de elasticidade e os limites de resistência dos corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de compressão estão na TAB. 98, na p. 284, no ANEXO C, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 99, na p. 286, no ANEXO C. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 29, na p. 285, no ANEXO C, mostra que nenhum corpo de prova deveria ser descartado, excetuando três que deram problemas no ensaio (os n^{os} 1, 5 e 8). Na TAB. 51 está o resumo desses resultados e na FIG. 92 está a apresentação de um corpo de prova da matriz de poliuretana após ensaio.

TABELA 51

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de compressão

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
120,41 ± 34,57	0,90 ± 0,18	3,02 ± 0,53	41,66 ± 9,36	<ul style="list-style-type: none"> - Um corpo de prova foi separado em duas partes e escapuliu do equipamento - Três corpos de prova foram separados em duas partes, deformando e, após a retirada da força, as duas partes retornaram as suas formas originais - Cinco corpos de prova deformaram com a aplicação a força e, após a retirada da mesma, retomaram suas formas originais - Um corpo de prova não descolou, porém, partiu ao meio na sua dimensão paralela à força aplicada



FIGURA 92 - Corpo de prova n° 5 da matriz de poliuretana após ensaio de compressão: o corpo de prova não descolou, porém, partiu ao meio na sua dimensão paralela à força aplicada.

Mesmo não sendo a mesma formulação química, na TAB. 52 está o resultado de outra pesquisa quanto à compressão em uma resina de poliuretana a base de óleo de mamona.

TABELA 52

Resultado de outra pesquisa quanto ao ensaio de compressão na resina de poliuretana a base de óleo de mamona

PESQUISADORES	IDENTIFICAÇÃO DA RESINA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)
SILVESTRE FILHO (2001)	Poliol n° 471 e pré-polímero n° 329L, fornecido pelo GQATP (USP – São Carlos)	1,10 ± 0,00	45,60 ± 1,20

Através desta tabela, pode-se observar que a resina empregada por Silvestre Filho (2001) é muito mais resistente e apresenta um módulo de elasticidade à compressão também muito maior do que a empregada nesta pesquisa. Nas observações sobre os corpos de prova ensaiados verificou que o material é bastante elástico.

4.9.2 Ensaio de compressão nos corpos de prova da matriz de poliéster

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos, as forças máximas, os módulos de elasticidade e os limites de resistência dos corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de compressão estão na TAB. 100, na p. 287, no ANEXO C, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 101, na p. 289, no ANEXO C. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 30, na p. 288, no ANEXO C, mostra

que nenhum corpo de prova deveria ser descartado. Na TAB. 53 está o resumo desses resultados e na FIG. 93 está a apresentação de um corpo de prova da matriz de poliéster após ensaio.

TABELA 53

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de compressão

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
6.713,45 ± 1.917,96	56,64 ± 17,94	5,05 ± 0,78	63,2 ± 1,92	<ul style="list-style-type: none"> - Quatro corpos de prova foram separados em duas partes e tiveram um pedaço lascado - Dois corpos de prova foram quebrados em duas partes - Quatro corpos de prova foram quebrados em várias partes



FIGURA 93 - Corpo de prova nº 2 da matriz de poliéster após ensaio de compressão: o corpo de prova foi quebrado em várias partes.

4.9.3 Ensaio de compressão nos corpos de prova da matriz híbrida

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos, as forças máximas, os módulos de elasticidade e os limites de resistência dos corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de compressão estão na TAB. 102, na p. 290, No ANEXO C, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 103, na p. 292, no ANEXO C. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 31, na p. 291, no ANEXO C, mostra que nenhum corpo de prova deveria ser descartado. Na TAB. 54 está o resumo desses resultados e na FIG. 94 está a apresentação de um corpo de prova da matriz híbrida após ensaio.

TABELA 54

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de compressão

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
2.292,00 ± 1.835,97	11,20 ± 7,64	3,66 ± 0,73	54,57 ± 4,20	- Oito corpos de prova foram separados em duas partes somente - Dois corpos de prova foram quebrados em duas partes e uma delas foi partida em duas



FIGURA 94 - Corpo de prova n° 3 da matriz híbrida após ensaio de compressão: o corpo de prova foi separado em duas partes somente, na cola de poliuretano.

4.9.4 Ensaio de compressão nos corpos de prova do compósito

As larguras, as espessuras, as áreas, os comprimentos, as forças máximas, os módulos de elasticidade e os limites de resistência dos corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de compressão estão na TAB. 104, nas p. 293 e 294, no ANEXO C, e as observações sobre os mesmos estão na TAB. 105, nas p. 296, 297, 298 e 299, no ANEXO C. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 32, na p. 295, no ANEXO C, mostra que nenhum corpo de prova deveria ser descartado, excetuando os quatro que deram problemas nos ensaios (n^{os} 4, 7, 8 e 11). Na TAB. 55 está o resumo desses resultados. Na FIG. 95 é apresentado um corpo de prova do compósito sendo ensaiado e na FIG. 96, um corpo de prova após ensaio.

TABELA 55

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de compressão

FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
791,21 ± 235,92	4,90 ± 1,27	3,94 ± 0,60	54,84 ± 2,12	- 2 apresentaram delaminação total - 17 apresentaram delaminação parcial com trinca - 1 não apresentou delaminação (escorregou)

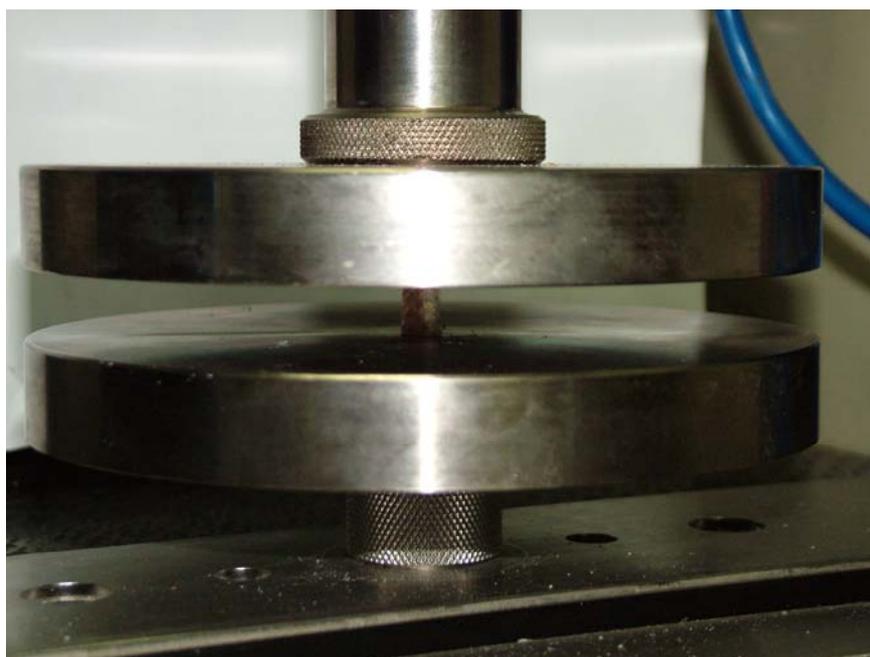


FIGURA 95 – Corpo de prova do compósito sendo submetido ao ensaio de compressão.



FIGURA 96 – Corpo de prova nº 2 do compósito após o ensaio de compressão: delaminações, rompimentos das lâminas de poliéster e juta e as lâminas de poliuretana e juta intactas.

4.9.5 Análise dos resultados dos ensaios de compressão

A seguir estão os gráficos comparativos quanto às resistências à compressão, aos módulos de elasticidade e as deformações da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito, respectivamente.

Quanto à resistência à compressão (GRAF. 7), a menor resistência foi da matriz de poliuretana e a maior foi da matriz de poliéster. A matriz híbrida, apesar de apresentar duas lâminas de poliéster, teve sua resistência diminuída devido à lâmina interna de poliuretana, cuja resistência em compressão foi muito baixa. O compósito teve sua resistência à tração quase igual à metade da resistência da matriz híbrida, ou seja, o acréscimo da fibra na matriz híbrida para sua constituição, interferiu negativamente quanto a essa propriedade,

funcionando mais como um defeito, do que como uma carga inerte, acrescido do fato de que a matriz híbrida apresentou resultado superior ao compósito devido também à espessura das lâminas de poliéster, que nessa matriz, são mais espessas do que no compósito. Esses valores apesar de maiores são bastante similares aos resultados quanto à resistência à tração desses mesmos materiais, pois para essas duas propriedades as respostas foram decrescentes da matriz de poliéster, seguida da matriz híbrida, depois do compósito e, por último, da matriz de poliuretana.

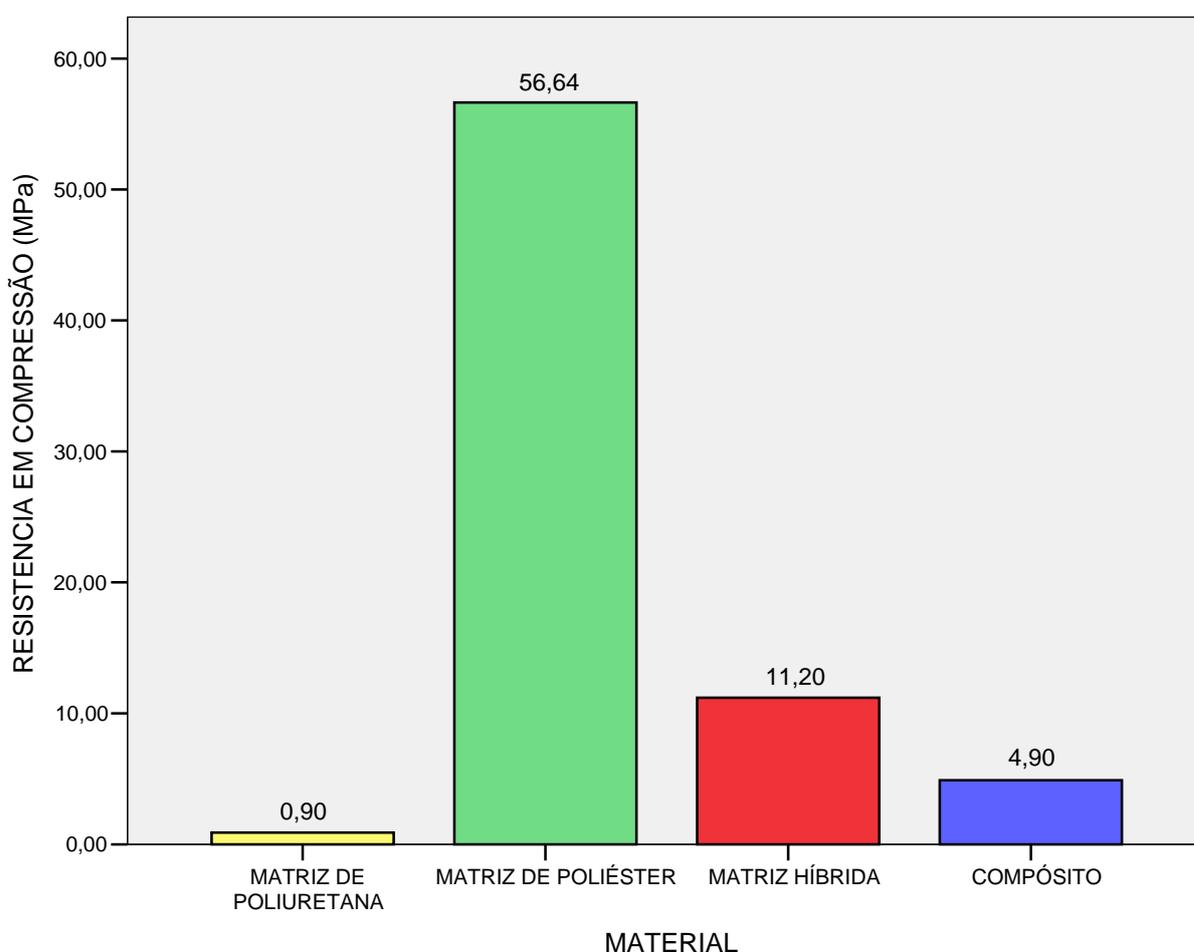


GRÁFICO 7 – Resistências à compressão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: a menor resistência foi da matriz de poliuretana e a maior resistência foi da matriz de poliéster. O compósito apresentou praticamente a metade da resistência da matriz híbrida, devido à fibra funcionar como um defeito.

Quanto ao módulo de elasticidade à compressão (GRAF. 8), os resultados foram bastante semelhantes, sendo que o da matriz de poliéster foi um pouco maior. A matriz híbrida teve seu módulo bastante influenciado pela lâmina interna de poliuretana e o compósito apresentou um módulo pouco maior do que a matriz híbrida, não pela existência da fibra em sua constituição, mas pelo fato de que a lâmina interna de poliuretana ser menos espessa do que na matriz híbrida. Os resultados dos módulos à compressão dos materiais foram bem menores do que os módulos de elasticidade à tração, excetuando os da matriz de poliuretana, que foram praticamente iguais.

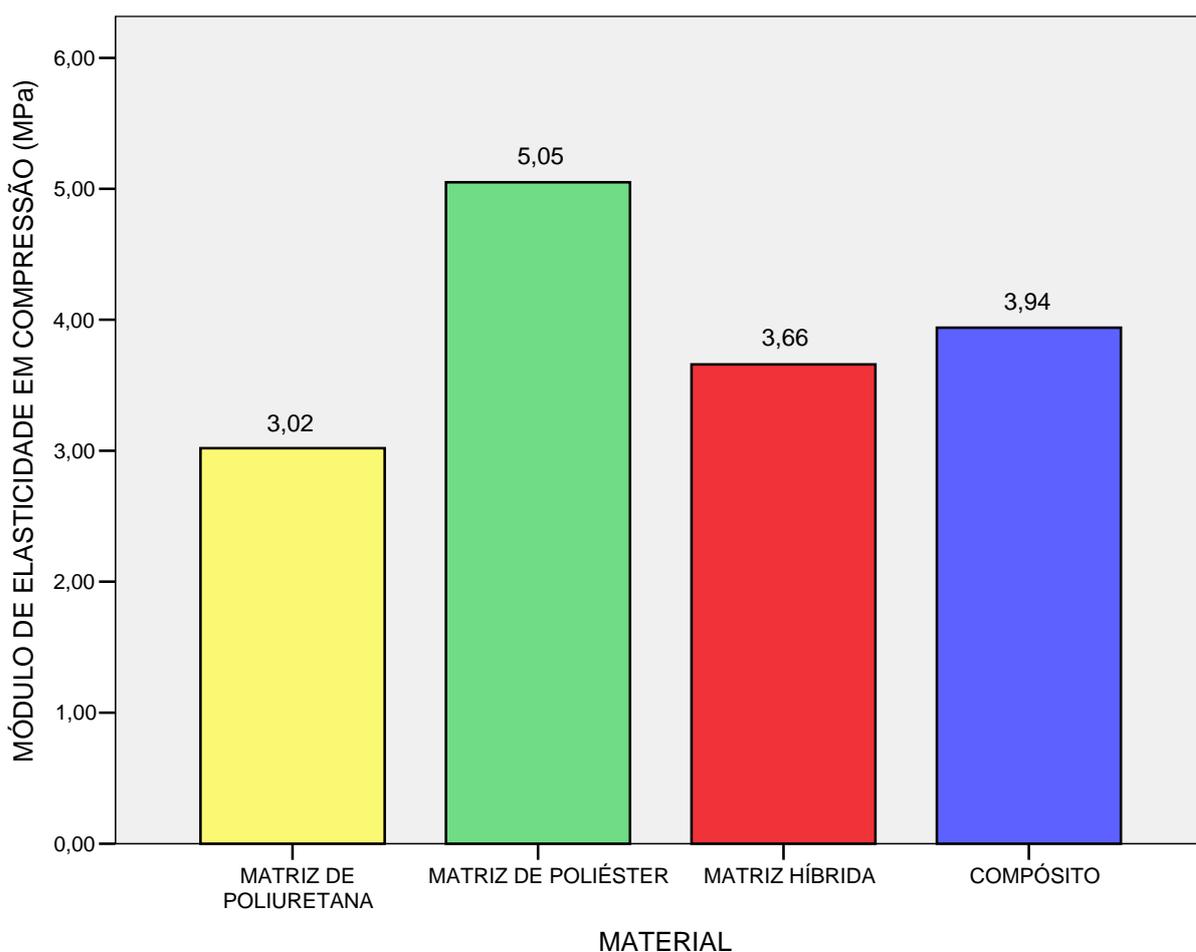


GRÁFICO 8 – Módulos de elasticidade à compressão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: foram bastante semelhantes, excetuando o da matriz de poliéster, que foi um pouco maior.

Quanto à deformação (GRAF. 9), poderia ser esperado que a deformação maior deveria ser da matriz de poliuretana, por ser um material mais elástico. Porém, esse mesmo material também é muito flexível e essa flexibilidade influenciou na medição de sua deformação. As deformações da matriz híbrida e do compósito foram quase iguais, demonstrando que a presença da fibra no compósito em nada interferiu nesses resultados.

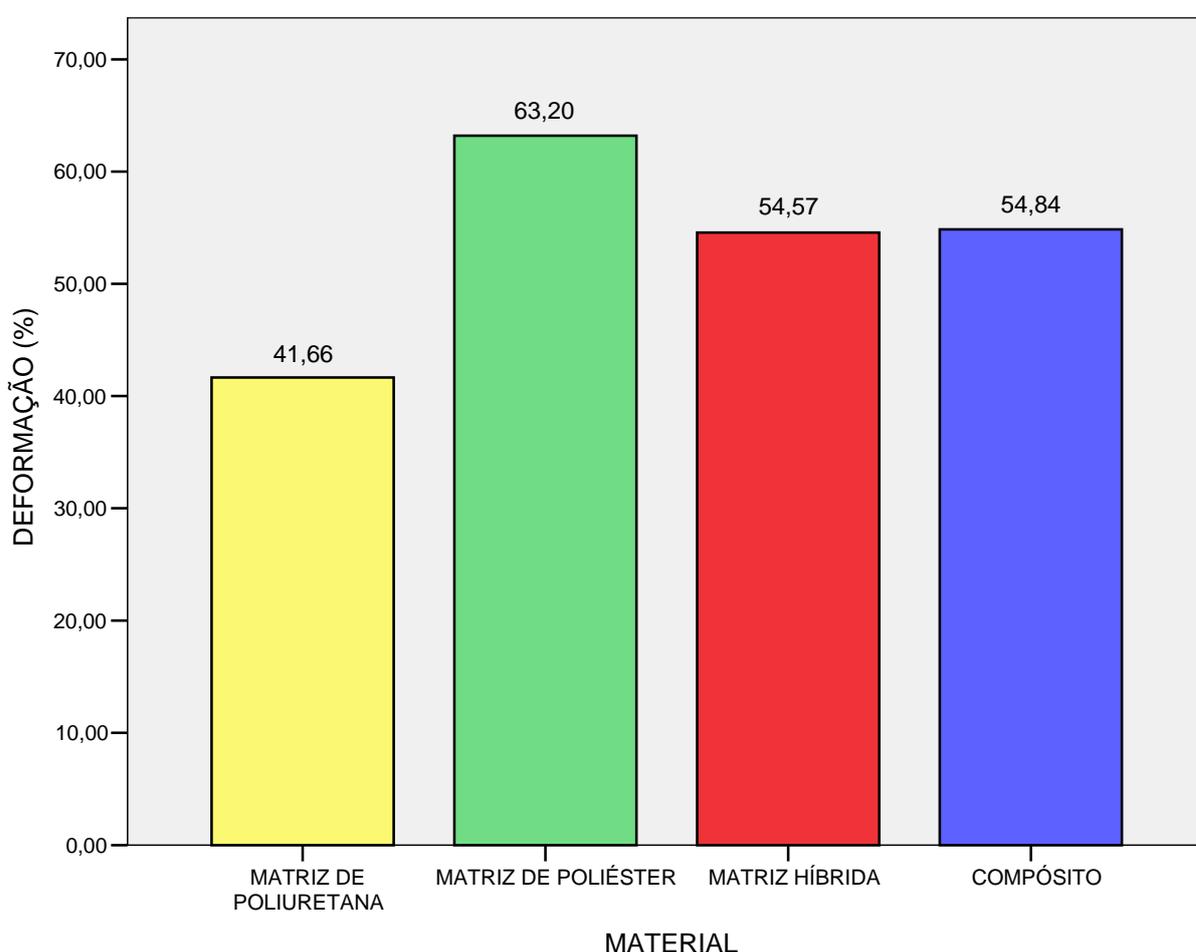


GRÁFICO 9 – Deformações dos materiais constituintes do compósito e do compósito: a matriz híbrida e o compósito apresentaram deformações praticamente iguais, demonstrando que a fibra no compósito não influenciou em nada quanto a essa propriedade.

Na TAB. 56 é apresentado um quadro comparativo quanto às propriedades à compressão (resistência, módulo de elasticidade e deformação) da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito.

TABELA 56

Quadro comparativo dos diferentes materiais utilizados nesta pesquisa e seus comportamentos quanto à compressão

MATERIAL	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)
Matriz de poliuretana	0,90	3,02	41,66
Matriz de poliéster	56,64	5,05	63,20
Matriz híbrida	11,20	3,66	54,57
Compósito	4,90	3,94	54,84

4.10 Os ensaios de flexão

Os corpos de prova foram condicionados a 23°C e 50% de umidade relativa por 48hs antes do teste.

Os testes foram conduzidos a uma temperatura de 23°C e 50% de umidade relativa e a velocidade do ensaio foi de 2,6 mm/min.

Para o ensaio de flexão nos corpos de prova da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito a célula de carga utilizada foi de 500kgf, com uma pré-carga de 0,050N.

Segundo a dimensão do vão de ensaio de flexão, o corpo de prova foi disposto conforme a FIG. 97.

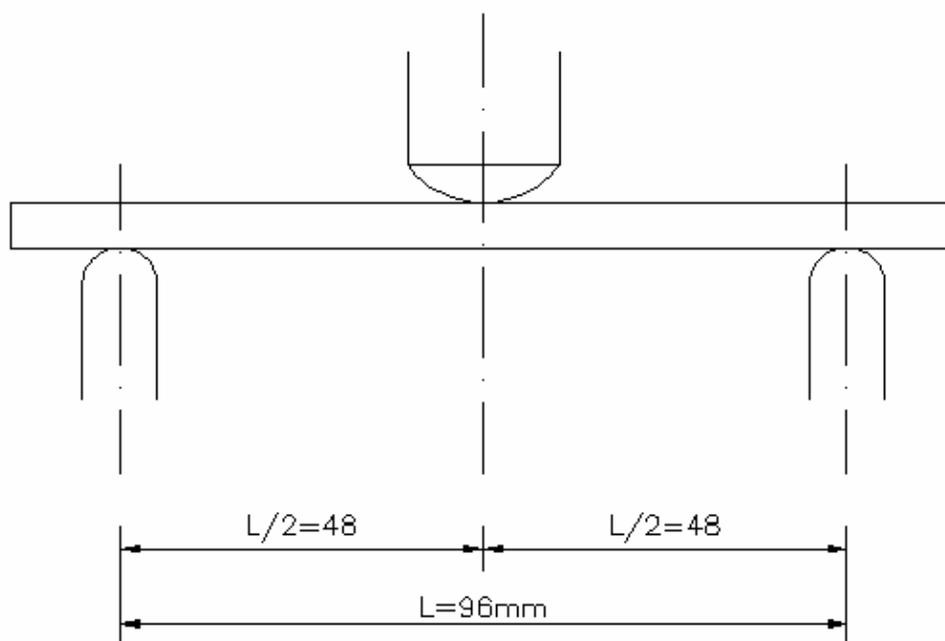


FIGURA 97 – Dimensões do vau do ensaio de flexão.
 Fonte: Desenho realizado segundo a norma ASTM D 790M - 86.

Não foi possível realizar o ensaio de flexão na matriz de poliuretana por se tratar de um material bastante flexível. Vale ressaltar que existem poliuretanas de constituições rígidas, que podem ser submetidas ao ensaio de flexão, o que não foi o caso da utilizada nesta pesquisa. Na FIG. 98 estão os corpos de prova antes dos ensaios.



FIGURA 98 – Corpos de prova para o ensaio de flexão: (a) do compósito, (b) da matriz de poliéster e (c) da matriz híbrida.

A norma recomenda que os ensaios devem ser interrompidos quando a deformação máxima nas fibras mais externas (r) alcançar o valor de 0,05mm/mm (5%) (p. 286). A deflexão para quando essa deformação ocorrer foi calculada pela seguinte fórmula (p. 286, fórmula 2 da norma):

$$D = rL^2 / 6d \quad (17)$$

onde:

D – é a deflexão no meio do vão, em mm;

r – é a deformação, mm/mm;

L – é o vão do suporte, mm e

d – é a espessura da viga, em mm.

Então a deflexão máxima deve ser:

$$D = [0,05 \cdot (96)^2] / (6 \cdot 6)$$

$$D = 12,80mm$$

Para o cálculo da deformação máxima nas fibras mais externas, pelo método de teste I, a fórmula utilizada foi a seguinte (p. 288, fórmula 4 da norma):

$$r = 6Dd / L^2 \quad (18)$$

onde:

r – é a deformação, mm/mm;

D – é a deflexão no meio do vão, em mm;

d – é a espessura da viga, em mm e

L – é o vão do suporte, mm.

Para o cálculo da tensão máxima na fibra, pelo método de teste I, a fórmula utilizada foi a seguinte (p. 287, fórmula 3 da norma): :

$$S = 3PL/2bd^2 \quad (19)$$

onde:

S – é a tensão máxima nas fibras mais externas no meio do vão, em mm;

P – é a carga num dado ponto na curva carga-deformação, em N;

L – é o vão do suporte, em mm;

b – é a largura da viga, em mm e

d – é a espessura da viga, em mm.

Para o cálculo do módulo de elasticidade, pelo método de teste I, a fórmula utilizada foi a seguinte (p. 288, fórmula 5 da norma):

$$E_B = L^3m/4bd^3 \quad (20)$$

onde:

E_B – é o módulo de elasticidade em flexão, em MPa;

L – é o vão do suporte, em mm;

m – é a declividade da tangente na parte inicial e reta da curva carga-deflexão, em N/mm.

4.10.1 Ensaio de flexão nos corpos de prova de matriz de poliéster

As larguras, as espessuras, as forças máximas, os limites de resistência, os módulos de elasticidade e as deflexões dos corpos de prova da

matriz de poliéster estão na TAB. 106, na p. 300, na o ANEXO D, e as observações feitas sobre os corpos de prova após serem ensaiados estão na TAB. 107, na p. 302, no ANEXO D. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 33, na p. 301, no ANEXO D, mostra que nenhum corpo de prova deveria ser descartado. Na TAB. 57 está o resumo desses resultados e na FIG. 99 está um corpo de prova da matriz de poliéster após ser ensaiado.

TABELA 57

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de flexão

FORÇA (N)	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DEFLEXÃO (mm)	DEFORMAÇÃO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA
85,71 ± 29,09	51,17 ± 13,61	1,22 ± 0,25	12,36 ± 1,35	4,05 ± 0,60	Os corpos de prova quebraram de duas até cinco partes



FIGURA 99 – Corpo de prova nº10 da matriz de poliéster após ensaio de flexão: quebra no meio e nos apoios, caracterizando um material frágil.

Na TAB. 58 estão os resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de flexão na resina de poliéster.

TABELA 58

Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de flexão na resina de poliéster

PESQUISADORES	IDENTIFICAÇÃO DA RESINA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	DEFLEXÃO (%)
O'DELL (1997)	Ortofitálica insaturada da Owens Corning, Inc	4,45	120,70	-
ALBUQUERQUE <i>et al.</i> (1999)	Elekeiroz	2,19	72,60	3,46
ALBUQUERQUE <i>et al.</i> (1999)	Resana S.A.	2,20	72,70	2,88

As respostas da matriz de poliéster utilizada nesta pesquisa, quanto à resistência e ao módulo em flexão, foram inferiores aos dos resultados das pesquisas da TAB. 58, mostrando tratar-se, provavelmente, de uma outra composição química de poliéster insaturada, cujas respostas quanto à flexão não são muito equivalentes. Quanto à deflexão, a resina de poliéster desta pesquisa apresentou muito maior do que os valores das pesquisas da tabela anterior (9,89%), comprovando se tratar de uma poliéster mais flexível do que aquelas.

4.10.2 Ensaio de flexão nos corpos de prova da matriz híbrida

As larguras, as espessuras, as forças máximas, os limites de resistência, os módulos de elasticidade e as deflexões dos corpos de prova da matriz híbrida estão na TAB. 108, na p. 303, no ANEXO D, e as observações feitas sobre os corpos de prova após serem ensaiados estão na TAB. 109, nas p.

305 e 306, no ANEXO D. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 34, na p. 304, no ANEXO D, mostram que os corpos de prova n^{os} 1, 2, 6 e 7 deveriam ser descartados, incluindo o corpo de prova n^o 4 que foi descartado devido aos resultados muito díspares quanto à força e a tensão. Na TAB. 59 está o resumo desses resultados e na FIG. 100 está um corpo de prova da matriz híbrida após ser ensaiado.

TABELA 59

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de flexão

FORÇA (N)	RESIS- TÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	MÓDU- LO DE ELASTI- CIDADE (GPa)	DEFLE- XÃO (mm)	DEFOR- MAÇÃO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA		
					NA REGIÃO COMPRI MIDA	NA REGIÃO TRACIO NADA	DELAMINA ÇÕES
45,95 ± 14,83	12,21 ± 1,51	0,24 ± 0,02	10,30 ± 1,66	4,90 ± 0,21	Nada aconteceu em seis corpos de prova ensaiados . Dois apresenta ram uma única trinca no ponto de aplicação da carga e outros dois, apresen- taram mais de uma trinca	Nada aconteceu em sete corpos de prova ensaiados . Sobre os outros três corpos de prova ensaia- dos, aparece- ram trincas	Houve nove delamina- ções parciais, geralmente nas extremida- des dos corpos de prova e um corpo de prova não apresentou delaminação



FIGURA 100 – Corpo de prova nº2 da matriz híbrida após ensaio de flexão: devido a lâmina interna de poliuretana o corpo de prova apresentou apenas trincas nas lâminas de poliéster.

A matriz híbrida apresentou valores, quanto à resistência e ao módulo em flexão, inferiores aos da matriz de poliéster. Mesmo não podendo realizar o ensaio de flexão na matriz de poliuretana, pode-se considerar que esses resultados estão fortemente influenciados pela presença da poliuretana nesta matriz. Quanto à deflexão, ao se apresentar um pouco menor do que a da matriz de poliéster, este valor demonstra que foi a presença de duas lâminas de poliéster a responsável por esse valor.

4.10.3 Flexão nos corpos de prova do compósito

As larguras, as espessuras, as forças máximas, os limites de resistência, os módulos de elasticidade e as deflexões dos corpos de prova do compósito estão na TAB. 110, na p. 307, no ANEXO D, e as observações feitas sobre os corpos de prova após serem ensaiados estão na TAB. 111, nas p. 309 a

312, no ANEXO D. Foi feita a validação dos resultados dos ensaios quanto ao módulo de elasticidade e o GRAF. 35, na p. 308, no ANEXO D, mostra que nenhum corpo de prova deveria ser descartado, excetuando o corpo de prova nº 13 cujos resultados foram muito díspares. Na TAB. 60 está o resumo desses resultados. Na FIG. 101 está um corpo de prova do compósito sendo ensaiado e na FIG. 102 está um corpo de prova do compósito após ser ensaiado.

TABELA 60

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de flexão

FORÇA (N)	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DEFLEÇÃO (mm)	DEFORMAÇÃO (%)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA		
					NA REGIÃO COMPRI- MIDA	NA REGIÃO TRACIO- NADA	DELAMI- NAÇÕES
10,51 ± 7,50	4,56 ± 2,75	0,10 ± 0,06	11,93 ± 0,94	4,72 ± 0,45	Nada aconteceu em doze corpos de prova ensaiados . Somente em oito corpos de prova aparece- ram trincas únicas no ponto de aplicação da carga	Nada aconteceu em cinco corpos de prova ensaiados. Sobre quinze corpos de prova ensaiados, apareceram trincas únicas no ponto oposto da aplicação da carga	Houve dez delamina- ções parciais, cinco delamina- ções totais e cinco corpos de prova não apresenta- ram delamina- ções

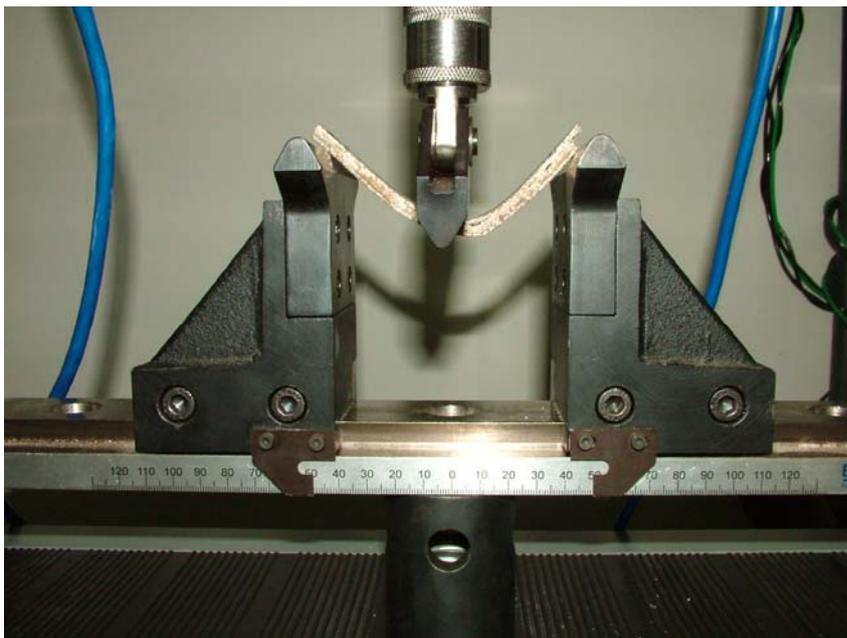


FIGURA 101 – Corpo de prova do compósito sendo submetido ao ensaio de flexão.



FIGURA 102 – Corpo de prova n° 7 do compósito após ensaio de flexão: delaminação total.

Na TAB. 61 estão os resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de flexão no compósito. Mesmo não podendo comparar diretamente os resultados dos ensaios em flexão com os resultados dos pesquisadores desta tabela, os resultados do ensaio de flexão no compósito, quanto à resistência e módulo em flexão, foram bastante inferiores aos valores desta tabela, mostrando que este compósito não apresenta um bom comportamento frente às solicitações quanto à flexão e pela resposta quase igual a da matriz híbrida quanto à deflexão, observa-se que o reforço não foi efetivo quanto a este esforço.

TABELA 61

Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de flexão em compósitos similares

PESQUISADORES	COMPÓSITO	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA EM FIBRA (%)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	DEFLEXÃO (%)
SILVA (2003)	Tecido de sisal não-tratado/PU	22	1,90	48,00	-
SILVA (2003)	Tecido de sisal tratado/PU	27	2,10	55,00	-
MATHUR (2006)	Manta de juta/poliéster	-	-	93,08	-
O'DELL (1997)	Manta de juta/poliéster (3 camadas)	10 a 15	3,05 ± 0,20	61,64 ± 1,93	-
ALBUQUERQUE et al. (1999)	Fios de juta/poliéster Elekeiroz	10	2,50	72,60	1,98
		20	3,13	96,10	2,64
		30	3,13	96,10	2,75
ALBUQUERQUE et al. (1999)	Fios de juta/poliéster Resana	10	3,54	71,00	1,92
		20	3,98	104,70	2,53
		30	4,25	115,00	2,90

4.10.4 Análise dos resultados dos ensaios de flexão

No ensaio de flexão, o lado de aplicação da força fica submetido ao esforço de compressão e o lado oposto, submetido ao esforço de tração. Segundo Silva (2003), no ensaio de flexão, a resistência e o módulo de elasticidade são controlados pela resistência do material localizado na superfície do compósito. E que a trinca sempre se inicia na região tracionada do corpo de prova e se propaga para o lado comprimido. Logo, as fibras que efetivamente atuam no reforçamento do compósito são as localizadas do lado tracionado do corpo de prova e orientadas na direção da tensão aplicada. Já as fibras com orientação perpendicular a esta, atuam no sentido de diminuir a resistência à flexão do compósito e, neste caso, a resistência à flexão é dominada pela resistência à flexão da matriz.

A seguir estão os gráficos comparativos quanto à resistência à flexão, módulo de elasticidade e deflexão da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito.

Quanto à resistência à flexão (GRAF. 10), a matriz de poliéster apresentou maior resistência, seguida da matriz híbrida e a menor resistência foi a do compósito, comprovando a ineficiência do reforço. A matriz híbrida apresentou uma resposta quanto à resistência maior do que a do compósito por dois motivos: um, pelo fato de que as lâminas de poliéster são mais espessas nesta matriz do que no compósito e o outro motivo é porque o reforço em forma de tecido incorporado nesta matriz para constituir o compósito, apresenta fios orientados perpendicularmente a direção de solicitação dos esforços, atuando mais como defeitos nesse compósito, acrescido de que os fios orientados na

direção dos esforços não estarem retos e sim, sinuosos devido a trama do tecido. O próprio entrelaçamento constituiu pontos de concentração de tensão no reforço, o que contribuiu para a baixa resistência à flexão do compósito. No compósito, a lâmina mais externa que foi primeiramente acionada a tração (abaixo da linha neutra), apresentava o reforço a 45°, ou seja, não tinha nenhum fio da trama orientado para resistir a solicitação deste esforço. Pode ser observado na FIG. 102, na p. 188, que inicialmente ocorreu o descolamento das lâminas, para depois haver danos nas mesmas, principalmente nas lâminas na região tracionada dos corpos de prova.

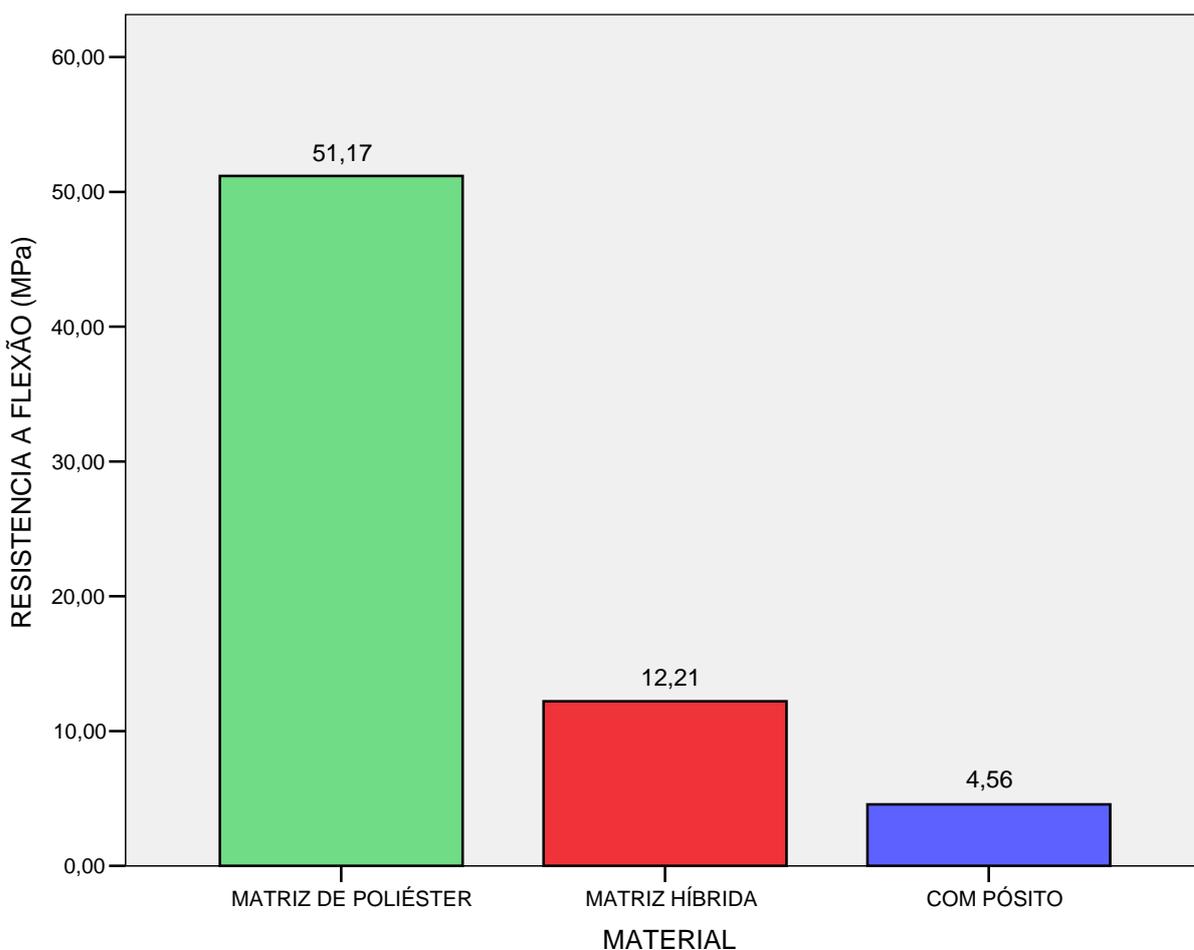


GRÁFICO 10 – Resistências à flexão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o melhor resultado foi da matriz de poliéster, seguida da matriz híbrida e o menor resultado foi o do compósito, comprovando a ineficiência do reforço.

Quanto ao módulo de elasticidade em flexão (GRAF. 11), o maior módulo de elasticidade foi o da matriz de poliéster. O módulo da matriz híbrida já foi muito menor do que o módulo da matriz de poliéster, principalmente devido à lâmina interna de poliuretana e o módulo do compósito foi praticamente a metade do módulo da matriz híbrida, mostrando novamente através dessa propriedade a ineficiência do tipo de reforço utilizado.

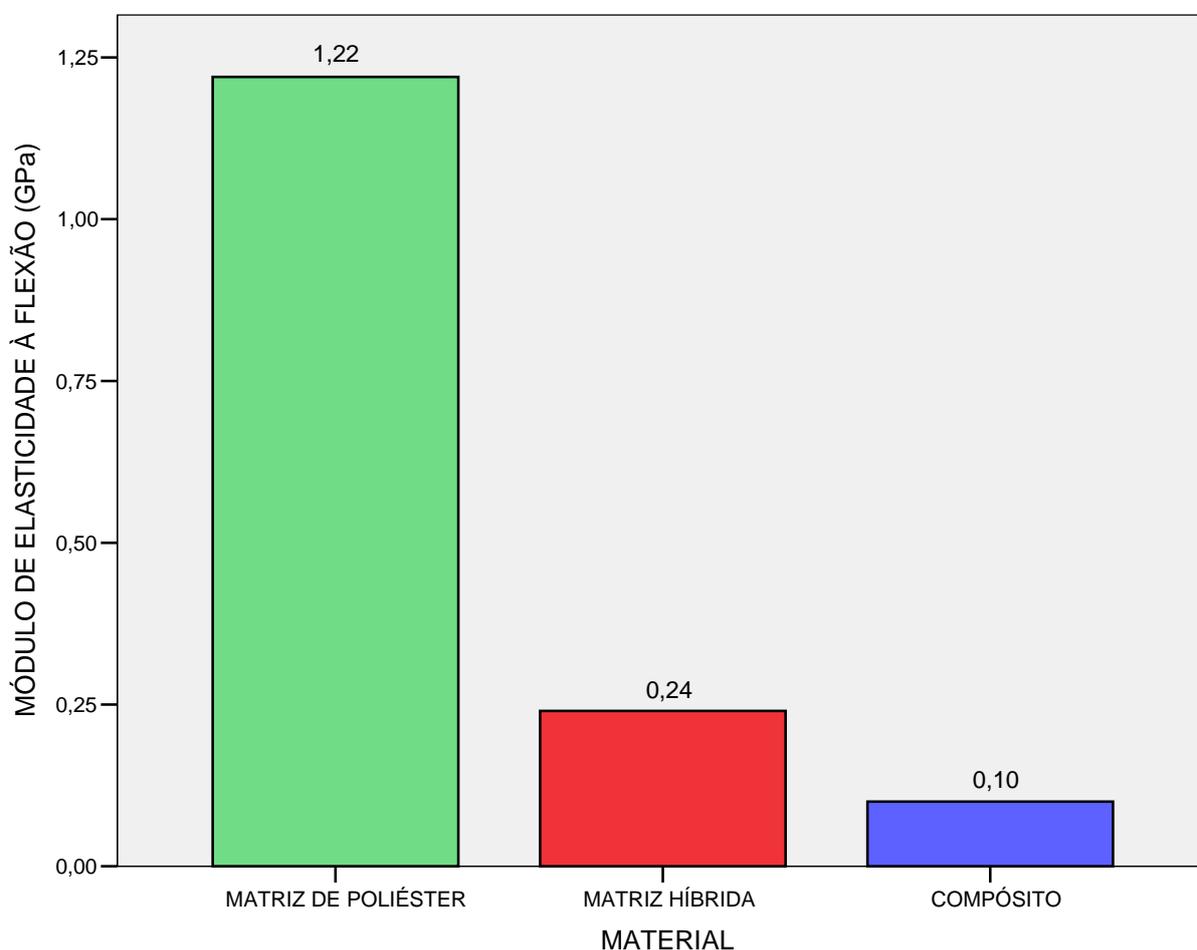


GRÁFICO 11 – Módulos de elasticidade à flexão dos materiais constituintes do compósito e do compósito: o melhor resultado foi da matriz de poliéster. O resultado da matriz híbrida foi muito influenciado pela lâmina de poliuretana e o resultado do compósito foi praticamente a metade do módulo da matriz híbrida, comprovando a ineficiência do reforço.

Quanto à deflexão (GRAF. 12), os valores foram bastante semelhantes, principalmente a da matriz de poliéster com a do compósito, já a da matriz híbrida foi influenciada pela presença da lâmina de poliuretana, mais espessa do que no compósito.

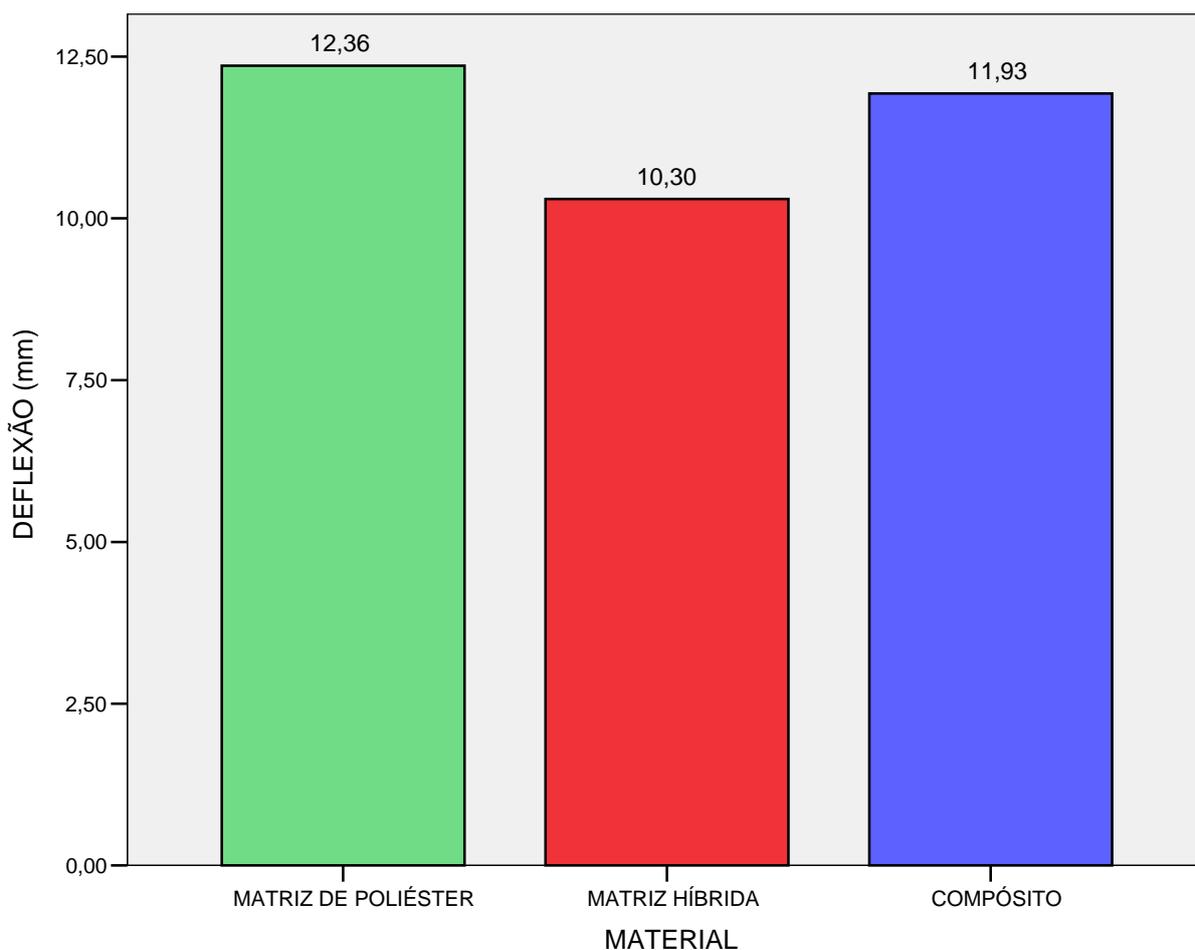


GRÁFICO 12 – Deflexões dos materiais constituintes do compósito e do compósito: valores bastante semelhantes, excetuando a da matriz híbrida, que foi menor em consequência da camada mais espessa de poliuretana internamente.

Na TAB. 62 é apresentado um quadro comparativo quanto às propriedades à flexão (resistência, módulo de elasticidade e deflexão) da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito.

TABELA 62

Quadro comparativo dos diferentes materiais utilizados nesta pesquisa e seus comportamentos quanto à flexão

MATERIAL	FORÇA (N)	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DEFLEXÃO (mm)	DEFORMAÇÃO (%)
Matriz de poliéster	85,71	51,17	1,22	12,36	4,05
Matriz híbrida	45,95	12,21	0,24	10,30	4,90
Compósito	10,51	4,56	0,10	11,93	4,72

4.11 Os ensaios de impacto Charpy

A máquina utilizada para o ensaio de impacto Charpy foi a Gunt WP410 e o limite do pêndulo de impacto é de 300Nm. Antes do ensaio, os corpos de prova foram acondicionados por 16 horas na temperatura de 23°C e umidade relativa de 50%.

A expressão para calcular a resistência ao impacto Charpy em corpos de prova não-entalhados (a_{cU}) é:

$$a_{cU} = \frac{W}{hxb} \times 10^3 \quad (21)$$

Onde:

W= energia corrigida absorvida ao quebrar os corpos de prova, J.

h= espessura do corpo de prova, mm.

b= largura do corpo de prova, mm.

De cada placa de 200x200mm foram retirados dois corpos de prova, um para ensaio normal ao plano do laminado (FIG. 103a) e o outro para o ensaio paralelo ao plano do laminado (FIG.103b).

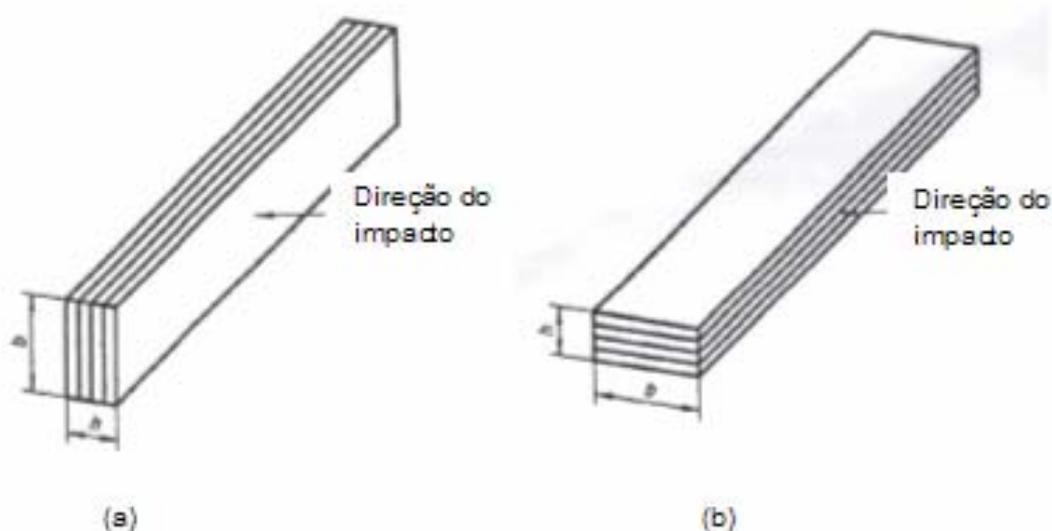


FIGURA 103 - Direção do impacto do pêndulo: (a) normal ao plano do laminado e (b) paralelo ao plano do laminado.

4.11.1 Ensaio de impacto Charpy na matriz de poliuretana

4.11.1.1 As dimensões dos corpos de prova

As dimensões de largura e espessura dos corpos de prova, que interessam ao ensaio, estão nas TAB. 112 (normal) e TAB. 114 (paralelo), p. 313 e 316, respectivamente, no ANEXO E.

4.11.1.2 O resultado do ensaio de impacto Charpy na matriz de poliuretana

O resultado do ensaio de impacto Charpy nos corpos de prova da matriz de poliuretana, também, estão nas TAB. 112 (normal) e TAB. 114 (paralelo), nas p. 313 e 316, respectivamente, no ANEXO E. Foi feita a validação dos ensaios e não houve nenhum valor discrepante (GRAF. 36 e 37, nas p. 314 e

317, do ANEXO E). Nas TAB. 113 (normal) e 115 (paralelo), nas p. 315 e 318, do ANEXO E estão os comportamentos dos corpos de prova de poliuretana no ensaio de impacto Charpy. Na TAB. 63 está resumido o que ocorreu com os corpos de prova da matriz de poliuretana após serem ensaiados, a energia absorvida média e a resistência média quanto ao impacto normal e paralelo.

TABELA 63

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de impacto Charpy

ENSAIO	OBSERVAÇÕES	ENERGIA MÉDIA (w) (J)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO MÉDIA (a_{Cu}) (kJ/m ²)
Normal	O corpo de prova sofreu uma deformação elástica e foi arremessado, retornando a sua forma original após ser ensaiado, sem apresentar nenhuma falha.	2,25 ± 0,79	31,79 ± 13,63
Paralelo	Idem da observação anterior	5,70 ± 2,35	76,10 ± 18,29

Todos os corpos de prova da matriz de poliuretana, após ensaio, não apresentaram dano algum. A energia média absorvida foi menor no ensaio normal ao plano do laminado (2,25J) do que na direção paralela ao mesmo (5,70J) e a resistência ao impacto, em consequência dessa energia absorvida, também foi menor na direção normal (31,79kJ/m²) do que na direção paralela (76,10kJ/m²). A explicação para isso é porque no ensaio normal a dimensão do corpo de prova na direção do impacto foi a espessura (h), portanto, absorveu menos energia e ofereceu menor resistência ao impacto, e no ensaio paralelo foi a largura (b), absorvendo maior energia e oferecendo maior resistência ao impacto.

Na TAB. 64 está o resultado de outra pesquisa sobre o impacto na poliuretana.

TABELA 64

Resultado de outra pesquisa quanto ao ensaio de impacto na resina de poliuretana a base de óleo de mamona

PESQUISADORES	IDENTIFICAÇÃO DA RESINA	ENSAIO	RESISTÊNCIA AO IMPACTO (kJ/m ²)
SILVA (2003)	Poliol n° 442 e pré-polímero n° 253, fornecido pelo GQATP (USP – São Carlos)	Charpy	9,50 ± 0,70

Comparativamente ao resultado na TAB. 64 é possível observar que a poliuretana desta tabela é mais rígida e que o fato da poliuretana desta pesquisa ter dado um resultado muito maior, confirma a importância da maior flexibilidade para um comportamento melhor quanto à resistência ao impacto.

4.11.2 Ensaio de impacto Charpy na matriz de poliéster

4.11.2.1 As dimensões dos corpos de prova

As dimensões de largura e espessura dos corpos de prova que interessam ao ensaio estão nas TAB. 116 (normal) e TAB. 118 (paralelo), nas p. 319 e 322, respectivamente, no ANEXO E.

4.11.2.2 O resultado do ensaio de impacto Charpy na matriz de poliéster

O resultado do ensaio de impacto Charpy nos corpos de prova da matriz de poliéster, também, estão nas TAB. 116 (normal) e TAB. 118 (paralelo), nas p. 319 e 322, respectivamente, no ANEXO E. Foi feita a validação dos

ensaios e não houve nenhum valor discrepante (GRAF. 38 e 39, nas p. 320 e 323, no ANEXO E). Nas TAB. 117 (normal) e 119 (paralelo), nas p. 321 e 324, do ANEXO E estão os comportamentos dos corpos de prova de poliéster no ensaio de impacto Charpy. Na TAB. 65 está resumido o que ocorreu com os corpos de prova da matriz de poliéster após serem ensaiados, a energia absorvida média e a resistência média quanto ao impacto normal e paralelo.

TABELA 65

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de impacto Charpy

ENSAIO	OBSERVAÇÕES	ENERGIA MÉDIA (w) (J)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO MÉDIA (a_{Cu}) (kJ/m ²)
Normal	O corpo de prova quebrou em duas partes.	0,80 ± 0,26	11,16 ± 3,53
Paralelo	Idem da observação anterior	0,85 ± 0,24	11,97 ± 3,48

Os corpos de prova da matriz de poliéster, tanto no ensaio normal quanto ao paralelo, quebraram em duas partes (FIG. 104) e é possível observar que se trata de um material que nem a diferença dimensional da área de impacto e da dimensão do corpo de prova na direção da propagação da energia (no normal, a espessura e no paralelo, a largura) fez com que houvesse uma diferença quanto à energia média absorvida e quanto à resistência média ao impacto nos dois ensaios, comprovando assim, tratar-se de um material frágil.



FIGURA 104 – Corpo de prova nº6 (normal e paralelo) após ensaio de impacto Charpy: quebraram em duas partes e os resultados normais e paralelos foram quase iguais quanto a energia absorvida e quanto a resistência ao impacto.

Na TAB. 66 está o resultado de outra pesquisa sobre o impacto na poliuretana.

TABELA 66

Resultado de outra pesquisa quanto ao ensaio de impacto na resina de poliéster

PESQUISADORES	IDENTIFICAÇÃO DA RESINA	ENSAIO	RESISTÊNCIA AO IMPACTO (J/m)
ALBUQUERQUE <i>et al.</i> (1999)	Resana S.A.	Izod	20,80

O resultado de impacto na matriz de poliéster é muito semelhante ao resultado da pesquisa na tabela acima.

4.11.3 Ensaio de impacto Charpy na matriz híbrida

4.11.3.1 As dimensões dos corpos de prova

As dimensões de largura e espessura dos corpos de prova que interessam ao ensaio estão nas TAB. 120 (normal) e TAB. 122 (paralelo), nas p. 325 e 330, respectivamente, no ANEXO E.

4.11.3.2 O resultado do ensaio de impacto Charpy na matriz híbrida

Os resultados do ensaio de impacto Charpy nos corpos de prova da matriz híbrida, também, estão nas TAB. 120 (normal) e TAB. 122 (paralelo), nas p. 325 e 330, respectivamente, no ANEXO E. Foi feita a validação dos ensaios e na TAB. 120, o valor do corpo de prova nº 10 deveria ser descartado (GRAF. 40, na p. 326) e não houve nenhum valor discrepante na TAB. 122 (GRAF. 41, na p. 331). Nas TAB. 121 (normal), nas p. 327 a 329 e TAB. 123 (paralelo), nas p. 332 a 334, no ANEXO E estão os comportamentos dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy. Na TAB. 67 está resumido o que ocorreu com os corpos de prova da matriz híbrida após serem ensaiados, a energia absorvida média e a resistência média quanto ao impacto normal e paralelo.

TABELA 67

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto Charpy

ENSAIO	OBSERVAÇÕES	ENERGIA MÉDIA (w) (J)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO MÉDIA (a_{Cu}) (kJ/m ²)
Normal	As lâminas externas foram quebradas em duas partes e permaneceram presas as lâminas de poliuretana, que ficaram intactas.	2,17 ± 0,61	21,11 ± 5,12
Paralelo	As lâminas externas foram quebradas em duas partes separadas, apresentaram algumas trincas sobre essas lâminas e nas extremidades, nos apoios, houve descolamento das lâminas de poliéster.	8,70 ± 3,00	82,92 ± 27,70

Os ensaios nos corpos de prova na matriz híbrida sofreram muita influência da presença da lâmina de poliuretana, que além de ser uma lâmina interna de 2mm, houve a colagem das três lâminas com a mesma resina de poliuretana, contribuindo assim, para que aumentasse a quantidade desta resina nos corpos de prova (FIG. 105). É possível comparar a semelhança entre esses resultados com as respostas do ensaio na matriz de poliuretana (ver TAB. 63, p. 196).

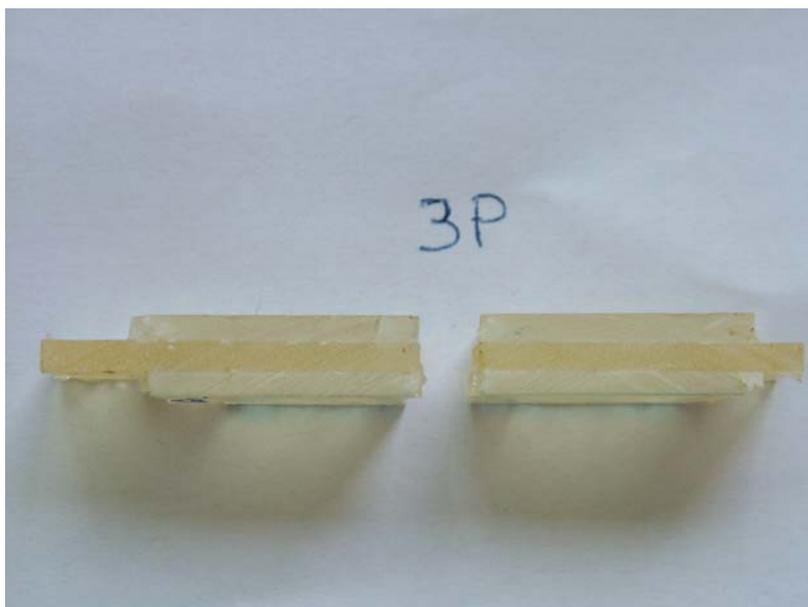


FIGURA 105 – Corpo de prova n°3 da matriz híbrida após ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado: rompimento em duas partes e delaminações das lâminas de poliéster nos pontos de apoio.

4.11.4 Ensaio de impacto Charpy no compósito

4.11.4.1 As dimensões dos corpos de prova

As dimensões de largura e espessura dos corpos de prova que interessam ao ensaio estão nas TAB. 124 (normal), nas p. 335 e 336 e TAB. 126 (paralelo), nas p. 343 e 344, respectivamente, no ANEXO E.

4.11.4.2 O resultado do ensaio de impacto Charpy no compósito

O resultado do ensaio de impacto Charpy nos corpos de prova do compósito, também, está nas TAB. 124 (normal), nas p. 335 e 336 e TAB. 126 (paralelo), nas p. 343 e 344, respectivamente, no ANEXO E. Foi feita a validação

dos ensaios e não houve nenhum valor discrepante (GRAF. 42 e 43, nas p. 337 e 345, no ANEXO E). Na TAB. 125 (normal), nas p. 338 a 342 e 127 (paralelo), nas p. 346 a 349, no ANEXO E, estão os comportamentos dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy. Nas TAB. 68 e 69 estão resumidos o que ocorreu com os corpos de prova do compósito após serem ensaiados, as energias absorvidas médias e as resistências médias quanto ao impacto normal e paralelo. Nas FIG. 106 e 107 estão os corpos de prova do compósito posicionados segundo os respectivos ensaios.



FIGURA 106 – Corpo de prova do compósito sendo submetido ao ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado.

TABELA 68

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado

Nº DE CORPOS DE PROVA QUE QUEBRARAM EM DUAS PARTES	Nº DE CORPOS DE PROVA SEM DELAMINAÇÃO	Nº DE CORPOS DE PROVA QUE DELAMINARAM PARCIALMENTE	Nº DE CORPOS DE PROVA QUE DELAMINARAM TOTALMENTE	Nº DE CORPOS DE PROVA QUE MANTIVERAM INTACTA A LÂMINA DE POLIURETANA E JUTA	EENERGIA MÉDIA (w) (J)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO MÉDIA (a_{Cu}) (kJ/m^2)
3*	10*	7*	3*	17*	1,43 ± 0,34	16,22 ± 3,19

* Dos 20 corpos de prova.

TABELA 69

Valores médios e resumo dos dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado

Nº DE CORPOS DE PROVA QUE QUEBRARAM EM DUAS PARTES	Nº DE CORPOS DE PROVA SEM DELAMINAÇÃO	Nº DE CORPOS DE PROVA QUE DELAMINARAM PARCIALMENTE	Nº DE CORPOS DE PROVA QUE DELAMINARAM TOTALMENTE	Nº DE CORPOS DE PROVA QUE MANTIVERAM INTACTA A LÂMINA DE POLIURETANA E JUTA	EENERGIA MÉDIA (w) (J)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO MÉDIA (a_{Cu}) (kJ/m^2)
12*	9*	6*	5*	8*	5,76 ± 2,39	65,41 ± 28,23

* Dos 20 corpos de prova.



FIGURA 107 – Corpo de prova do compósito sendo submetido ao ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado.

Quanto ao ensaio normal ao plano do laminado, foi possível observar que dos vinte corpos de prova ensaiados, somente três corpos de prova foram separados em duas partes após o impacto e os outros dezessete não apresentaram danos na lâmina interna de poliuretana e juta (FIG. 108). Dos vinte corpos de prova ensaiados, dez não apresentaram delaminações (entre eles, os três que quebraram em duas partes), sete apresentaram delaminações em algumas partes dos corpos de prova (ou de uma lâmina de poliéster e juta) e três apresentaram delaminações totais de uma ou das duas lâminas externas. Quanto ao ensaio paralelo ao plano do laminado, doze corpos de prova quebraram em duas partes (FIG. 109) e os outros oito não apresentaram danos na lâmina interna de poliuretana e juta. Dos vinte corpos de prova ensaiados, nove não apresentaram delaminações (esses nove fazem parte dos doze corpos de prova que foram partidos em dois), seis apresentaram delaminações em algumas partes

dos corpos de prova (ou de uma lâmina de poliéster e juta) e cinco apresentaram delaminações totais de uma ou das duas lâminas externas.



FIGURA 108 – Corpo de prova nº19 do compósito após ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado: as lâminas externas de poliéster e juta foram rompidas e a interna de poliuretano e juta permaneceu intacta.

Pelo número de corpos de prova partidos em dois, no ensaio normal foram três e no paralelo, foram doze, conclui-se que no ensaio normal, a presença da poliuretano na camada interna (que em dezessete corpos de prova nem um dano sofreu) absorveu a energia de impacto sobre uma área maior do que nos corpos de prova submetidos ao ensaio paralelo ao plano do laminado, que mesmo com uma área menor de poliuretano, ainda em oito corpos de prova a lâmina interna de poliuretano e juta não apresentou nenhum dano.

Quanto as delaminações, talvez fosse esperado um comportamento diferente nos corpos de prova submetidos ao ensaio normal e nos submetidos ao

ensaio paralelo ao plano do laminado, o que não ocorreu. O número de corpos de prova que não apresentaram delaminações, que apresentaram delaminações parciais e totais se equivaleram nos dois ensaios, demonstrando ter havido uma boa aderência entre as três lâminas que constituem o compósito.

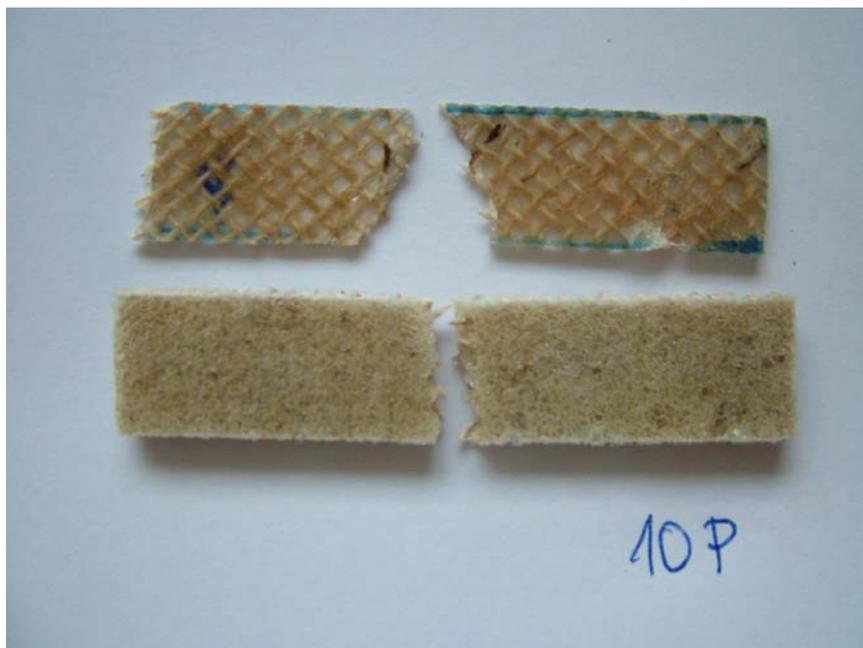


FIGURA 109 – Corpo de prova nº10 do compósito após ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado: separação em duas partes e delaminação da lâmina de poliéster e juta. Nesta imagem, pode-se observar a exposição dos fios do tecido de juta.

A energia média de impacto absorvida pelos corpos de prova no ensaio normal ao plano do laminado foi de 1,43J e no ensaio paralelo, foi de 5,76J e a resistência ao impacto no ensaio normal foi de 16,22kJ/m² e no ensaio paralelo, foi de 65,41kJ/m² (TAB. 68 e 69, na p. 204). A diferença maior, quanto a energia de impacto absorvida e a resistência ao impacto, para o ensaio paralelo ao plano do laminado, aconteceu porque no ensaio normal a dimensão do corpo de prova na direção do impacto foi a espessura (h), portanto, absorveu menos energia e

ofereceu menor resistência ao impacto, e no ensaio paralelo foi a largura (b), absorvendo maior energia e oferecendo maior resistência ao impacto.

Na TAB. 70 estão os resultados quanto ao ensaio de impacto em compósito similares.

TABELA 70

Resultados de outros pesquisadores quanto ao ensaio de impacto em compósitos similares

PESQUISADORES	COMPÓSITO	FIBRA	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA EM FIBRA (%)	ENSAIO	RESISTÊNCIA AO IMPACTO
SILVA (2003)	Tecido de sisal/PU (3 camadas)	Não tratada	18	Charpy	17 kJ/m ²
		Tratada*	22	Charpy	13 kJ/m ²
	Tecido de sisal/PU (4 camadas)	Não tratada	24	Charpy	29 kJ/m ²
		Tratada*	30	Charpy	18 kJ/m ²
	Tecido de sisal/PU (5 camadas)	Não tratada	30	Charpy	30 kJ/m ²
		Tratada*	24	Charpy	24 kJ/m ²
O'DELL (1997)	Manta de juta/poliéster (3 camadas)	Não tratada	10 a 15	Izod (entalhado)	32,50 J/m ± 3,45
				Izod (não entalhado)	38,73 J/m ± 4,26
ALBUQUERQUE et al. (1999)	Fios de juta/poliéster Resana	Não tratada	10	Izod	26,2 J/m
		Não tratada	20	Izod	50 J/m
		Não tratada	30	Izod	84,2 J/m
	Fios de juta/poliéster Resana	Tratada**	10	Izod	24 J/m
		Tratada**	20	Izod	47,1 J/m
		Tratada**	30	Izod	80 J/m
	Fios de juta/poliéster Resana	Tratada***	10	Izod	19,4 J/m
		Tratada***	20	Izod	38,5 J/m
		Tratada***	30	Izod	38,5 J/m

* Com NaOH por 1 hora.

** Fibra imersa em 10% de solução aquosa de NaOH por 3 horas em temperatura ambiente.

*** Fibra refluxada em 10% de solução aquosa de NaOH por 3 horas.

Mesmo sem a informação nas pesquisas da TAB. 70 se os resultados quanto ao ensaio de impacto foram normais ou paralelos ao plano do laminado, pode-se observar que os resultados quanto ao ensaio de impacto nos compósitos desta pesquisa estão ajustados com os valores da tabela acima e que quanto menos tratamentos (ou nenhum) nas fibras e maiores frações volumétricas em fibra nos compósitos, melhores foram as respostas dos compósitos quanto à resistência ao impacto.

4.11.5 Análise dos resultados dos ensaios de impacto Charpy

Nos GRAF. 13 e 14 estão resumidas as energias médias absorvidas e as resistências ao impacto Charpy da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito. Nesses gráficos, através da semelhança dos mesmos, é possível observar que a resistência ao impacto dos materiais é diretamente proporcional à energia de impacto absorvida pelos mesmos.

O ensaio na matriz de poliuretana demonstra tratar-se de um material com boa capacidade de absorção de energia e, portanto, boa resistência ao impacto e, neste caso, a direção do ensaio foi importante para as respostas melhores para os corpos de prova dispostos paralelamente a direção do impacto.

Neste ensaio foi comprovado que a matriz de poliéster é um material frágil, com capacidade de pouca absorção de energia e, em consequência disso, baixa resistência ao impacto, independente da direção do impacto, se normal ou paralelo.

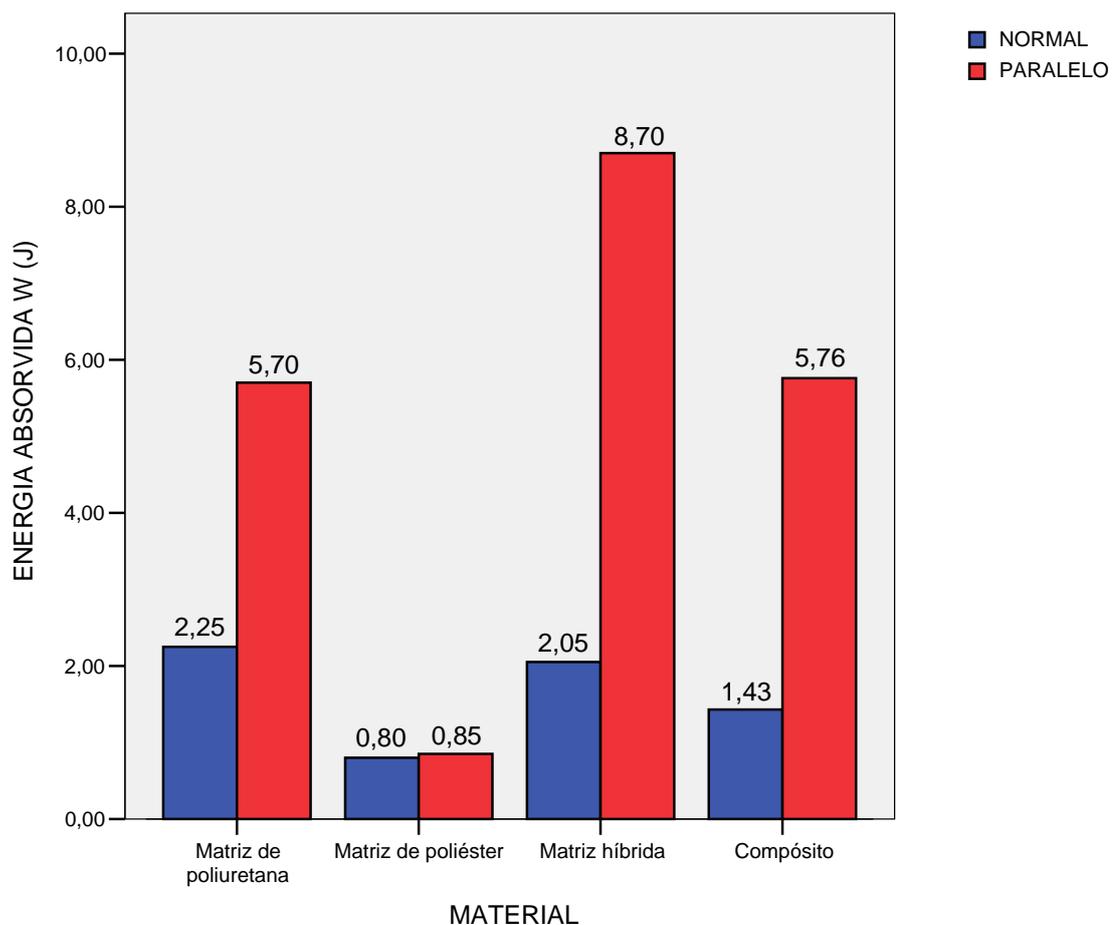


GRÁFICO 13 – Energia de impacto absorvida pelos diferentes materiais: com exceção da matriz de poliéster, a energia absorvida foi muito maior no ensaio paralelo do que no ensaio normal.

Quanto à matriz híbrida, por ser constituída de duas lâminas de poliéster e uma interna de poliuretana, o ensaio confirmou a fragilidade da matriz de poliéster e a influência da lâmina de poliuretana nesses corpos de prova, pois as lâminas de poliéster sofreram danos consideráveis e a lâmina interna de poliuretana, na maioria das vezes, nada sofreu. As respostas dos corpos de prova da matriz híbrida, quanto à energia absorvida e à resistência ao impacto, foram bastante influenciadas pela lâmina de poliuretana, que além dos 2mm dispostos no molde, essa lâmina interna sofreu aumento na espessura tanto pela expansão da resina de poliuretana, quanto pelo acréscimo da mesma resina que serviu de

cola para as três lâminas, resultando em maior espessura do que as das duas lâminas externas. Se a espessura dessa lâmina interna de poliuretana dos corpos de prova da matriz híbrida se mantivesse igual a dos corpos de prova da matriz de poliuretana, talvez houvesse maior semelhança entre as respostas, comprovando assim que nos resultados desses ensaios, as características da poliuretana foram predominantes nesses resultados.

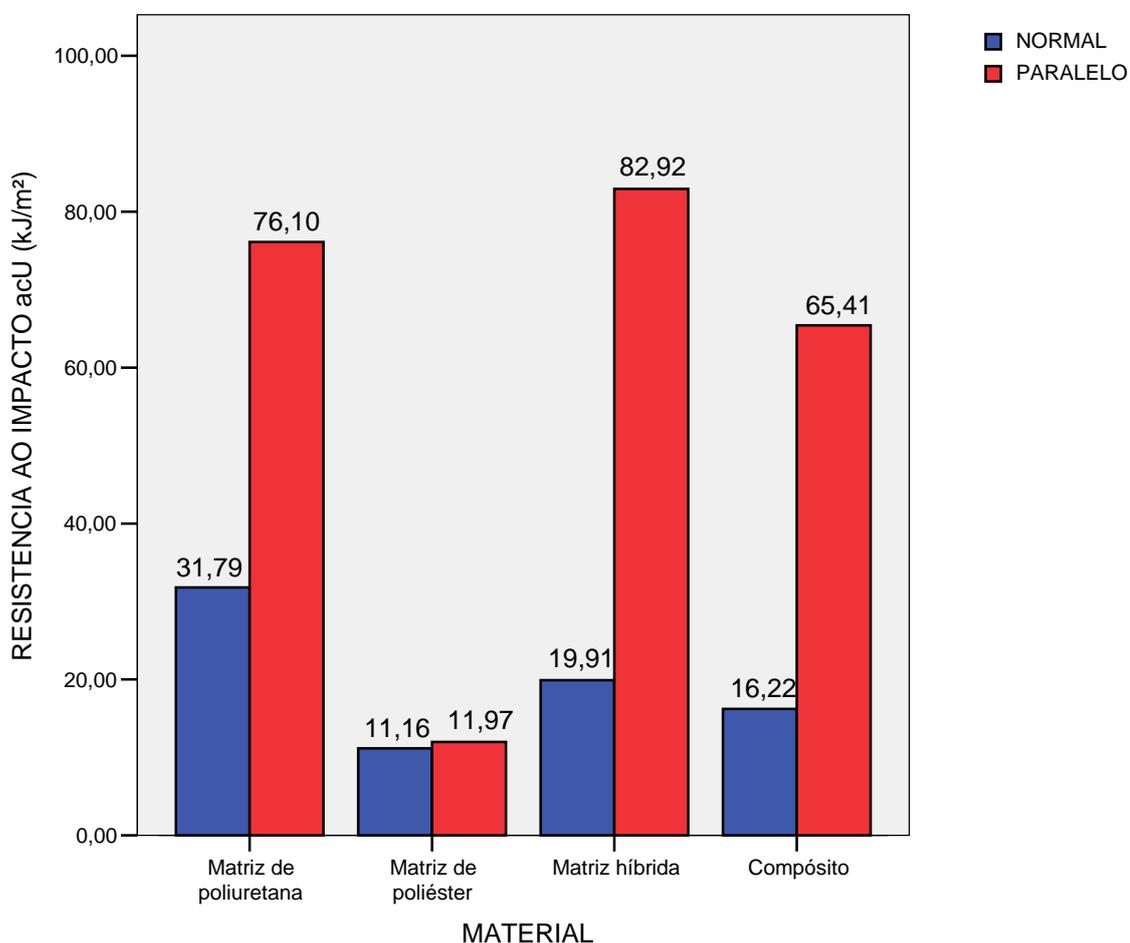


GRÁFICO 14 – Resistência ao impacto nos diferentes materiais: com exceção da matriz de poliéster, a resistência foi muito maior no ensaio paralelo do que no ensaio normal.

Os resultados nos ensaios dos corpos de prova do compósito evidenciam que a absorção de energia e a resistência ao impacto foram semelhantes aos resultados obtidos nos ensaios da matriz de poliuretana e na matriz híbrida, principalmente quanto ao ensaio paralelo. Neste ensaio os resultados foram melhores devido aos mecanismos de absorção de energia que ocorreram, tais como a delaminação e o arrancamento das fibras (ver FIG. 110). Porém, no ensaio normal, a absorção de energia e a resistência ao impacto do compósito foram menores do que as da matriz de poliuretana e da matriz híbrida e, o que influenciou nesses resultados melhores da matriz de poliuretana e da matriz híbrida foi a espessura da lâmina de poliuretana, maiores do que no compósito. De qualquer forma, a absorção de energia e a resistência ao impacto do compósito foram boas, apesar de ter sido constituído de uma lâmina mais fina de poliuretana, acrescida do tecido de juta. Porém, quanto às observações macroscópica sobre os corpos de prova, é possível afirmar que a presença da fibra amenizou os danos sobre as lâminas externas constituídas também de poliéster, podendo-se concluir que a existência de um reforço na matriz híbrida, resultando no compósito, foi imprescindível para garantir a melhor integridade do material, diminuindo bastante a área de dano sobre o mesmo e que, caso a lâmina interna de poliuretana no compósito fosse mais espessa, poderia haver maior resistência ao impacto nos mesmos.

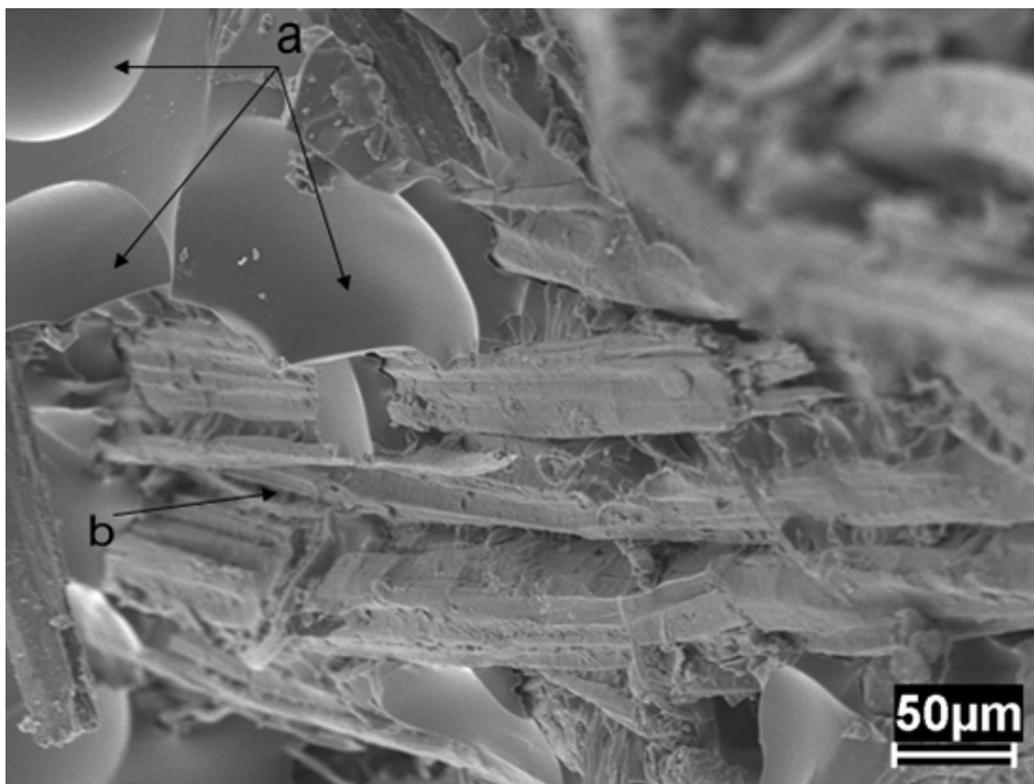


FIGURA 110 – Morfologia da fratura do corpo de prova do compósito submetido ao ensaio Charpy paralelo: observam-se bolhas de ar (a) e extração de fibras (b), demonstrando fraca adesão na interface.

Na TAB. 71 está um quadro comparativo dos diferentes materiais ensaiados e seus comportamentos quanto ao impacto Charpy.

TABELA 71

Quadro comparativo dos diferentes materiais utilizados nesta pesquisa e seus comportamentos quanto ao ensaio de impacto Charpy

MATERIAL	ENSAIO	ENERGIA ABSORVIDA MÉDIA (w) (J)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO MÉDIA (kJ/m ²)
Matriz de poliuretana	Normal	2,25 ± 0,79	31,79 ± 13,63
	Paralelo	5,70 ± 2,35	76,10 ± 18,29
Matriz de poliéster	Normal	0,80 ± 0,26	11,16 ± 3,53
	Paralelo	0,85 ± 0,24	11,97 ± 3,48
Matriz híbrida	Normal	2,17 ± 0,61	21,11 ± 5,12
	Paralelo	8,70 ± 3,00	82,92 ± 27,70
Compósito	Normal	1,43 ± 0,34	16,22 ± 3,19
	Paralelo	5,76 ± 2,39	65,41 ± 28,23

4.12 Os ensaios de impacto por queda de dardo

Os corpos de prova foram condicionados a 23°C e 50% de umidade relativa por 40hs antes do teste e os testes foram conduzidos a uma temperatura de 23°C e 50% de umidade relativa.

Este ensaio foi realizado nos corpos de prova da matriz de poliuretana, da matriz de poliéster, da matriz híbrida e do compósito, e as massas utilizadas foram as seguintes: 0,10 (massa do dardo), 0,30, 0,50, 0,70 e 0,90kg (todas as quatro últimas incluem a massa do dardo).

4.12.1 Ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz de poliuretana

4.12.1.1 As espessuras nos centros dos corpos de prova

As espessuras nos centros dos corpos de prova da matriz de poliuretana estão na TAB. 128, nas p. 350 e 351, no ANEXO F.

4.12.1.2 O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo na matriz de poliuretana

O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz de poliuretana está na TAB. 72 e detalhado na TAB. 128, nas p. 350 e 351, no ANEXO F. Em nenhum ensaio houve falha dos corpos de prova, de onde é possível concluir que até a massa de 0,90kg nenhuma falha acontece nos mesmos. Na FIG. 111 é apresentado um corpo de prova da matriz de poliuretana após ensaio, demonstrando que houve apenas uma flexão no mesmo, e que após ser desprendido do equipamento, retornou a forma original.



FIGURA 111 – Corpo de prova de poliuretana ensaiado: nenhuma falha e nem deformação permanente até a massa de 0,90kg.

TABELA 72

Resultado do ensaio de impacto por queda de dardo dos corpos de prova da matriz de poliuretana

MASSA (kg)	CORPOS DE PROVA										n_0
	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3		AMOSTRA 4		AMOSTRA 5		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,90									0	0	2
0,70							0	0			2
0,50					0	0					2
0,30			0	0							2
0,10	0	0									2
Total										10 (N_0)	

Onde:

 n_0 = número de corpos de prova que não falharam. N_0 = total de corpos de prova que não falharam.

4.12.1.3 A massa de falha (w)

A energia de falha ou resistência ao impacto é a energia necessária para produzir as falhas. A energia de falha, expresso em J, é calculada pela seguinte fórmula:

$$FE = hwf \quad (22)$$

onde:

h = altura de falha média ou altura constante, conforme aplicação, mm. Neste ensaio a altura constante foi de 66mm (sub-item 12.7, p. 6 da norma).

w = massa de falha média ou massa constante, conforme aplicação, kg. Neste caso, 0,10kg.

f = fator de conversão para Joules.

$f = 9,80665 \times 10^{-3}$ se $h = \text{mm}$ e $w = \text{kg}$.

Porém, os corpos de prova de poliuretana não apresentaram danos até a massa limite de ensaio que foi de 0,90kg, portanto, pode-se concluir, apenas que a massa de falha dos corpos de prova deve ser maior que este valor, ou seja:

$$w > 0,90\text{kg}$$

4.12.1.4 A energia de falha (FE)

A energia de falha ou resistência ao impacto desses corpos de prova da matriz de poliuretana não pode ser calculada para estas massas utilizadas neste ensaio, porém pode-se afirmar que deve ser:

$$FE > hwf$$

para:

$h = 66\text{mm}$;

$w = 0,90\text{kg}$ (massa máxima utilizada);

$f = 9,80665 \times 10^{-3}$

$$FE > 66 \times 0,90 \times 9,80665 \times 10^{-3}$$

$$FE > 0,5825\text{J}$$

Isto é, a energia de falha ou resistência ao impacto da matriz de poliuretana deve ser maior que 0,5825J.

4.12.2 Ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz de poliéster

4.12.2.1 As espessuras nos centros dos corpos de prova

As espessuras nos centros dos corpos de prova da matriz de poliéster estão na TAB. 129, nas p. 352 e 353, no ANEXO F.

4.12.2.2 O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo na matriz de poliéster

O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz de poliéster está resumido na TAB. 73 e detalhado na TAB. 129, nas p. 352 e 353, no ANEXO F. Em todos os ensaios houve falha dos corpos de prova, inclusive somente com a massa do dardo, sem mais massas, os corpos de

prova foram quebrados facilmente, comprovando que apenas 0,10kg são suficientes para falhar os mesmos (FIG. 112).

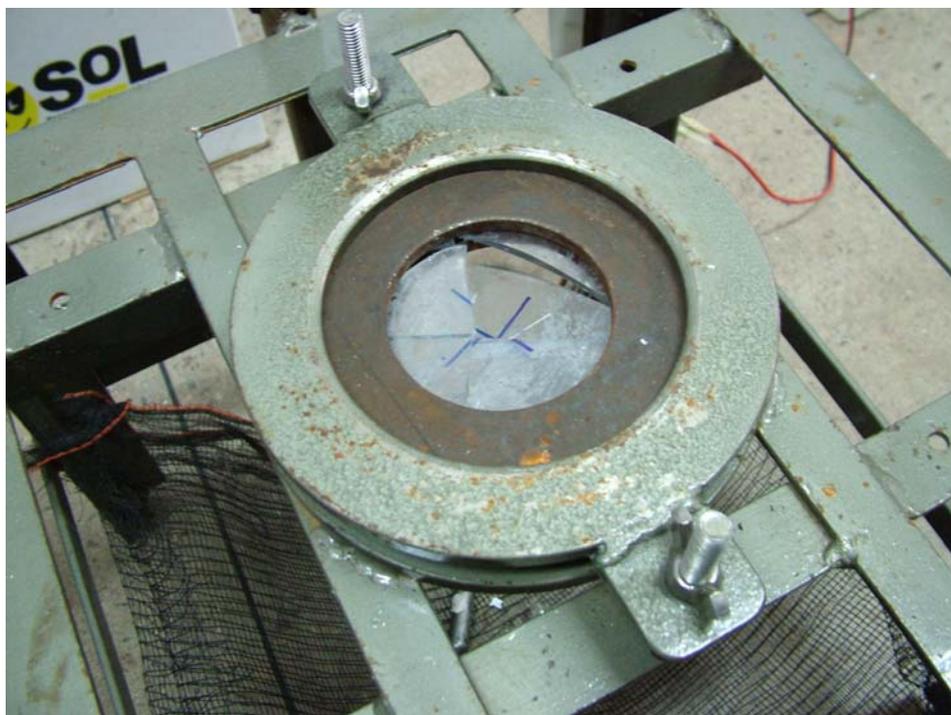


FIGURA 112 – Corpo de prova da matriz de poliéster: material frágil e quebradiço.

TABELA 73

Resultado do ensaio de impacto por queda de dardo dos corpos de prova da matriz de poliéster

MASSA (kg)	CORPOS DE PROVA										n_x
	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3		AMOSTRA 4		AMOSTRA 5		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,90									x	x	2
0,70							x	x			2
0,50					x	x					2
0,30			x	x							2
0,10	x	x									2
Total										10 (N_x)	

Onde:

 n_x = número de corpos de prova que falharam. N_x = total de corpos de prova que falharam. w = 0,10 kg (a menor massa na qual um evento ocorreu).

Os corpos de prova de poliéster foram completamente danificados a partir da massa de 0,10kg. O tipo de trinca que normalmente ocorreu sobre os corpos de prova de poliéster foi a trinca primária (radial). Somente em quatro corpos de prova aconteceram trincas secundárias (circulares), porém, pode ser observado que isso só ocorreu devido a presença de bolhas de ar aprisionadas dentro dos corpos de prova na direção de trincas primárias. Na FIG. 113, tem-se um corpo de prova de poliéster sujeito a massa de 0,30kg. Pode-se observar que as trincas foram quase ortogonais, típicas de fraturas em materiais frágeis e quebradiços e que a presença de uma bolha de ar, fez surgir uma trinca secundária. Com o incremento de massas também ocorreu o aumento no número de trincas, dando o aspecto estilhaçado nos corpos de prova sujeitos às maiores massas.

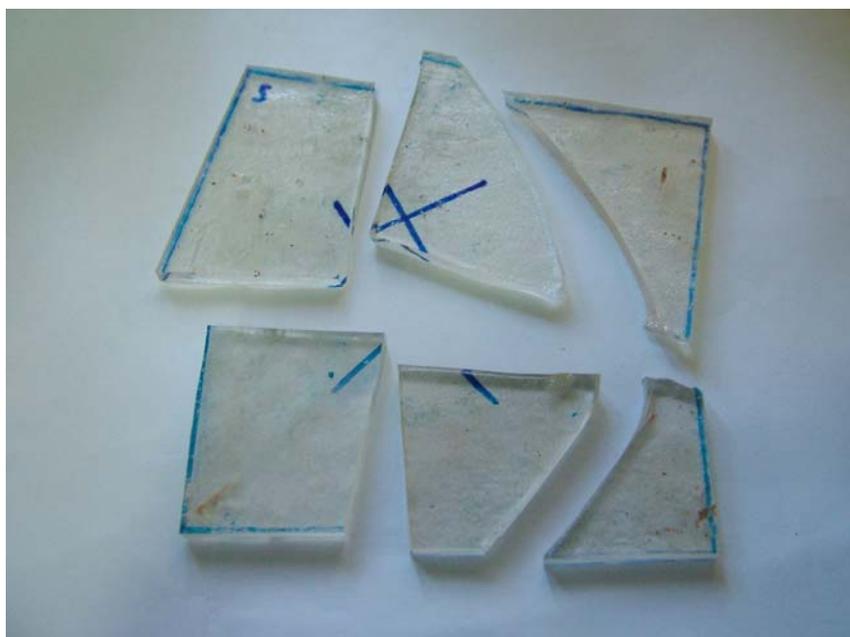


FIGURA 113 - Corpo de prova de poliéster nº 3 sujeito à massa de 0,30kg: trincas primárias quase ortogonais e uma trinca secundária devido a presença de uma bolha de ar aprisionada na direção de uma trinca principal.

4.12.2.3 A massa de falha (w)

Os corpos de prova de poliéster apresentaram danos desde a queda apenas do dardo, sem acréscimo de massas e os corpos de prova de poliéster sofreram falhas totais. Logo, eles falharam desde a massa 0,10kg, ou seja:

$$w = 0,10kg$$

4.12.2.4 A energia de falha (FE)

A energia de falha ou resistência ao impacto dos corpos de prova da matriz de poliéster foi de:

$$FE = 66 \times 0,10 \times 9,80665 \times 10^{-3}$$

$$FE = 0,0647J$$

4.12.3 Ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz híbrida

4.12.3.1 As espessuras nos centros dos corpos de prova

As espessuras nos centros dos corpos de prova da matriz híbrida estão na TAB. 130, nas p. 354 a 362.

4.12.3.2 O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo na matriz híbrida

O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova da matriz híbrida está resumido na TAB. 74, detalhado na TAB. 130, nas p. 354 a 362 e o resumo dos danos nas TAB. 131 (p. 363), 132 (p. 363), 133 (p. 364), 134 (p. 364) e 135 (p. 365). Pela presença da poliéster na superfície de impacto (1ª camada da matriz híbrida), houve falha de todos os corpos de prova, de onde é possível concluir que, inclusive somente com a massa do dardo, os corpos de prova se quebraram facilmente, comprovando que apenas 0,10kg são suficientes para falhá-los. Nestes corpos de prova, as trincas se propagaram radial (trincas primárias) e circularmente (trincas secundárias) e, devido à lâmina interna de poliuretana, mais espessa do que no compósito, esses corpos não foram traspassados. As trincas primárias surgem em consequência do impacto da queda do dardo sobre a 1ª camada de poliéster e aparecem na 3ª camada, também de poliéster, devido à elasticidade da camada interna de poliuretana, provocando danos maiores do que na região comprimida dos corpos de prova (FIG. 114). Os danos na região compressiva não variam muito com o incremento de massa e os da região tracionada, desde a massa de 0,10kg, já prejudicaram totalmente as superfícies de poliéster dos corpos de prova.

TABELA 74

Resultado do ensaio de impacto por queda de dardo dos corpos de prova da matriz híbrida

MASSA (kg)	CORPOS DE PROVA										n_x
	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3		AMOSTRA 4		AMOSTRA 5		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,90									x	x	2
0,70							x	x			2
0,50					x	x					2
0,30			x	x							2
0,10	x	X									2
Total										10 (N_x)	

Onde:

 n_x = número de corpos de prova que falharam. N_x = total de corpos de prova que falharam. w = 0,10 kg (a menor massa na qual um evento ocorreu).



FIGURA 114 – Corpo de prova de matriz híbrida: trincas primárias (radiais) provocadas pela queda do dardo sobre a 1ª camada de poliéster e trincas secundárias (circulares) provocadas pela elasticidade da camada interna de poliuretano.

4.12.3.3 A massa de falha (w)

Os corpos de prova da matriz híbrida apresentaram danos desde a queda apenas do dardo, sem acréscimo de massas, principalmente devido às camadas de poliéster, semelhante aos corpos de prova do compósito e também aos corpos de prova unicamente de poliéster. Logo, eles falharam desde a massa 0,10kg, ou seja:

$$w = 0,10kg$$

4.12.3.4 A energia de falha (FE)

A energia de falha ou resistência ao impacto foi semelhante ao da matriz de poliéster, ou seja:

$$FE = 66 \times 0,10 \times 9,80665 \times 10^{-3}$$

$$FE = 0,0647J$$

4.12.4 Ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova do compósito

4.12.4.1 As espessuras nos centros dos corpos de prova

As espessuras nos centros dos corpos de prova do compósito estão na TAB. 136, nas p 366 a 374, no ANEXO F.

4.12.4.2 O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo no compósito

O resultado do ensaio de impacto por queda de dardo nos corpos de prova do compósito e a porcentagem de danos na região comprimida e na região tracionada estão, também, na TAB. 136, nas p. 366 a 374, no ANEXO F. Todos os corpos de prova do compósito falharam para todas as massas (TAB. 75). Os corpos de prova do compósito sofreram falhas desde a massa de 0,10kg (massa do próprio dardo). Os corpos de prova apresentaram variações dimensionais devido ao processo de fabricação e por isso, pode-se avaliar que, independente das massas aplicadas, as espessuras dos corpos de prova influenciaram no tamanho da área de dano sobre as superfícies dos mesmos. Quanto maior a

espessura dos corpos de prova, menor as áreas danificadas nas superfícies dos mesmos. Nas TAB. 137 (p. 375), 138 (p. 376), 139 (p. 377), 140 (p. 377) e 141 (p. 378) foram resumidos os danos causados nas regiões comprimidas e nas regiões tracionadas dos corpos de prova pelas respectivas massas, sendo necessário, para efeito comparativo, fazer a correção dos danos para a espessura final desejada que era de 6mm.

TABELA 75

Resultado do ensaio de impacto por queda de dardo dos corpos de prova do compósito

MASSA (kg)	CORPOS DE PROVA																				n _x
	AMOSTRA 1					AMOSTRA 2					AMOSTRA 3					AMOSTRA 4					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0,90					x					x					x					x	4
0,70				x					x					x					x		4
0,50			x					x					x					x			4
0,30		x					x					x					x				4
0,10	x					x					x					x					4
Total																				20 (N _x)	

Onde:

n_x= número de corpos de prova que falharam.N_x= total de corpos de prova que falharam.

w= 0,10 kg (a menor massa na qual um evento ocorreu).

Houve um aumento nas áreas danificadas das superfícies dos corpos de prova com o incremento de massa para todas as massas nas regiões tracionadas dos mesmos e para as massas 0,10, 0,30 e 0,50kg nas regiões comprimidas dos corpos de prova. A razão para que não tenha ocorrido um aumento nos danos na área de superfície à compressão dos corpos de prova submetidos às massas 0,70 e 0,90kg é que, devido a esses dois valores maiores de massa, houve uma maior concentração de energia, com pouca propagação de trincas na superfície, pois com a massa 0,70kg todos os corpos de prova foram quase traspassados, chegando a expor a camada interna de poliuretana e os corpos de prova sujeitos a massa 0,90kg foram todos traspassados, portanto, havendo danos nas três lâminas do compósito. Nos corpos de prova sujeitos a massa de 0,10kg não houve esmagamento da 1ª camada (área comprimida), apenas um pequeno dano sobre a superfície da resina de poliéster. Para a massa de 0,30kg, dois corpos de prova apresentaram esmagamento da 1ª camada e dois, não, sem expor a camada interna de poliuretana e para a massa de 0,50kg, todos os corpos de prova apresentaram esmagamento da 1ª camada, com pouca exposição da camada interna de poliuretana (FIG. 115). As trincas primárias (radiais) não apareceram na região comprimida dos corpos de prova, para as massas 0,10 e 0,30kg. Somente em um corpo de prova submetido à massa 0,50kg aconteceu uma trinca primária na região comprimida. A partir da massa 0,70 e 0,90kg, as trincas primárias começam aparecer em alguns corpos de prova, porém em número pequeno, de no máximo 4 trincas. Já as trincas secundárias (circulares) aparecem somente na região comprimida e desde a massa de 0,10kg até a 0,90kg. Quanto à região tracionada, até a massa 0,50kg, aconteceram trincas primárias somente na camada de poliéster, exceto para um

corpo de prova submetido a massa de 0,50kg. A partir da massa de 0,70kg, aconteceram as trincas primárias, com rompimento das fibras.

4.12.4.3 A massa de falha (w)

Os corpos de prova do compósito apresentaram danos desde a queda apenas do pêndulo, sem acréscimo de outras massas, logo, eles falharam desde a massa 0,10kg, ou seja:

$$w = 0,10kg$$

4.12.4.4 A energia de falha (FE)

A energia de falha ou resistência ao impacto do compósito é:

$$FE = 66 \times 0,10 \times 9,80665 \times 10^{-3}$$

$$FE = 0,0647J$$

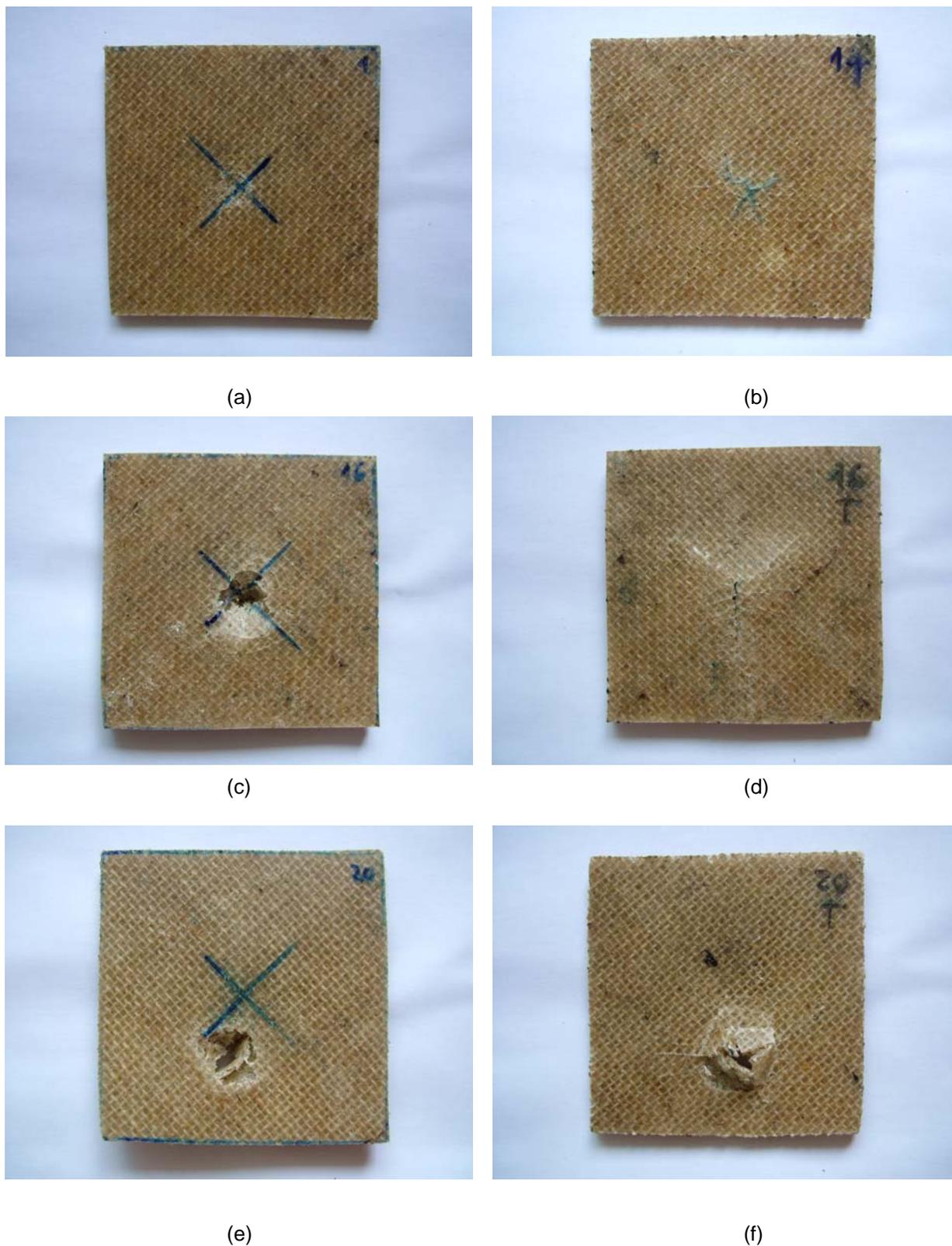


FIGURA 115 – Corpos de prova do compósito ensaiados: CP 1: (a) (região comprimida) e (b) (região tracionada), submetido a massa de 0,10kg: área de dano superficial pequena; CP 16: (c) (reg. comp.) e (d) (reg. Trac.), submetido a massa de 0,70kg: área superficial de dano mais concentrada, porém com quase traspasse do mesmo e CP 20: (e) (reg. Comp.) e (f) (reg. Trac.), submetido a massa de 0,90kg: concentração da área danificada com traspasse do mesmo.

4.12.5 Análise do ensaio de impacto por queda de dardo

Os ensaios de impacto por queda de dardo foram feitos no compósito, nas matrizes individualmente e nas matrizes conjuntamente para ser verificada a contribuição de cada material para a resistência do compósito e a atuação da fibra como reforço. Observando somente pelas massas de falha (w) e energias de falha (FE) necessárias para danificar os materiais quanto ao impacto (TAB. 76), poderia se chegar a conclusão de que o compósito é tão frágil quanto a matriz de poliéster e a matriz híbrida, porém, analisando as áreas danificadas das superfícies dos corpos de prova ensaiados, pode ser observado que o comportamento desses materiais não é tão semelhante assim.

TABELA 76

Massa de falha (w) e energia de falha (FE) dos diferentes materiais

MATERIAL	MASSA DE FALHA (w) (kg)	ENERGIA DE FALHA (FE) (J)
Matriz de poliuretana	>0,90	>0,5825
Matriz de poliéster	0,10	0,0647
Matriz Híbrida	0,10	0,0647
Compósito	0,10	0,0647

Quanto ao ensaio na matriz de poliuretana, percebe-se tratar de um material muito resistente ao impacto, devido à sua característica elástica e de flexibilidade.

Ao ser realizado o ensaio na matriz de poliéster, foi observado tratar-se de um material frágil e quebradiço, sem nenhuma resistência ao impacto, mas que, entretanto, foi utilizado no compósito para dar uma certa rigidez à lâmina de juta e poliuretana e, quanto ao aspecto, uma superfície mais lisa e polida.

Ao serem reunidas as duas matrizes (de poliuretana e de poliéster) para constituir a matriz híbrida presente no compósito, pode-se observar que as características individuais ainda podem ser percebidas na matriz híbrida: quebradiça e frágil nas camadas externas de poliéster e elástica e flexível na camada interna de poliuretana, comprovando que foi a poliuretana que impediu que os corpos de prova da matriz híbrida fossem traspassados.

Ao ser incorporado a fibra nessa matriz híbrida para constituir o compósito, foi possível perceber que a presença da fibra foi efetiva como reforço quanto ao impacto pois, os corpos de prova do compósito até a massa 0,50kg não apresentaram trincas principais na região comprimida, apresentando poucas trincas principais (geralmente 1 ou 2 trincas, com exceção para a massa 0,70kg que apresentou 4 trincas em um corpo de prova) nesta região para massas maiores. Quanto às trincas secundárias, na região comprimida, também foram em pequenos números, no máximo 4 em um corpo de prova submetido a ensaio com a massa 0,50kg. Quanto à região tracionada dos compósitos, as trincas primárias foram em número pequeno de no máximo 5 em um corpo de prova de 0,30kg e, na maioria das vezes, ficou entre 3 e 4 trincas. Quanto à área de superfície danificada, na região comprimida, ela foi aumentando até a massa 0,50kg e, depois, foi diminuindo, demonstrando que a energia ficou concentrada no ponto onde o dardo caiu, sem propagação de trincas sobre a superfície. Quanto à região tracionada, a área de superfície danificada foi aumentando com o incremento de massa. Porém, quanto à matriz híbrida, essa área de superfície danificada, tanto na região comprimida e na região tracionada, foi bem maior, pois, na maioria das vezes, 100% da área de superfície ficou danificada. Nos GRAF. 15, 16, 17, 18 e

19 foram feitas as comparações das áreas danificadas nos corpos de prova dos diferentes materiais segundo as massas utilizadas no ensaio.

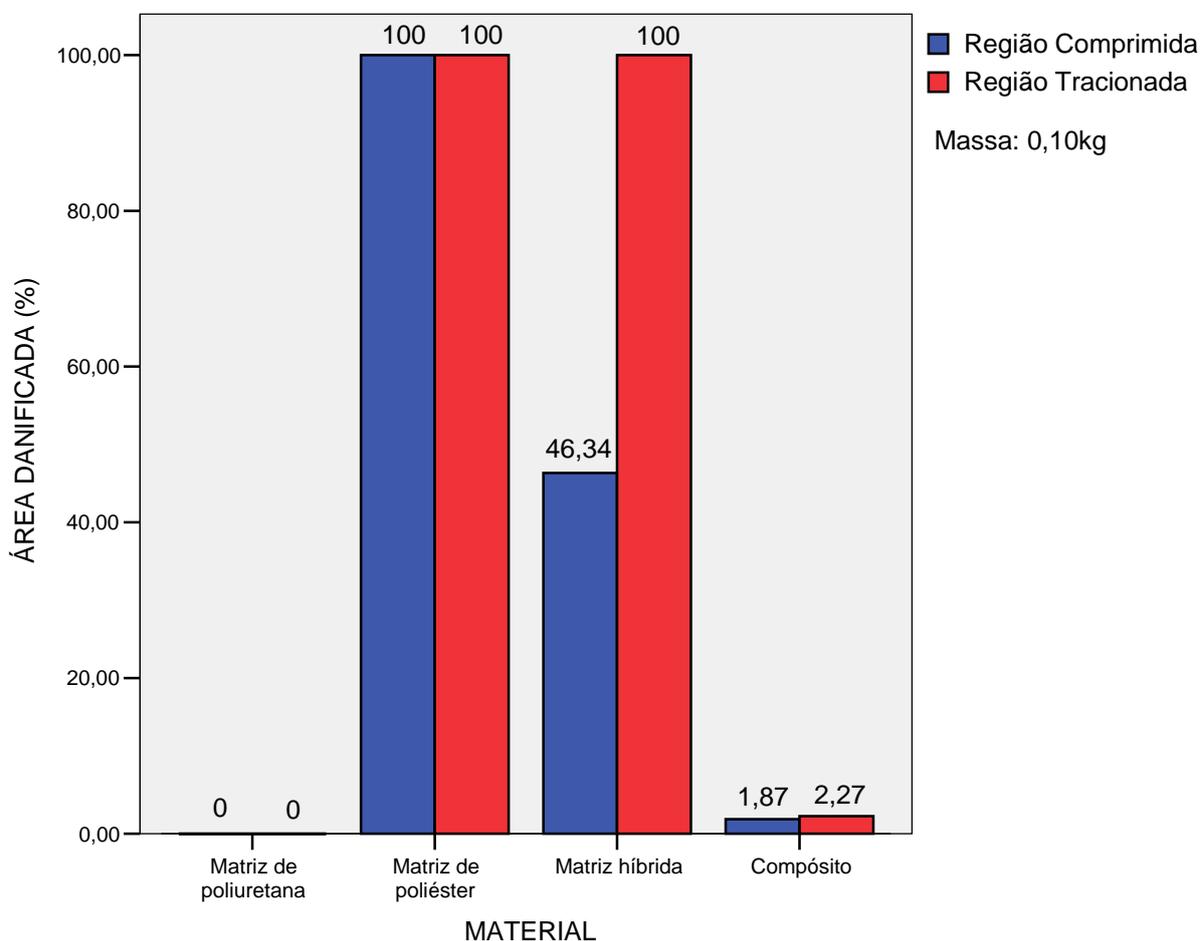


GRÁFICO 15 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,10kg:
- Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (1,87%).
- Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (2,27%).

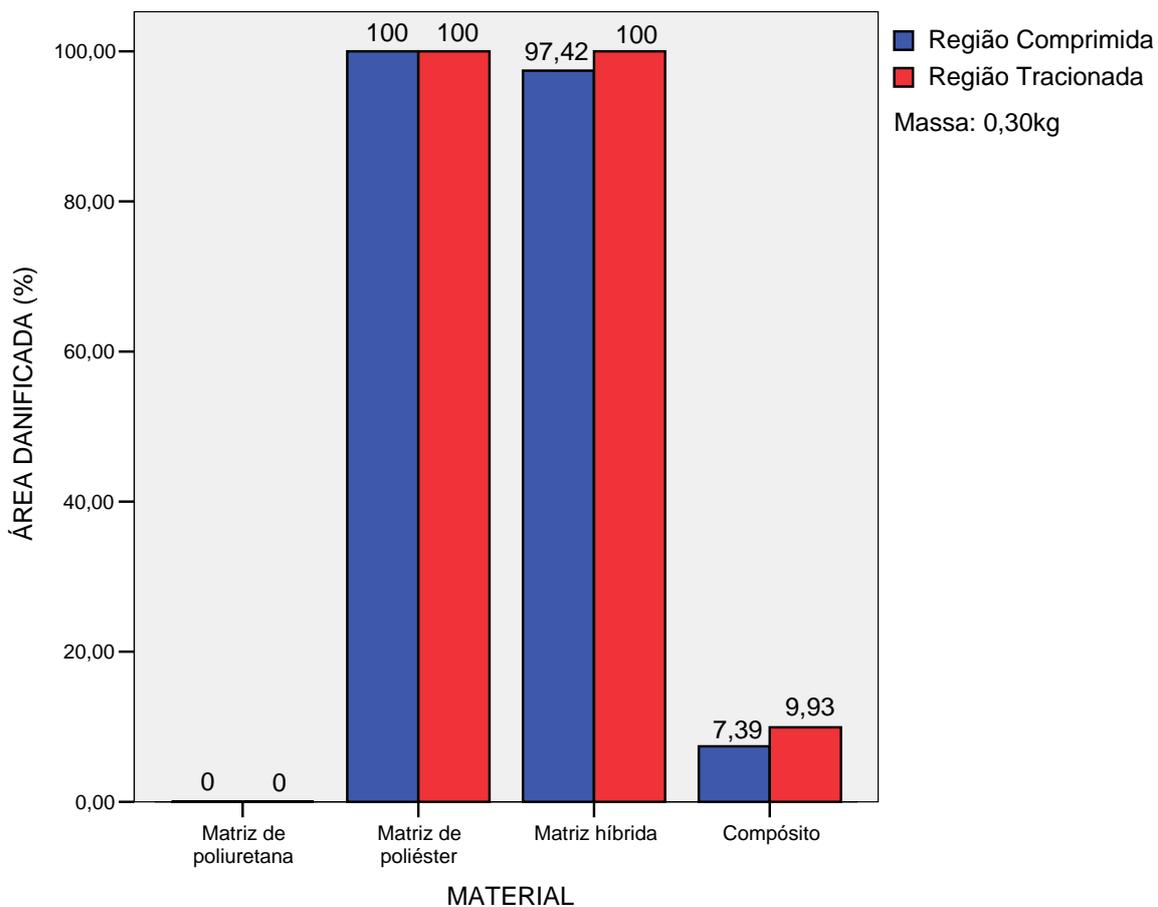


GRÁFICO 16 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,30kg:

- Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (7,39%).
- Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (9,93%).

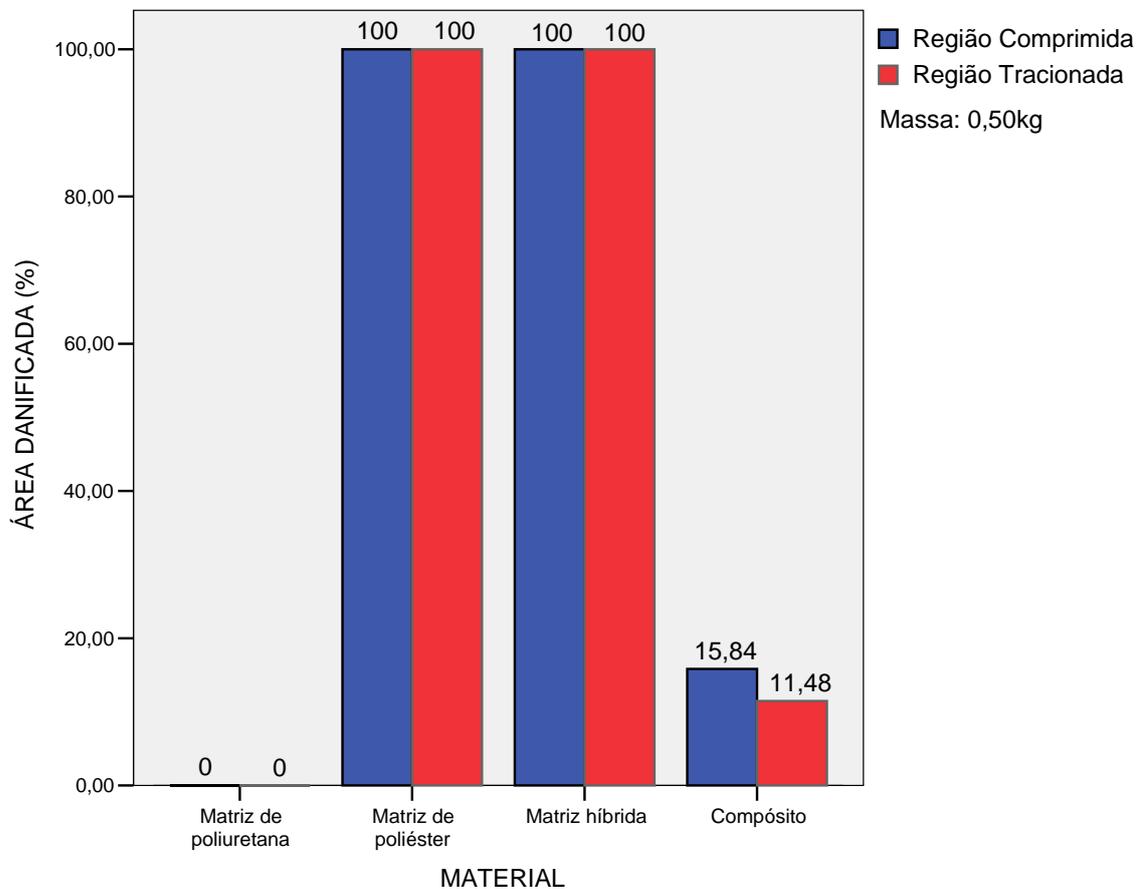


GRÁFICO 17 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,50kg:
 - Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (15,84%).
 - Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (11,48%).

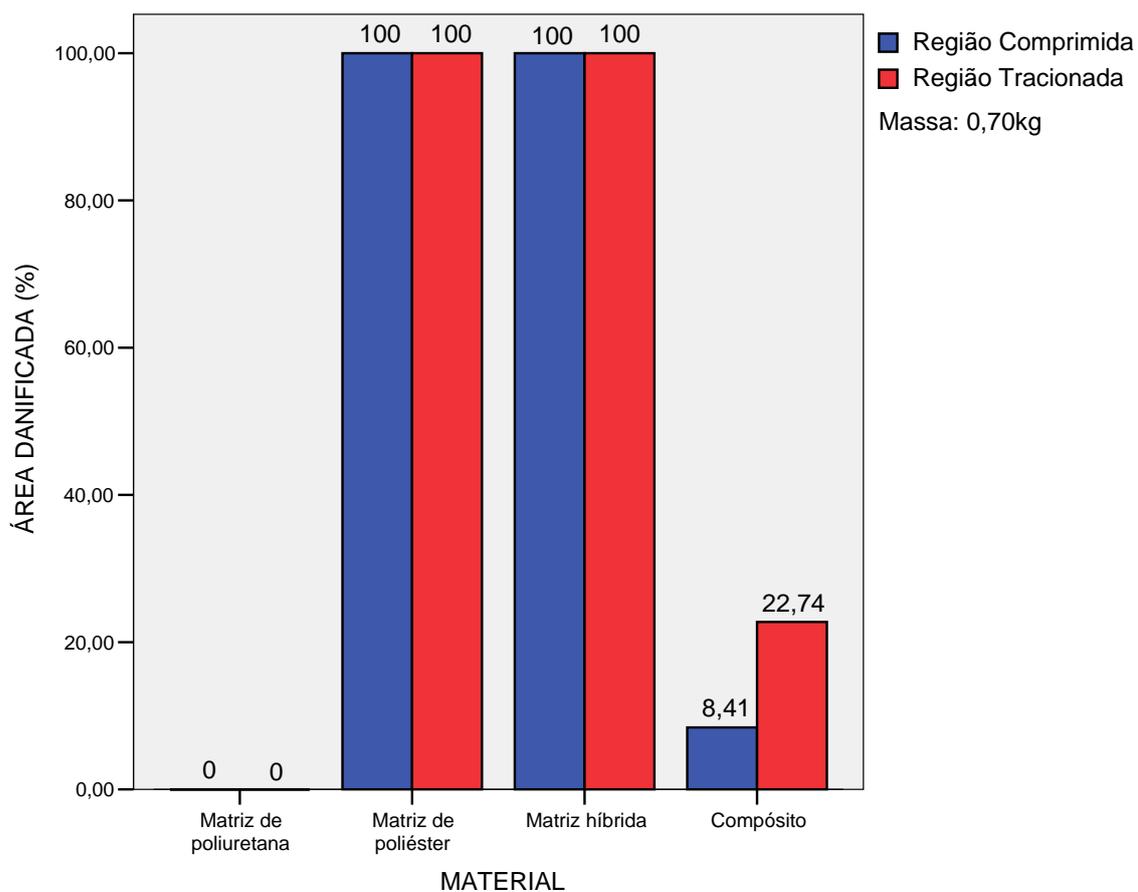


GRÁFICO 18 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,70kg:

- Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (8,41%).
- Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (22,74%).

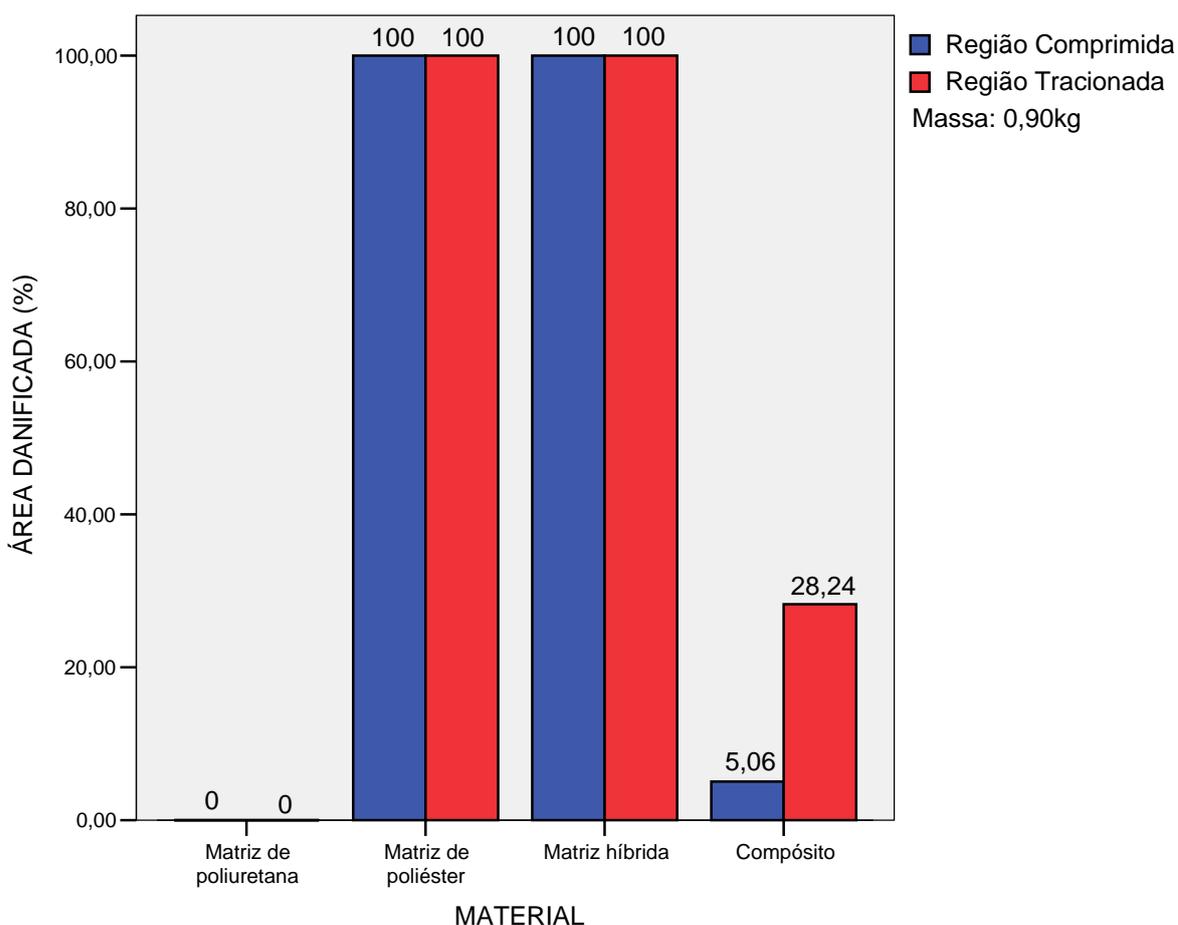


GRÁFICO 19 – Área danificada na superfície dos corpos de prova dos diferentes materiais no ensaio de impacto por queda de dardo para massa 0,90kg:
 - Região comprimida: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (5,06%).
 - Região tracionada: com exceção da matriz de poliuretana (0% de dano), o compósito apresentou menor área de danos (28,24%).

Através desses gráficos é possível observar que a matriz de poliuretana não apresentou nenhuma área danificada, para todas as massas de ensaio, sendo que, para a matriz de poliéster, o que aconteceu foi o oposto, a totalidade da área de superfície dos corpos de prova foi danificada, tanto na região comprimida, quanto na região tracionada dos mesmos, já que os corpos de prova foram totalmente destruídos, desde a massa 0,10kg. Quanto ao compósito, a área danificada de superfície na região comprimida foi aumentando até a massa

0,50kg e a partir da massa 0,70kg, a área danificada de superfície foi diminuindo, comprovando que os danos foram mais concentrados no ponto do impacto do dardo. Quanto a região tracionada do compósito, as áreas de danos na superfície dos corpos de prova foram aumentando, porém bem menor que a área danificada de superfície dos corpos de prova da matriz híbrida, que alcançou a totalidade de área danificada de superfície comprimida a partir da massa 0,50kg e desde a massa 0,30kg os corpos de prova da matriz híbrida apresentaram área de danos de superfície total na região tracionada dos mesmos. Desta forma, fica comprovado que a incorporação da fibra nessa matriz híbrida, constituindo o compósito, foi importante para aumentar a sua resistência ao impacto.

5 CONCLUSÃO

A proposta inicial desta pesquisa foi a elaboração de um compósito para aplicação como painel divisório interno de ambientes nas construções habitacionais que fosse de base natural e biodegradável, por isso houve a escolha da resina de poliuretana a base de óleo de mamona e o tecido de juta. Porém devido à falta de rigidez do compósito, foi acrescentada a resina de poliéster ao mesmo. Resina esta que já está sendo produzida, inclusive no Brasil, porém, a nível de laboratório, a biodegradável. De qualquer forma, dos materiais que compõe o compósito desta pesquisa, a fração em massa de fibra foi de 15,85% e a fração de massa da resina de poliuretana a base de óleo de mamona foi de 28,47%, totalizando 44,32% de fração de massa de materiais natural (juta) e de base natural (resina de poliuretana a base de óleo de mamona), que habilitam esse compósito a ser denominado de eco-compósito.

O comportamento mecânico do compósito quanto à tração, à compressão, à flexão e ao impacto dependeu muito, dentre outros fatores, das propriedades mecânicas de cada material que o constituiu, de sua quantidade no compósito (fração volumétrica dos materiais constituintes) e do tipo de reforço (em forma de tecido, com três placas de tecidos sobrepostos, sendo as duas externas com os fios da trama a 45° e uma camada interna com fios da trama a 90°). A fração volumétrica em fibra foi de 12,18%, a fração volumétrica da resina de poliuretana foi de 30,63% e a fração volumétrica da resina de poliéster foi de 57,19% e pela fração volumétrica da resina de poliéster, foi esperado uma influência maior, através da predominância das características desta resina, sobre os demais materiais que constituíram o compósito, o que não ocorreu. A resina de

poliuretana, aliada ao tipo de reforço, foram preponderantes nas propriedades mecânicas do compósito.

Quanto ao comportamento à tração do compósito, o mesmo apresentou um valor de resistência muito baixo (6,95MPa). O valor do módulo de elasticidade (1,51GPa) foi compatível com o da literatura para compósitos com quase a mesma fração volumétrica em fibra e o valor do alongamento foi muito bom (0,73%). Esses resultados foram fortemente influenciados pela presença da resina de poliuretana, cuja resistência e módulo foram valores muito baixos (1,18MPa e 0,0034GPa, respectivamente) e alongamento elevado (45,98%), e pelo tipo de reforço em tecido, no qual duas placas de tecido (a 45°) não estavam com os fios alinhados com a direção da solicitação dos esforços à tração.

Quanto ao comportamento à compressão do compósito, o mesmo apresentou valores de resistência e módulo de elasticidade também muito baixos, respectivamente, 4,90MPa e 3,94MPa. Para esses resultados houve influência significativa da resina de poliuretana, que devido a sua flexibilidade se deslocava do eixo de aplicação da carga, fato este comprovado pela apresentação da menor deformação dentre os materiais (41,66%) e do reforço, que neste tipo de ensaio, se comportou como uma carga inerte, funcionando mais como um defeito no compósito. Isto pode ser observado pelos módulos de elasticidade e pelas deformações quase iguais entre a matriz híbrida e o compósito (3,66MPa e 3,94MPa e 54,57% e 54,84%, respectivamente módulos de elasticidade e deformações da matriz híbrida e do compósito). A resistência à compressão do tijolo de barro comum, segundo Massetto e Sabbatini (1998, p. 85), é de 3,6MPa. Comparativamente, pode-se afirmar que é menor do que a do compósito em

questão, sendo que esse tijolo é um material largamente empregado como vedação.

Quanto ao comportamento à flexão do compósito, o mesmo apresentou valores de resistência e módulo de elasticidade, comparados à literatura, também muito baixos, respectivamente, 4,56MPa e 0,10GPa, para uma deflexão dentro do limite de 12,80mm. Mesmo com a impossibilidade da realização do ensaio de flexão na poliuretana, foi possível perceber sua influência nos resultados de flexão do compósito. Outro fator que contribuiu para esses baixos valores quanto à resistência e ao módulo foi a disposição dos fios na trama do tecido abaixo da linha neutra dos corpos de prova, pois dispostos a 45° não estavam alinhados com a direção dos esforços solicitantes nessa região tracionada dos mesmos.

Quanto ao comportamento ao impacto do compósito, foram realizados dois tipos de ensaio: Charpy e por queda de dardo. No ensaio de impacto Charpy os valores de resistência ao impacto do compósito foram muito bons (normal: 16,22 kJ/m² e paralelo: 65,41 kJ/m²), comparativamente aos resultados da literatura mencionada. Quanto a este ensaio, a presença da resina de poliuretana no compósito foi muito favorável, pois devido a sua flexibilidade e cura a temperatura ambiente (que liberou muitas bolhas de ar, deixando-a esponjosa), houve uma contribuição muito grande para absorção da energia de impacto. Aliada a resina de poliuretana, o tipo de reforço com sobreposição das placas de tecido a 45°, 90° e 45° e a fraca adesão entre fibra e matriz, visualizada através da microscopia eletrônica, contribuíram, também, para o bom comportamento do compósito quanto ao impacto. Através do ensaio de impacto por queda de dardo, foi possível observar que a presença de um reforço, do tipo de reforço em tecidos sobrepostos a 45°, a 90° e a 45° e da presença da resina de poliuretana

influenciaram para que o compósito apresentasse uma concentração de impacto evitando danos maiores sobre a placa do compósito, contribuindo para quando da reparação dos painéis, pequenas áreas sejam substituídas.

Conforme a literatura mencionada nesta pesquisa, não é possível elaborar um compósito que apresente excelentes comportamentos mecânicos quanto à tração, compressão, flexão e impacto, pois característica como fraca adesão fibra/matriz e a utilização de reforço em forma de tecido não são boas, por exemplo, para elevadas resistências à tração e à flexão, porém, são excelentes para elevadas resistências ao impacto.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. ; SAVASTANO JÚNIOR, H. *Materiais de Construção Civil não Convencionais*. Cap. 5 – Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais e suas aplicações. São Paulo: Ética, 2003.

ALBUQUERQUE, A. C. de *et al.* Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 60, p. 833-844, 1999. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 20/12/06.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 638 - 90 – Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*.

_____. *D 695 - 90 – Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*.

_____. *D 790M - 86 – Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials [Metric]*.

_____. *D 5628 - 96 – Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)*.

_____. *D 5942 - 96 – Standard Test Method for Determining Charpy Impact Strength of Plastics*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS PLÁSTICOS COMPOSTOS (ASPLAR). *Resinas, iniciadores de reação e gelcoats*. São Paulo, 2005.

BARROS, M. S. C. *Estudo da tecnologia das fibras vegetais regionais – Processo de manufatura*. São Luís: BHN/DEPEA, 1992.

CALLISTER JR, W. D. *Materials Science and Engeneering. An Introduction*. USA: John Willey & Sons, Inc, 2003.

CHAWLA, K. K.; BASTOS, A. C. The mechanical properties of jute fibers and polyester-jute composites. In O'DELL, J. L. Natural fibers in resin transfer molded composites. *The Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, Forest Products Society*, p. 280-285, 1997.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford: Oxford University Press, Inc., 1994.

DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK. *Composite materials handbook, Vol. 1 Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials*. United States: 2002. Disponível em: <<http://assist.daps.dla.mil>>. Acesso em: 22/12/2006.

FLINN, R. A; TROJAN, P. K. *Engineering Materials and Their Applications*. Boston: Houghton Mifflin Company, fourth edition, 1990.

GASSAN, J.; BLEDZKI, A. K. Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxi composites by alkali treatment of fibres. *Composites Science and Technology*, 59, p. 1304 – 1309, 1999. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 28/04/05.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. Compósito de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, p. 136-141, Out/Dez, 1999. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 24/08/05.

LUCAS, E. *et al. Caracterização de polímeros. Determinação de peso molecular e análise térmica*. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2001.

MANO, E. B. *Polímeros como materiais de engenharia*. Rio de Janeiro: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2003.

MASSETTO, L. T.; SABBATINI, F. H. *Estudo comparativo da resistência das alvenarias de vedação de blocos utilizadas na região de São Paulo*, p. 85, 1998. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO, Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios. Soluções para o terceiro milênio. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC – USP. Disponível em: http://congr_tgpe.pcc.usp.br/anais/pg79a86.pdf. Acesso em: 25/01/2007.

MATHUR, V. K. Composite materials from local resources. *Construction and Building Materials*, 20, p. 470-477, 2006. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 31/10/06.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. *Composite materials: engineering and science*. London: Chapman & Hall, 1994.

MEIRELLES, A. C. R. *Processos para obtenção de preforma utilizando fibras naturais*. 88p. 2004. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.

MENDONÇA, P. T. *Materiais compostos e estrutura-sanduíche: projeto e análise*. Barueri, SP: Manole, 2005.

MOHANTY, A. K.; MUBARAK, A. K.; HINRICHSEN, G. Surface modification of jute and its influence on performance of biodegradable jute-fabric/biopol composites. *Composites Science and Technology*, 60, p. 1115-1124, 2000. Disponível em: <www.elsevier.com>. Acesso em: 25/03/05.

MUELLER, D. H.; KROBJILOWSKI, A. New discovery in the properties of composites reinforced with natural fibers. *Journal of Industrial textiles*, vol. 33, n°2, p. 111-130, Outubro de 2003. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br> . Acesso em: 19/01/2005.

O'DELL, J. L. Natural fibers in resin transfer molded composites. *The Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, Forest Products Society*, p. 280-285, 1997. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 28/04/2005.

PEREIRA, J. C. *Curso de projeto estrutural com materiais compostos*. Grupo de Análise e Projeto Mecânico do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

PLACKETT, D. *et al.* Biodegradable composites based on L-poly lactide and jute fibers. *Composites Science and Technology*, 63, p. 1287-1296, 2003. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 19/04/2005.

RANA, A. K.; MANDAL, A.; BANDYOPADHYAY, S. Short jute fiber reinforced polypropylene composites: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading. *Composites Science and Technology*, 63, p. 801-806, 2003. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 19/04/05.

RAY, D. *et al.* Effect of alkali treated jute fibres on composite properties. *Bull. Material Science*, vol. 24, n° 2, p. 129-135, 2001. Disponível em: <periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 05/05/2005.

SANADI, A. R., CAULFIELD, D. F., JACOBSEN, R. E. AGRO-FIBER THERMOPLASTIC COMPOSITES. *In: PLACKETT, D. et al. Biodegradable composites based on L-poly lactide and jute fibers. Composites Science and Technology*, 63, p. 1287-1296, 2003.

SHAH, A. N.; LAKKAD, S. C. 1981. MECHANICAL PROPERTIES OF JUTE REINFORCED PLASTICS. *In O'DELL, J. L. Natural fibers in resin transfer molded composites. The Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, Forest Products Society*, p. 280-285, 1997.

SILVA, R. V. da. *Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais*. 139p. 2003. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SILVESTRE FILHO, G. D. *Comportamento mecânico do poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de implante de quadril*. 156p. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VILAR, W. D. *Química e tecnologia dos poliuretanos*. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria técnica Ltda, 2001.

<www.aerojet.com.br>. Informações sobre a resina cristal de poliéster AM-100. Acesso em: 31/10/06.

<www.artesana.com.br>. Divisórias (Figura 27 e 30). Acesso em: 04/08/2006.

<www.castanhal.com.br>. *Monografia sobre juta*. Companhia Têxtil de Castanhal. Acesso em: 15/06/2005.

<www.comciencia.br>. Informações sobre a carência de moradias no Pará. Acesso em: 07/02/07.

<www.compositesworld.com>. Perfis e tubos em material compósito (Figura 34). Acesso em: 08/07/2005.

<www.darcom.com.br>. Divisórias (Figura 28). Acesso em: 04/08/2006.

<www.divibrasltada.com.br>. Acesso em: 04/08/2006.

<www.divimaster.com.br>. Divisórias (Figura 31). Acesso em: 04/08/2006.

<www.divisoriasecia.neomarkets.com.br>. Painéis (Figura 32). Acesso em: 04/08/2006.

<ezine.tiosam.com>. Informações sobre a carência de moradias no Brasil. Acesso em: 07/02/07.

<www.hcdvisorias.com.br>. Divisórias (Figura 26). Acesso em: 04/08/2006.

<www.juta.org>. Casa ecológica (Figura 33). Acesso: 04/03/2005.

www.paineldivisorias.com.br. Divisórias (Figura 29). Acesso em: 04/08/2006.

www.proquinor.com.br. Produtos Químicos do Nordeste. Informações sobre o óleo de mamona e a resina RESCON 301-40. Acesso em: 15/07/2005.

GLOSSÁRIO

Alongamento na ruptura – representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração, no momento da ruptura.

Anisotrópico – não isotrópico; tem propriedades mecânicas ou físicas que variam com a direção relativa aos eixos pertencentes ao material.

Conteúdo de fibra – é a quantidade de fibra presente no compósito. É usualmente expresso como uma porcentagem da fração de volume ou da fração em peso do compósito.

Conteúdo de matriz – é a quantidade de matriz presente em um compósito expresso tanto em porcentagem de peso ou porcentagem de volume.

Cura – é a modificação das propriedades de uma resina termorrígida irreversivelmente por uma reação química.

Densidade, densidade absoluta ou massa específica – é a relação da massa pelo volume de um material. Reflete a estrutura química e a organização molecular de um material. As regiões cristalinas são mais compactas, enquanto que as regiões amorfas são mais volumosas. É expressa em g/cm^3 , kg/m^3 , g/ml .

Densidade relativa – é o quociente de duas massas específicas, sendo uma delas tomada como padrão. É uma grandeza adimensional.

Ductilidade – é a habilidade de um material deformar plasticamente antes de fraturar.

Dureza – mede a resistência à penetração ou ao risco.

Elasticidade – é a propriedade de um material que permite recuperar o seu tamanho e forma original imediatamente depois de removida a força que causou a deformação.

Estabilidade dimensional – é quando um material, devido a sua coesão molecular, não permite variações nas suas dimensões. Um material altamente cristalino apresenta estabilidade dimensional elevada, pela dificuldade de destruição das regiões ordenadas, que resultam da coesão molecular.

Falha dos corpos de prova (no ensaio de queda de dardo) – a presença de qualquer fenda ou trinca, criado pelo impacto da queda do dardo, que pode ser vista a olho nú sob condições normais de iluminação do laboratório.

Grau de polimerização – é o número de meros da cadeia polimérica.

Hand lay-up – é um processo no qual os componentes são aplicados num molde ou em uma superfície de trabalho, e as camadas sucessivamente são aplicadas e trabalhadas manualmente.

Híbrido – é um compósito laminado formado de lâminas de dois ou mais sistemas de material compósito, com combinação de duas ou mais diferentes fibras na estrutura ou com combinação de diferentes matrizes.

Interface – limite entre os constituintes individuais e fisicamente distinguíveis de um compósito.

Interlaminar – entre as lâminas do laminado.

Intralaminar – dentro das lâminas do laminado.

Isotrópico – tem propriedades uniformes em todas as direções. As medidas de propriedades de um material isotrópico são independentes dos eixos de teste.

Laminado – para compósitos com reforço fibroso, é uma coleção de camadas consolidadas em uma ou mais orientações em respeito a alguma direção de referência.

Laminado quase-isotrópico – um laminado balanceado e simétrico para o qual uma propriedade constituinte de interesse, em um dado ponto, mostra comportamento isotrópico no plano do laminado.

Laminado simétrico – um compósito laminado no qual a seqüência de camadas abaixo do plano médio laminado é simétrico na seqüência de empilhamento sobre o plano médio.

Matriz – é um material essencialmente homogêneo no qual o sistema fibra de um compósito é embebido.

Módulo de elasticidade ou Módulo de Young – é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do limite elástico, em que a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. O módulo se aplica tanto à tração quanto à compressão, referindo-se à área transversal no início do ensaio.

Monômero – composto químico que reage para formar polímeros; um composto consistindo de moléculas, cada uma provendo uma ou mais unidades constitucionais.

Mero – é a parte que se repete na cadeia de polímero. Esta porção da molécula de polímero é também denominada de **unidade repetitiva**.

.Oligômero – é um polímero de baixo peso molecular, contendo até aproximadamente 10 unidades repetitivas. O termo oligômero significa poucas partes.

Ortotrópico – tem três planos mutuamente perpendiculares de simetria elástica.

Painel – quadro, almofada de portas ou janelas.

Prepreg – pronto para moldar ou curar material na forma de lâminas podendo ser tecido ou manta impregnada de resina. Pode ser guardada pra uso posterior.

Polímero – um material orgânico composto de moléculas caracterizadas pela repetição de um ou mais tipos de unidades monoméricas.

Polimerização – é a reação pela qual os monômeros combinam-se para formar polímeros.

Propriedades físicas – São aquelas que não envolvem qualquer modificação estrutural a nível molecular dos materiais. Dentre elas, incluem-se a densidade, a estabilidade dimensional, as propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e óticas.

Propriedades mecânicas – São aquelas que determinam a resposta dos materiais às influências mecânicas externas; são manifestadas pela capacidade desses materiais de desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, e resistirem à fratura. Dentre elas, têm-se a resistência à tração, alongamento na ruptura, módulo de elasticidade, resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à fadiga, resistência ao impacto, dureza, resistência à fricção e resistência à abrasão.

Propriedades reológicas – Todas as propriedades relativas ao fluxo do material.

Razão de aspecto – na micromecânica das fibras, é referente a razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra.

Resistência à abrasão – é a capacidade que um material tem de resistir ao desgaste produzido por fricção. Geralmente, é medida por comparação entre o desempenho de materiais tomados como padrão, empregados para fins semelhantes.

Resistência à compressão – é expressa pela tensão máxima que um material rígido suporta sob compressão longitudinal, antes que o material colapse.

Resistência à fadiga ou resistência à flexão dinâmica – exprime a tensão máxima desenvolvida alternadamente como tração e compressão, a que um material pode resistir quando a peça é exposta a dobramentos e desdobramentos consecutivos.

Resistência à flexão – representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de uma barra quando sujeita a dobramento.

Resistência à fricção ou resistência ao deslizamento – é representada pelo coeficiente de atrito, que é a razão entre a força de fricção e a carga aplicada normalmente à superfície de duas placas superpostas entre as quais se desenvolve o atrito.

Resistência ao impacto – representa a tenacidade ou a resistência de um material rígido à deformação a uma velocidade muito alta.

Resistência à tração, resistência à tração na ruptura ou tenacidade de um material – é avaliada pela carga aplicada ao material por unidade de área, no momento da ruptura.

Termoplástico – é um tipo de polímero que repetidamente pode ser amolecido por calor e endurecido ao resfriar, no intervalo de temperatura característica do plástico, e quando no estágio amolecido, pode ser escoado para modelagem ou extrusão.

Termorrígido – é um tipo de polímero que, quando curado por calor, quimicamente ou por outros meios, se solidifica em um material infusível e insolúvel.

Tex – é uma unidade para expressar densidade linear igual a massa ou peso em gramas de 1000 metros de fibra, filamento, fio ou outro fio têxtil.

ANEXO A – Massas dos pedaços de tecido, das lâminas e das placas

TABELA 77

Massas dos pedaços de 200 x 200 mm do tecido de juta

AMOSTRA	PEDAÇOS DE TECIDO	A 45°(a) (g)	A 90° (g)	A 45°(b) (g)
1	1	12,55	11,50	11,75
	2	12,70	12,07	11,98
	3	12,67	11,12	12,16
	4	12,82	11,94	12,47
	5	12,59	11,93	11,85
Média aritmética e desvio padrão da amostra 1		12,666 ± 0,1048	11,712 ± 0,3947	12,042 ± 0,2837
2	6	12,80	11,85	12,16
	7	12,89	11,28	12,41
	8	12,55	11,18	11,75
	9	12,66	11,88	12,72
	10	12,28	11,89	11,62
Média aritmética e desvio padrão da amostra 2		12,636 ± 0,2377	11,616 ± 0,3544	12,132 ± 0,4561
3	11	12,50	12,64	11,96
	12	12,62	12,24	12,40
	13	12,63	12,33	11,52
	14	12,25	12,41	12,02
	15	12,49	12,05	12,55
Média aritmética e desvio padrão da amostra 3		12,498 ± 0,1532	12,334 ± 0,2172	12,09 ± 0,4045

TABELA 77 (continuação)

Massas dos pedaços de 200 x 200 mm do tecido de juta

AMOSTRA	PEDAÇOS DE TECIDO	a 45°(a) (g)	a 90° (g)	a 45°(b) (g)
4	16	12,48	12,66	12,59
	17	12,32	12,67	12,61
	18	11,91	12,98	12,11
	19	11,80	12,32	12,94
	20	11,82	11,27	12,10
Média aritmética e desvio padrão da amostra 4		12,066 ± 0,3128	12,38 ± 0,6630	12,47 ± 0,3609
Média aritmética e desvio padrão das quatro amostras		12,4665 ± 0,2769	12,011 ± 0,3821	12,1835 ± 0,1944

As médias aritméticas e os desvios padrões foram calculados pelas seguintes fórmulas:

Fórmula para o cálculo das médias aritméticas: $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ (23)

Fórmula para o cálculo dos desvios padrões: $S = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x^2 - n.\bar{X}^2\right)}{(n-1)}}$ (24)

TABELA 78

Massas das lâminas prontas de tecido de juta a 90° com poliuretana a base de óleo de mamona

AMOSTRA	LÂMINA A 90°	MASSA (g)
1	1	39,78
	2	40,40
	3	40,86
	4	48,41
	5	57,03
Média aritmética e desvio padrão da amostra 1		45,296 ± 7,4407
2	6	55,36
	7	50,81
	8	48,31
	9	49,77
	10	49,40
Média aritmética e desvio padrão da amostra 2		50,73 ± 2,7382
3	11	47,66
	12	52,93
	13	56,58
	14	57,87
	15	60,37
Média aritmética e desvio padrão da amostra 3		55,082 ± 4,9421
4	16	53,24
	17	53,01
	18	54,05
	19	56,21
	20	49,53
Média aritmética e desvio padrão da amostra 4		53,208 ± 2,4129
Média aritmética e desvio padrão das quatro amostras		51,079 ± 4,2474

TABELA 79

Massas das lâminas prontas de tecido de juta a 45° (a) e (b) com poliéster

AMOSTRA	LÂMINA A 45°	(a) (g)	(b) (g)
1	1	67,79	86,80
	2	68,78	74,88
	3	81,00	81,09
	4	69,84	82,98
	5	77,44	79,47
Média aritmética e desvio padrão da amostra 1		72,97 ± 5,8847	81,044 ± 4,3976
2	6	70,58	71,25
	7	75,02	73,91
	8	75,78	74,19
	9	70,08	81,33
	10	73,91	69,62
Média aritmética e desvio padrão da amostra 2		73,074 ± 2,5977	74,06 ± 4,4861
3	11	84,09	77,37
	12	72,55	89,71
	13	72,00	71,77
	14	78,68	77,58
	15	74,06	81,06
Média aritmética e desvio padrão da amostra 3		76,276 ± 5,0970	79,498 ± 6,6078
4	16	83,62	78,46
	17	81,83	84,17
	18	73,12	86,37
	19	69,52	76,52
	20	75,82	75,00
Média aritmética e desvio padrão da amostra 4		76,782 ± 5,9015	80,104 ± 4,9344
Média aritmética e desvio padrão das quatro amostras		74,7755 ± 2,0357	78,6765 ± 3,1427

TABELA 80

Massas das placas do compósito

AMOSTRA	COMPÓSITO	MASSA (g)
1	1	200,38
	2	216,87
	3	210,60
	4	218,75
	5	234,08
Média aritmética e desvio padrão da amostra 1		216,136 ± 12,3314
2	6	250,93
	7	223,08
	8	262,37
	9	227,00
	10	217,93
Média aritmética e desvio padrão da amostra 2		236,262 ± 19,3157
3	11	237,32
	12	247,29
	13	233,22
	14	230,52
	15	237,68
Média aritmética e desvio padrão da amostra 3		237,206 ± 6,3741
4	16	251,55
	17	219,74
	18	234,82
	19	248,94
	20	223,16
Média aritmética e desvio padrão da amostra 4		235,642 ± 14,4849
Média aritmética e desvio padrão das quatro amostras		231,3115 ± 10,1374

TABELA 81

Massas das placas da matriz de poliuretana

AMOSTRA	POLIURETANA	MASSA (g)
1	1	277,19
	2	273,60
Média aritmética e desvio padrão da amostra 1		275,395 ± 2,538513
2	3	264,65
	4	178,63
Média aritmética e desvio padrão da amostra 2		221,64 ± 60,82533
3	5	181,78
	6	164,10
Média aritmética e desvio padrão da amostra 3		172,94 ± 12,50165
4	7	171,21
	8	249,36
Média aritmética e desvio padrão da amostra 4		210,285 ± 55,26039
5	9	169,55
	10	167,62
Média aritmética e desvio padrão da amostra 5		168,585 ± 1,364716
Média aritmética e desvio padrão das quatro amostras		209,769 ± 43,30259

TABELA 82

Massas das placas da matriz de poliéster

AMOSTRA	POLIURETANA	MASSA (g)
1	1	227,40
	2	196,97
Média aritmética e desvio padrão da amostra 1		212,185 ± 21,51726
2	3	233,84
	4	208,02
Média aritmética e desvio padrão da amostra 2		220,93 ± 18,2575
3	5	253,40
	6	232,24
Média aritmética e desvio padrão da amostra 3		242,82 ± 14,96238
4	7	238,77
	8	201,31
Média aritmética e desvio padrão da amostra 4		220,04 ± 26,48822
5	9	256,50
	10	202,54
Média aritmética e desvio padrão da amostra 5		229,52 ± 38,15548
Média aritmética e desvio padrão das quatro amostras		225,099 ± 11,65466

TABELA 83

Massas das placas da matriz híbrida

AMOSTRA	MATRIZ HÍBRIDA	MASSA (g)
1	1	277,62
	2	284,80
	3	350,54
	4	316,57
	5	395,76
Média aritmética e desvio padrão da amostra 1		325,058 ± 48,96739
2	6	327,46
	7	350,67
	8	251,88
	9	359,55
	10	342,44
Média aritmética e desvio padrão da amostra 2		326,4 ± 43,30009
Média aritmética e desvio padrão das quatro amostras		325,729 ± 0,948937

ANEXO B – Ensaios de tração

TABELA 84

Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO BASE (mm) (extensômetro)	FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	ALONGAMENTO (%)
1	1	9,95	6,34	63,083	50	100,814	1,5981	4,3159	47,41
	2	10,41	6,70	69,747	50	113,367	1,6254	4,0824	49,79
3	5	11,41	4,35	49,6335	50	42,169	0,8496	2,4103	42,01
	6	11,95	3,87	46,2465	50	48,446	1,0476	2,9009	46,33
4	8	10,76	6,44	69,2944	50	52,564	0,7586	2,3830	44,38
Média aritmética		10,896	5,54	59,6009	50	71,472	1,1759	3,2185	45,98
Desvio padrão		0,7945	1,3229	11,0309	0	33,0247	0,4115	0,9223	2,96

* Extensômetro utilizado: E-20 (para grandes deformações).

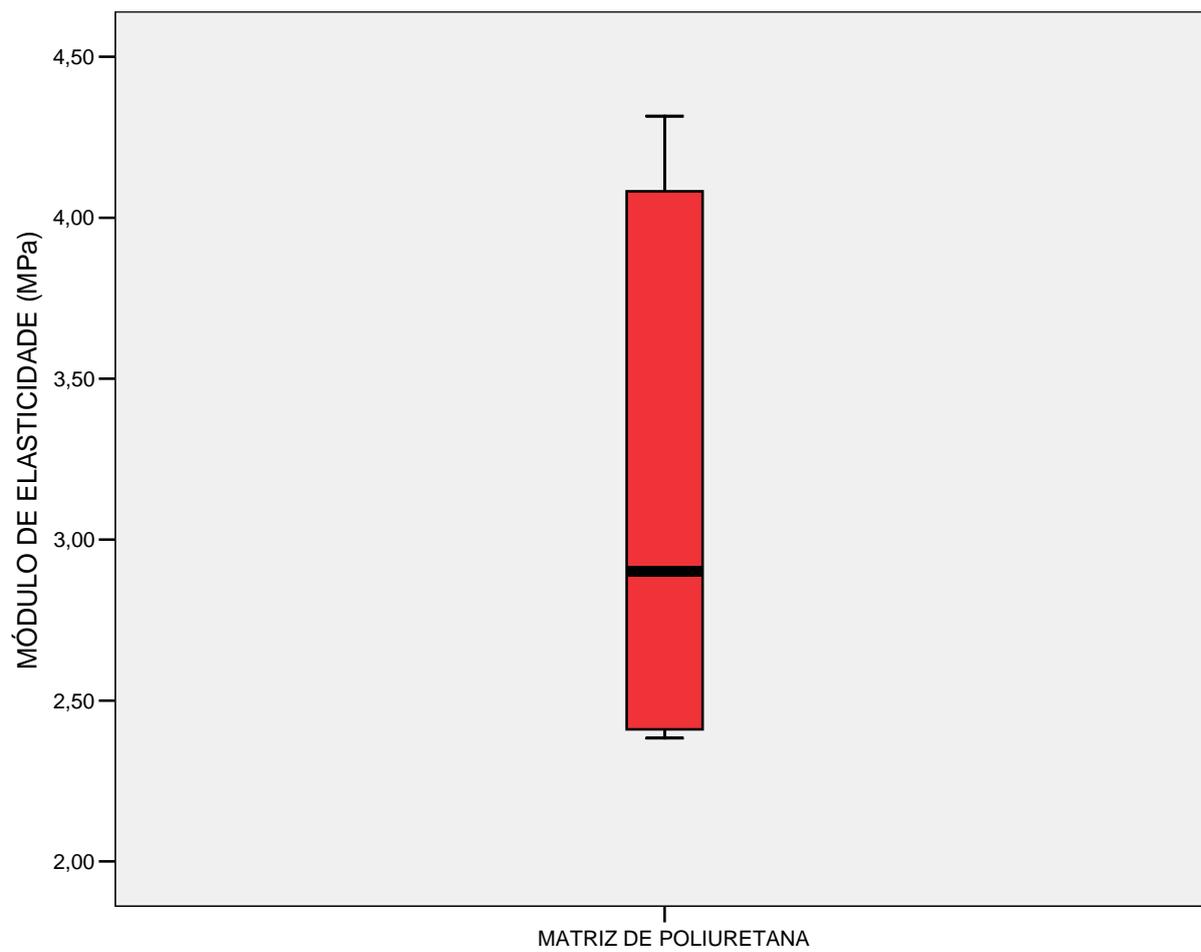


GRÁFICO 20 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliuretana no ensaio de tração: não teve.

TABELA 85

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliuretana no ensaio de tração

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1	x	Partiu em duas partes separadas no meio do corpo de prova
	2	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro
3	5	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro
	6	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro
4	8	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro

TABELA 86

Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO BASE (mm) (extensômetro)	FORÇA MÁXIMA(N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)
2	4	11,07	4,91	54,3537	50	1.773,07	32,6210	2,4713	1,32
3	6	10,71	5,11	54,7281	50	1.729,92	31,6094	2,8223	1,12
4	7	10,92	4,96	54,1632	50	2.235,95	41,2817	2,3725	1,74
5	9	11,06	5,84	64,5904	50	664,90	10,2941	2,3829	0,43
	10	10,90	4,99	54,3910	50	558,99	10,2773	3,0587	0,34
Média aritmética		10,932	5,162	56,4453	50	1.392,566	25,2167	2,6215	0,99
Desvio padrão		0,1465	0,3861	4,5578	0	740,6474	14,1390	0,3056	0,5967

* Extensômetro utilizado: E-10 (para pequenas deformações).

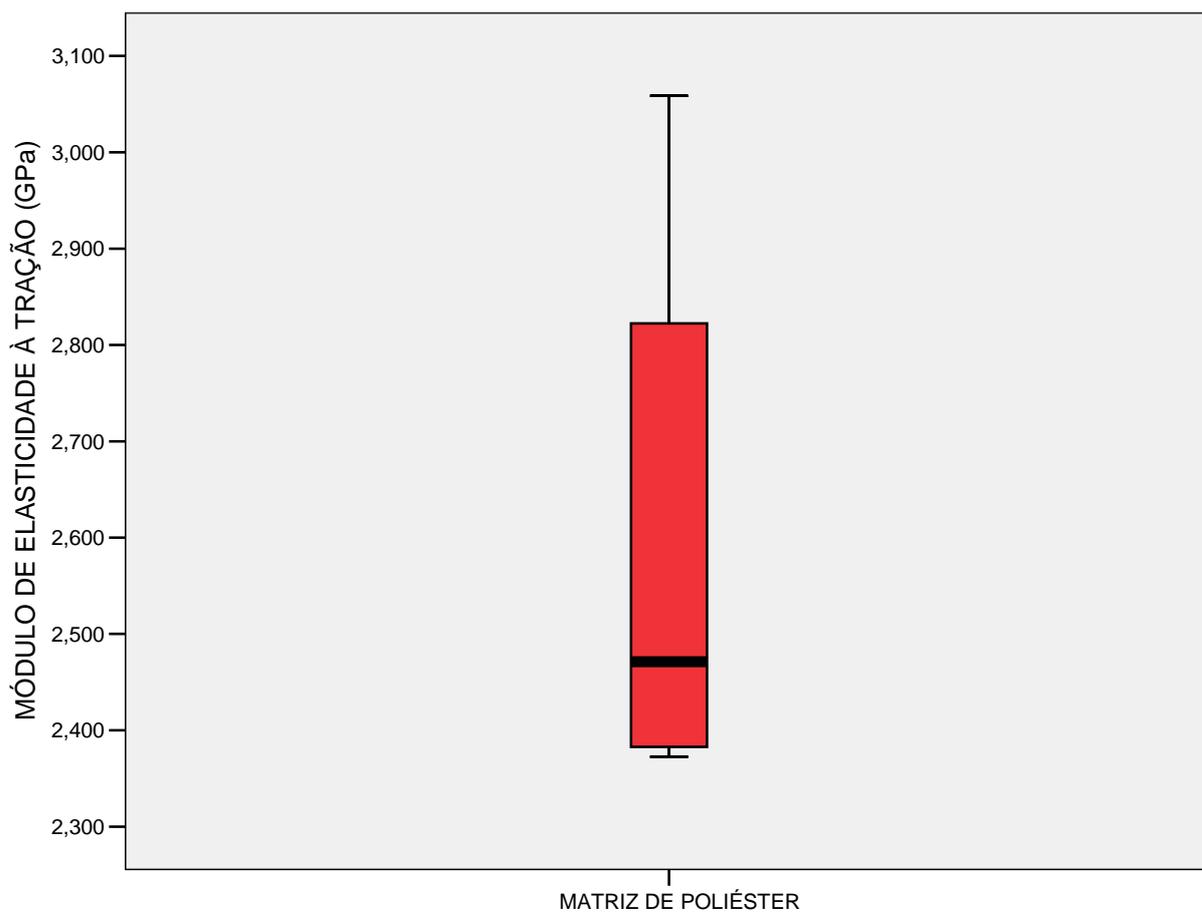


GRÁFICO 21 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliéster no ensaio de tração: não teve.

TABELA 87

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de tração

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
2	4	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro
3	6	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro
4	7	x	Partiu em duas partes separadas no meio do corpo de prova
5	9	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro
	10	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro

TABELA 88

Dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO BASE (mm) (extensômetro)	FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)
1	2	11,75	5,87	68,9725	50	668,82	9,6969	1,2496	0,78
2	3	11,20	6,92	77,504	50	1.080,71	13,9439	0,8126	1,72
4	7	11,33	6,63	75,1179	50	1.443,56	19,2173	1,9141	1,00
Média aritmética		11,4267	6,4733	73,8648	50	1.064,363	14,2860	1,3256	1,17
Desvio padrão		0,2875	0,5423	4,4016	0	387,6286	4,7694	0,5545	0,4917

* Extensômetro utilizado: E-10 (para pequenas deformações).

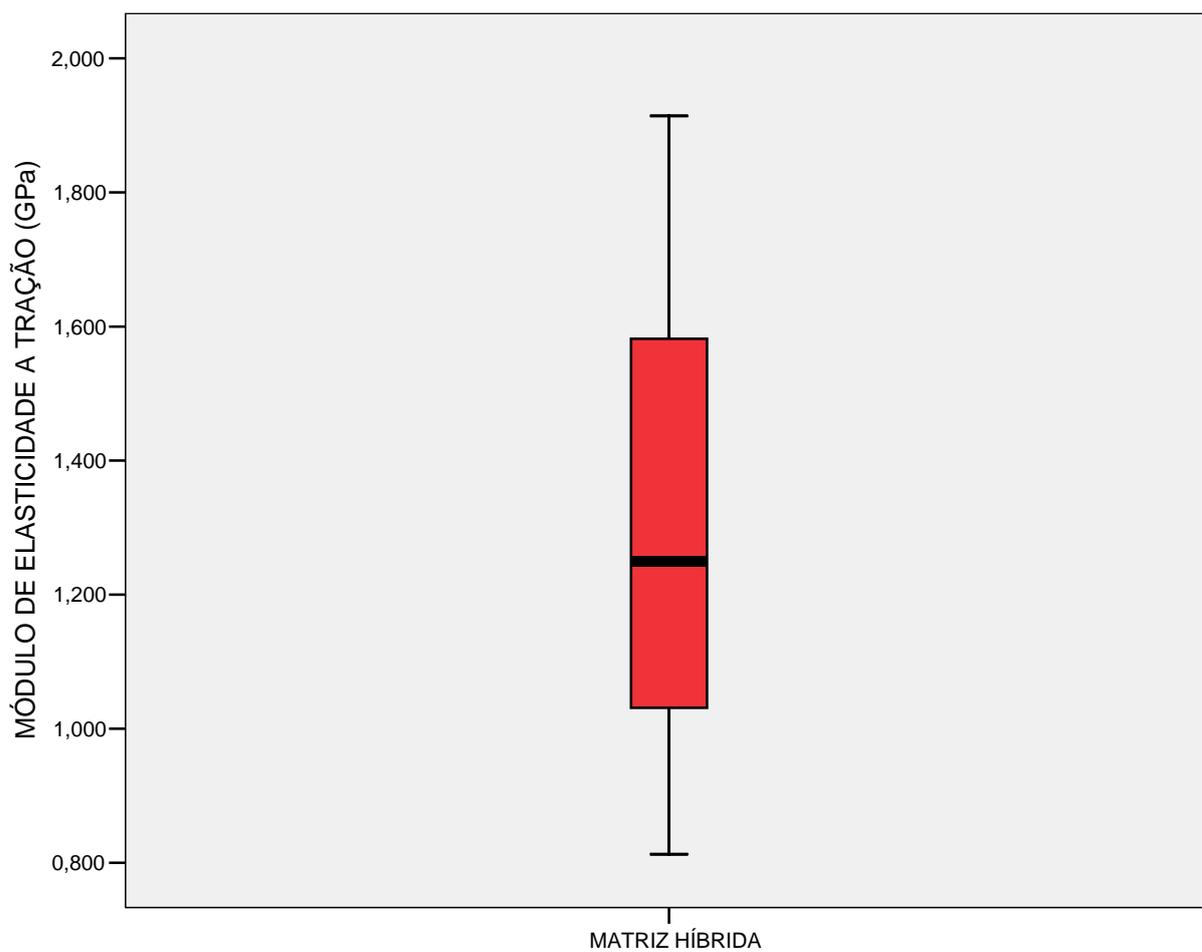


GRÁFICO 22 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz híbrida no ensaio de tração: não teve.

TABELA 89

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de tração

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	2	x	Partiu em duas partes que permaneceram juntas devido à lâmina de poliuretana
2	3	x	Partiu em duas partes separadas no limite do extensômetro
4	7	x	Partiu em duas partes que permaneceram juntas devido à lâmina de poliuretana

TABELA 90

Dados sobre os corpos de prova do tecido de juta a 45° submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO BASE (mm) (extensômetro)	FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	ALONGAMENTO (%)
1	1	15,08	1,00	15,08	50	3,6158	0,2398	0,6855	41,86
	2	15,28	1,00	15,28	50	2,7549	0,1803	0,2252*	40,79
	3	14,95	1,00	14,95	50	5,5099	0,3686	0,9215	46,26
	4	14,83	1,00	14,83	50	4,3046	0,2903	0,9288	36,25
	5	15,28	1,00	15,28	50	2,7549	0,1803	0,2254*	46,02
Média aritmética**		14,9533	1,00	14,9533	50	4,4768	0,2996	0,9212	41,46
Desvio padrão**		0,1250	0	0,1250	0	0,9587	0,0649	0,0077	5,02

* Valores discrepantes do módulo de elasticidade.

** Médias aritméticas e desvios padrões obtidos somente entre os valores válidos.

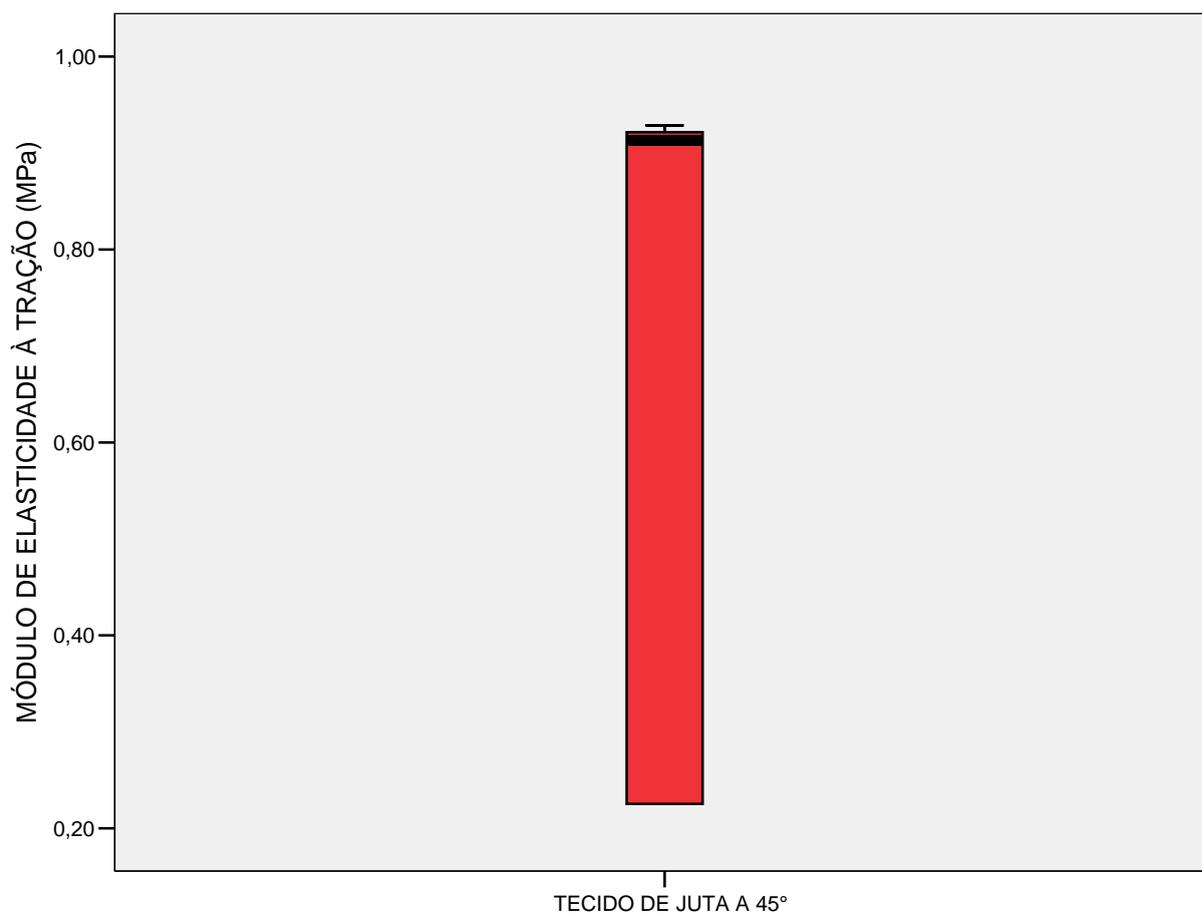


GRÁFICO 23 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do tecido de juta a 45° no ensaio de tração: não teve.

Porém, pelo gráfico de dispersão no GRAF. 24, os corpos de prova 2 e 5 estão muito inferiores à média aritmética de todos eles (0,64MPa), por este motivo foram descartados.

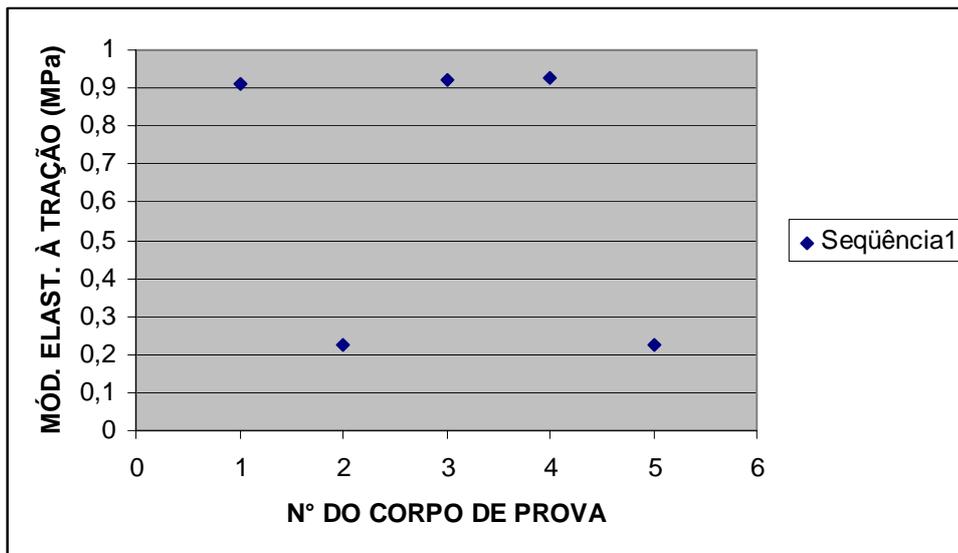


GRÁFICO 24 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do tecido de juta a 45° no ensaio de tração: corpos de prova n^{os} 2 e 5.

TABELA 91

Comportamento dos corpos de prova do tecido de juta a 45° submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1	x	As fibras romperam no meio do corpo de prova
	2	x	As fibras romperam no meio do corpo de prova
	3	x	As fibras romperam no meio do corpo de prova
	4	x	As fibras romperam no limite do extensômetro
	5	x	As fibras romperam no limite do extensômetro

TABELA 92

Dados sobre os corpos de prova do tecido de juta a 90° submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO BASE (mm) (extensômetro)	FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	ALONGAMENTO (%)
1	1	15,00	1,00	15,00	50	125,87	8,3913	92,9344	16,16
	2	14,99	1,00	14,99	50	176,83	11,9765	102,3416	18,29
	3	14,99	1,00	14,99	50	123,28	8,2242	75,6434	14,93
	4	15,00	1,00	15,00	50	216,95	14,4633	103,8368	19,37
	5	15,03	1,00	15,03	50	30,82	2,0506	35,644*	11,46
Média aritmética**		14,995	1,00	14,995	50	160,7325	10,7638	93,6891	17,19
Desvio padrão**		0,0058	0	0,0058	0	44,8613	3,0130	12,9622	2,01

* Valores discrepantes do módulo de elasticidade.

** Médias aritméticas e desvios padrões obtidos somente entre os valores válidos.

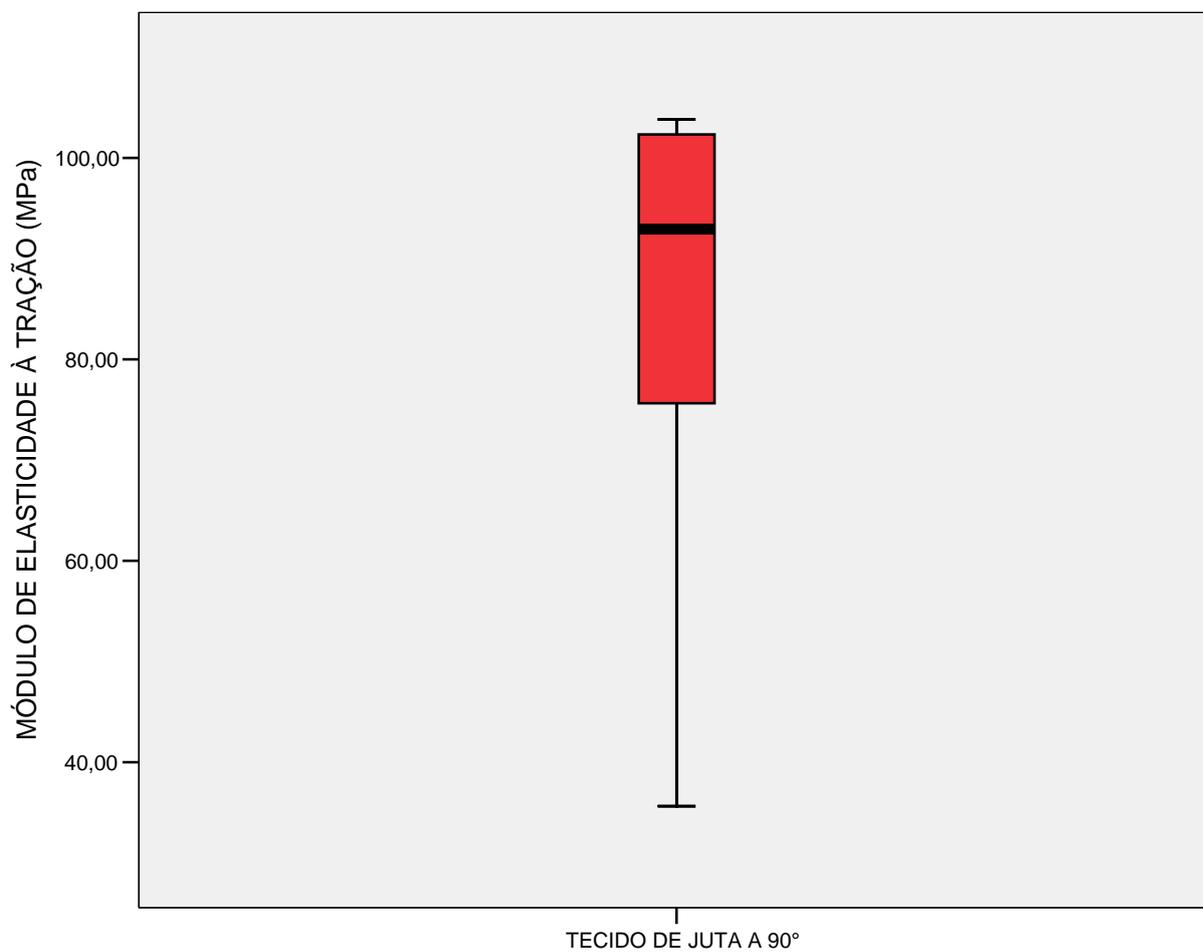


GRÁFICO 25 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do tecido de juta a 90° no ensaio de tração: não teve.

Porém, pelo gráfico de dispersão no GRAF. 26, o corpo de prova n° 5 deveria ser descartado.

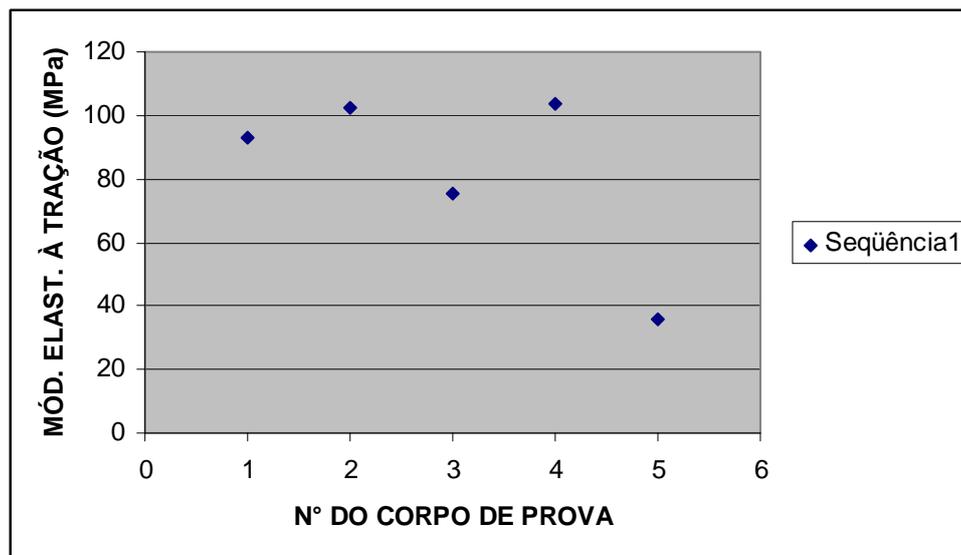


GRÁFICO 26 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do tecido de juta a 90° no ensaio de tração: corpo de prova n° 5.

TABELA 93

Comportamento dos corpos de prova do tecido de juta a 90° submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1	x	As fibras não romperam
	2	x	As fibras não romperam
	3	x	As fibras não romperam
	4	x	As fibras não romperam
	5	x	As fibras não romperam

TABELA 94

Dados sobre os corpos de prova do reforço submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO BASE (mm) (extensômetro)	FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	ALONGAMENTO (%)
1	1	14,98	3,00	44,94	50	109,68	2,4406	161,1938	1,56
	2	15,04	3,00	45,12	50	74,90	1,6600	155,5204	1,20
	3	15,00	3,00	45,00	50	61,64	1,3698	113,5189*	1,43
	4	14,97	3,00	44,91	50	70,08	1,5604	161,9028	1,11
	5	14,98	3,00	44,94	50	55,27	1,2299	143,5730	1,03
Média aritmética**		14,9925	3,00	44,9775	50	77,4825	1,7227	155,5475	1,23
Desvio padrão**		0,0320	0	0,0961	0	23,0329	0,5127	8,4786	0,23

* Valores discrepantes do módulo de elasticidade.

** Médias aritméticas e desvios padrões obtidos somente entre os valores válidos.

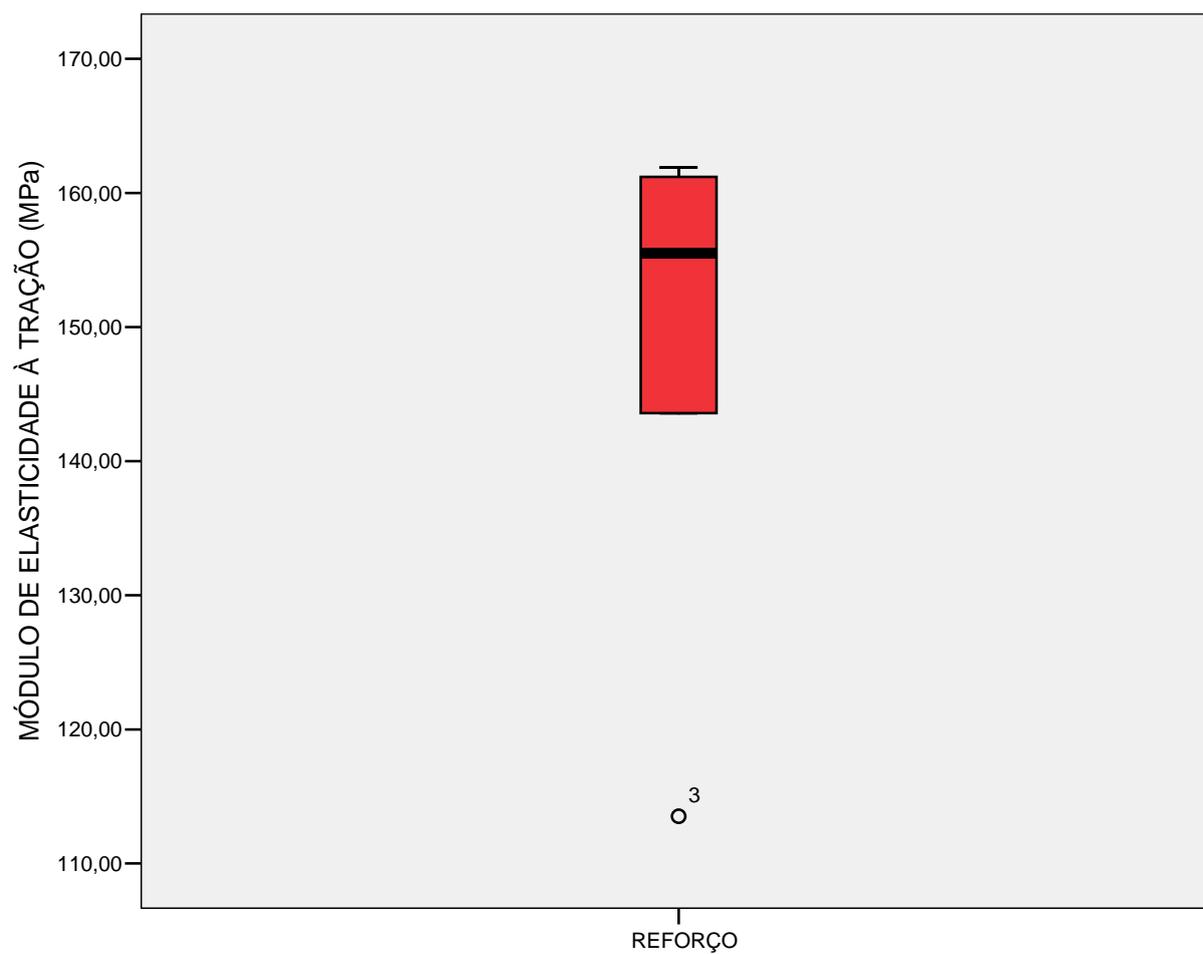


GRÁFICO 27 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do reforço no ensaio de tração: corpo de prova n° 3.

TABELA 95

Comportamento dos corpos de prova do reforço submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1	x	As fibras não romperam
	2	x	As fibras romperam
	3	x	As fibras não romperam
	4	x	As fibras não romperam
	5	x	As fibras não romperam

TABELA 96

Dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de tração

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO BASE (mm) (extensômetro)	FORÇA MÁXIMA (N)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)
1	2	9,06	5,81	52,6386	50	300,58	5,7103	1,5719	0,80
2	10	8,44	5,35	45,154	50	315,78	6,9934	1,6665	0,66
3	11	7,54	6,05	45,617	50	548,69	12,0282	1,7335	0,74
	14	9,31	6,55	60,9805	50	347,73	5,6367	1,3338	0,71
	15	9,55	6,99	66,7545	50	302,02	4,5248	1,4349	0,40
4	19	9,56	7,09	67,7804	50	461,90	6,8147	1,3222	1,08
Média aritmética		8,91	6,3067	56,4875	50	379,45	6,95135	1,510467	0,731667
Desvio padrão		0,7890	0,6881	10,1445	0	102,6802	2,643918	0,173338	0,219856

* Extensômetro utilizado: E-10 (para pequenas deformações).

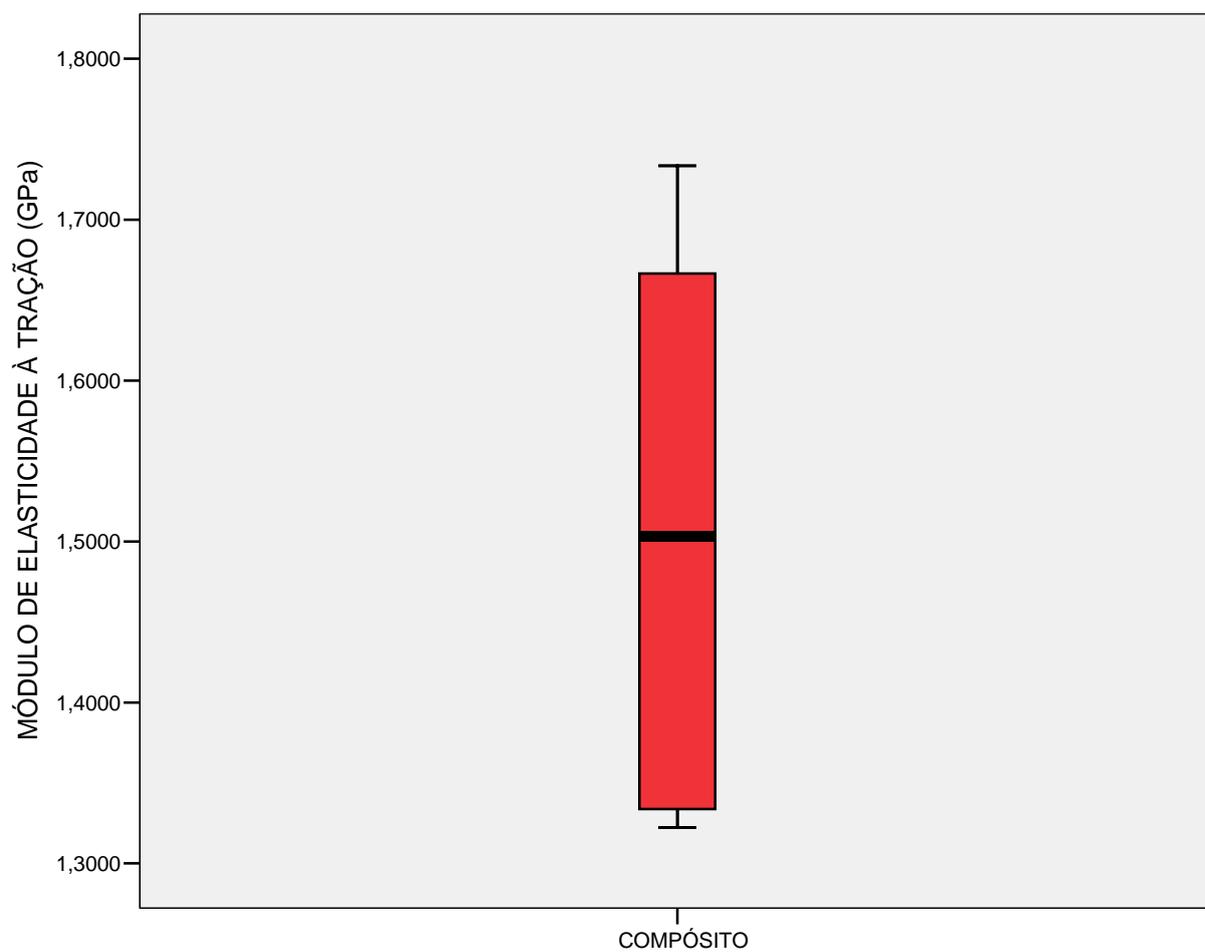


GRÁFICO 28 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do compósito no ensaio de tração: não teve.

TABELA 97

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de tração

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	2	x	Rompeu uma lâmina externa de poliéster e juta e apareceu uma trinca no poliéster da lâmina oposta
2	10	x	Rompeu uma lâmina externa de poliéster e juta e apareceu uma trinca no poliéster da lâmina oposta
3	11	x	Apareceu uma trinca em uma das lâminas de poliéster e juta
	14	x	Rompeu uma lâmina externa de poliéster e juta e apareceu uma trinca no poliéster da lâmina oposta
	15	x	Apareceu uma trinca em uma das lâminas de poliéster e juta
4	19	x	Apareceu uma trinca em uma das lâminas de poliéster e juta

ANEXO C – Ensaios de compressão

TABELA 98

Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliuretana submetidos ao ensaio de compressão

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)
1	2	12,37	13,70	169,469	24,82	160,34	2,6067	0,9461	50,60
2	3	13,48	14,31	192,899	26,06	123,57	2,1397	0,6406	39,79
	4	14,30	8,60	122,980	25,98	125,04	3,1311	1,0168	41,34
3	6	13,56	7,84	106,310	26,67	98,56	3,6065	0,9271	33,97
4	7	12,92	7,56	97,675	25,08	75,02	3,6259	0,7681	30,30
5	9	14,18	10,02	142,084	26,12	167,70	3,1210	1,1803	57,24
	10	13,21	8,38	110,610	26,25	92,67	2,9312	0,8378	38,36
Média aritmética		13,4314	10,0586	134,5753	25,8543	120,4143	3,0236	0,9024	41,66
Desvio padrão		0,6799	2,8121	35,4611	0,6608	34,5672	0,5303	0,1749	9,36

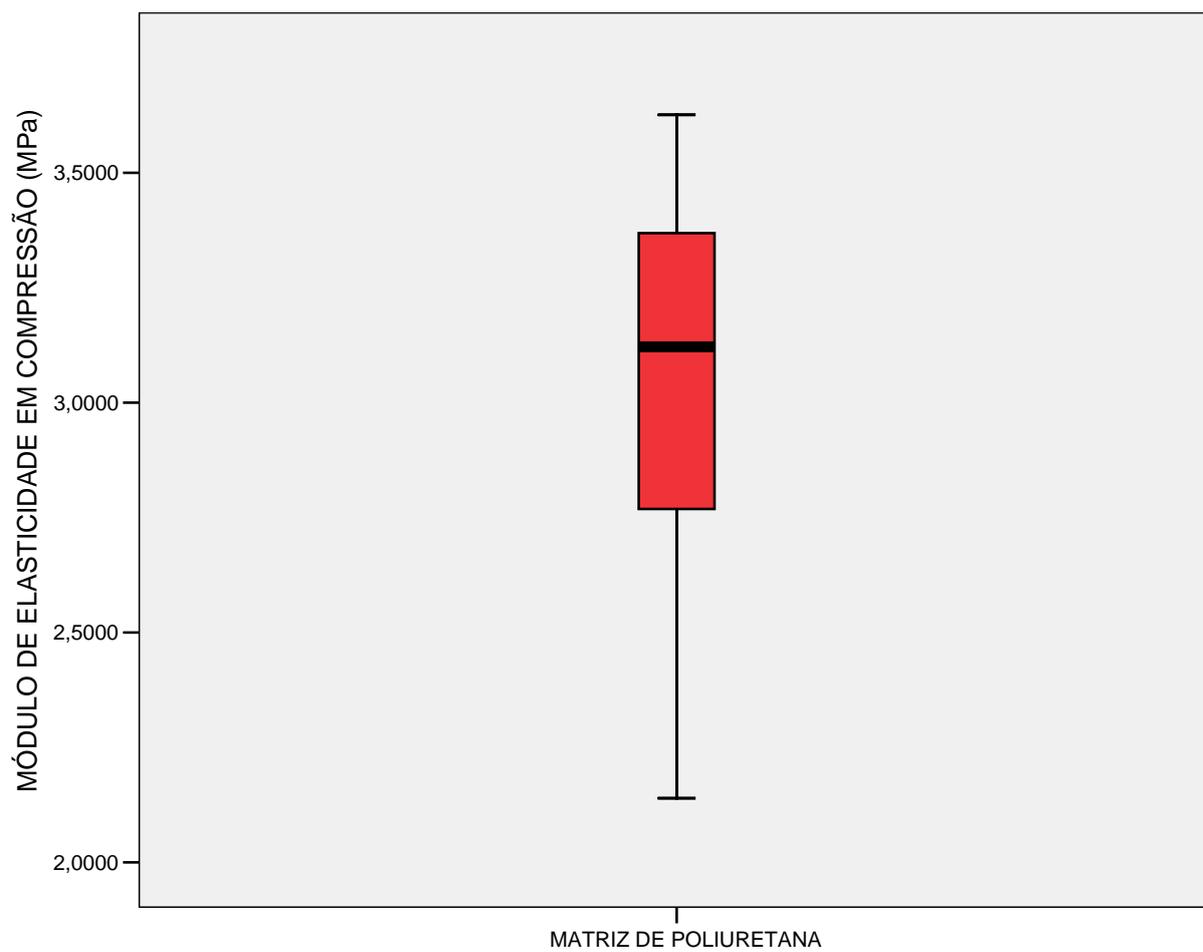


GRÁFICO 29 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliuretana no ensaio de compressão: não teve.

TABELA 99

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliuretana no ensaio de compressão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	2	x	O corpo de prova foi separado em duas partes, deformando e, após a retirada da força, as duas partes retornaram as suas formas originais
2	3	x	O corpo de prova foi separado em duas partes, deformando e, após a retirada da força, as duas partes retornaram as suas formas originais
	4	0	O corpo de prova deformou com a aplicação a força e, após a retirada da mesma, retomou sua forma original
3	5	x	O corpo de prova não descolou, porém, partiu ao meio na sua dimensão paralela à força aplicada
	6	0	O corpo de prova deformou com a aplicação a força e, após a retirada da mesma, retomou sua forma original
4	7	0	O corpo de prova deformou com a aplicação a força e, após a retirada da mesma, retomou sua forma original
	8	x	O corpo de prova foi separado em duas partes, deformando e, após a retirada da força, as duas partes retornaram as suas formas originais
5	9	0	O corpo de prova deformou com a aplicação a força e, após a retirada da mesma, retomou sua forma original
	10	0	O corpo de prova deformou com a aplicação a força e, após a retirada da mesma, retomou sua forma original

TABELA 100

Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster submetidos ao ensaio de compressão

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)
1	1	13,09	10,32	135,0888	25,59	6.207,71	5,4860	45,9528	59,36
	2	13,25	9,11	120,7075	24,93	6.045,90	4,9002	50,0872	63,58
2	3	13,15	10,76	141,4940	24,83	4.848,49	4,1974	34,2664	61,74
	4	12,82	9,80	125,6360	25,12	9.789,64	4,7438	77,9207	65,37
3	5	12,41	12,56	155,8696	25,62	5.832,60	3,7779	37,4197	64,05
	6	12,88	10,03	129,1864	25,43	8.355,40	5,7008	64,6771	64,78
4	7	12,64	10,20	128,9280	25,34	9.385,11	4,5891	72,7934	64,48
	8	13,07	9,18	119,9826	25,33	4.195,35	4,9293	34,9663	63,92
5	9	12,99	11,49	149,2551	26,21	7.252,13	5,9156	76,0306	63,91
	10	13,44	8,84	118,8096	26,10	5.222,12	6,2152	72,2868	60,81
Média aritmética		12,974	10,229	132,4958	25,45	6.713,45	5,04553	56,6401	63,2
Desvio padrão		0,2999	1,1460	12,7736	0,4521	1.917,96	0,775224	17,93852	1,92

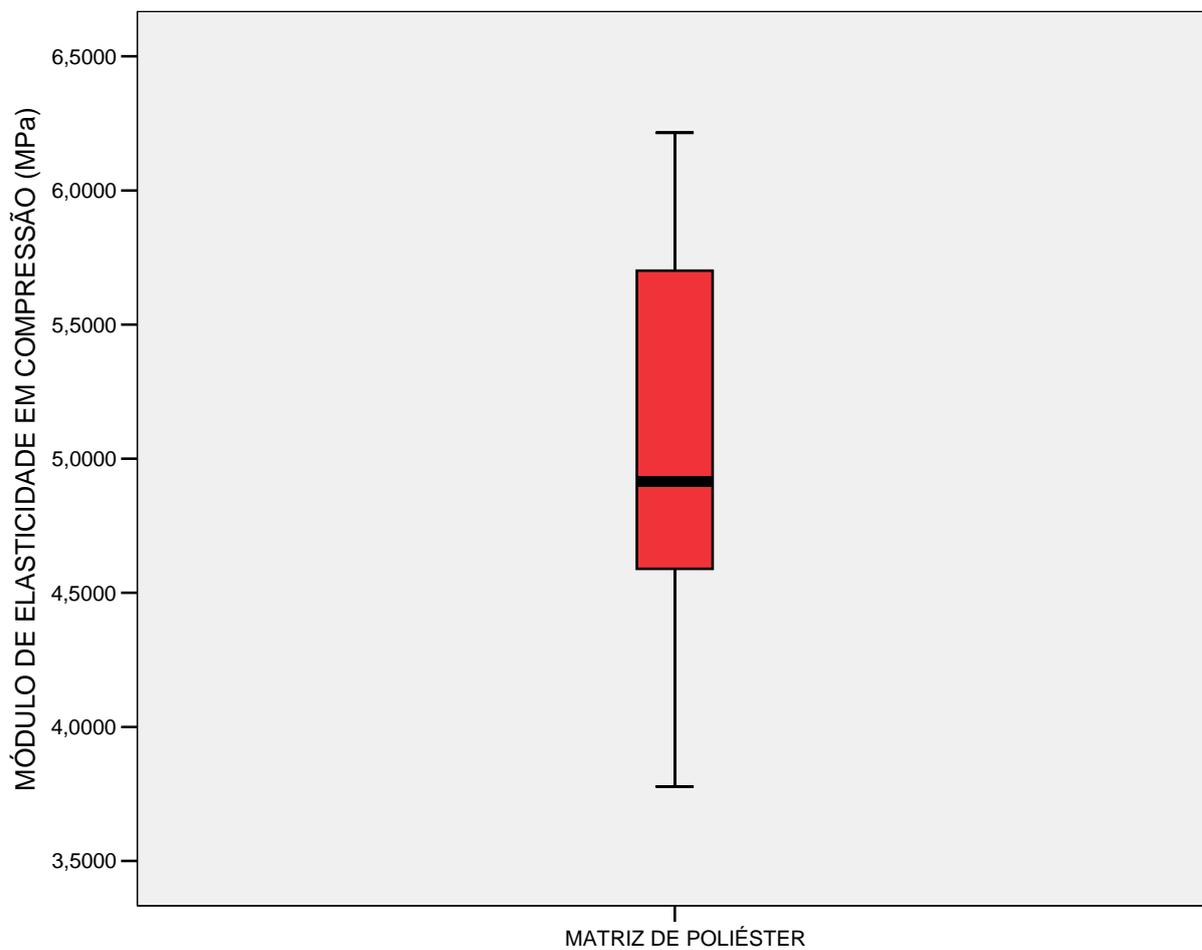


GRÁFICO 30 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliéster no ensaio de compressão: não teve.

TABELA 101

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de compressão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1	x	O corpo de prova foi separado em duas partes e teve um pedaço lascado
	2	x	O corpo de prova foi quebrado em várias partes
2	3	x	O corpo de prova foi separado em duas partes e teve um pedaço lascado
	4	x	O corpo de prova foi quebrado em duas partes
3	5	x	O corpo de prova foi separado em duas partes e teve um pedaço lascado
	6	x	O corpo de prova foi quebrado em várias partes
4	7	x	O corpo de prova foi quebrado em várias partes
	8	x	O corpo de prova foi separado em duas partes e teve um pedaço lascado
5	9	x	O corpo de prova foi quebrado em duas partes
	10	x	O corpo de prova foi quebrado em várias partes

TABELA 102

Dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de compressão

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)
1	1	13,16	11,44	150,5504	25,77	1.610,77	4,3274	10,6992	56,50
	2	12,82	13,42	172,0444	25,50	2.118,27	4,3265	12,3123	53,45
2	3	13,30	16,49	219,3170	25,08	789,94	2,9843	3,6018	55,30
	4	14,09	9,90	139,4910	26,98	544,28	4,9198	3,9019	47,04
3	5	12,18	15,98	194,6364	24,92	3.430,42	3,3684	17,6248	54,70
	6	13,62	16,00	217,9200	24,85	3.312,74	3,9373	15,2016	55,86
4	7	13,36	18,05	241,1480	25,83	6.215,06	2,4428	25,7728	57,10
	8	13,36	13,19	176,2184	27,32	500,15	3,7162	2,8382	48,50
5	9	13,93	15,90	221,4870	25,76	3.536,33	3,2075	15,9663	55,51
	10	13,10	16,05	210,2550	24,88	862,02	3,3961	4,0999	61,70
Média aritmética		13,292	14,642	194,3068	25,689	2.292,00	3,6626	11,2019	54,57
Desvio padrão		0,5451	2,5510	33,5205	0,8638	1.835,974	0,7344	7,6390	4,20

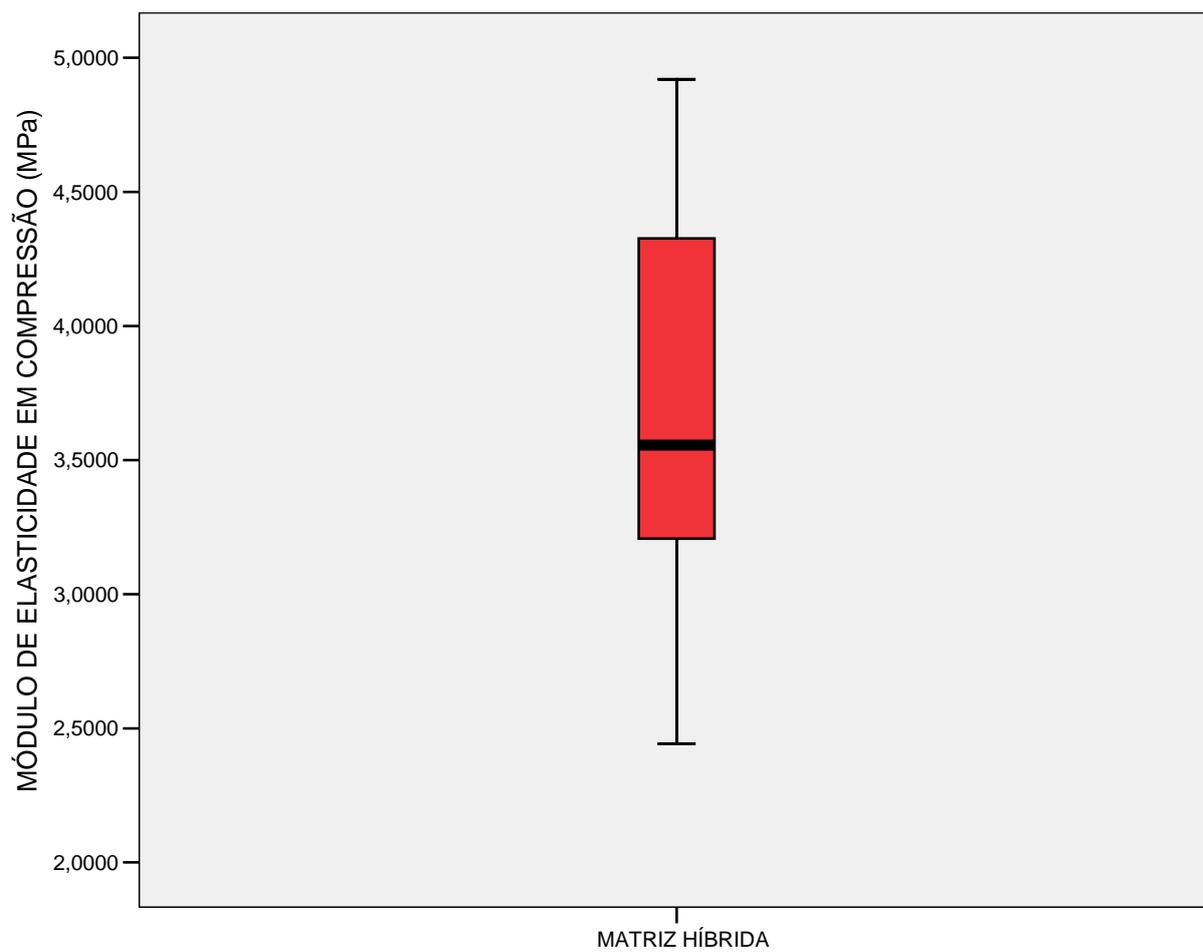


GRÁFICO 31 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz híbrida no ensaio de compressão: não teve.

TABELA 103

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de compressão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1	x	O corpo de prova foi separado em duas partes somente
	2	x	O corpo de prova foi quebrado em duas partes e uma delas foi partida em duas
2	3	x	O corpo de prova foi separado em duas partes somente
	4	x	O corpo de prova foi separado em duas partes somente
3	5	x	O corpo de prova foi separado em duas partes somente
	6	x	O corpo de prova foi separado em duas partes somente
4	7	x	O corpo de prova foi separado em duas partes somente
	8	x	O corpo de prova foi quebrado em duas partes e uma delas foi partida em duas
5	9	x	O corpo de prova foi separado em duas partes somente
	10	x	O corpo de prova foi separado em duas partes somente

TABELA 104

Dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de compressão

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)
1	1	13,38	10,57	141,4266	25,98	563,40	4,1895	3,9837	52,89
	2	11,96	10,69	127,8524	24,28	697,26	4,8481	5,4536	54,57
	3	12,97	9,99	129,5703	25,72	670,79	4,3345	5,1770	51,91
	5	11,14	13,66	152,1724	24,17	482,49	3,6995	3,1707	54,61
2	6	12,89	13,04	168,0856	25,30	951,75	4,6059	5,6623	52,33
	9	13,24	11,11	147,0964	24,94	839,95	4,0227	5,7102	55,65
	10	12,92	11,53	148,9676	25,48	673,73	4,9535	4,5227	53,06

TABELA 104 (continuação)

Dados sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de compressão

AMOSTRA	NÚMERO DO CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (larg. x esp.) (mm ²)	COMPRIMENTO (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)
3	12	12,14	13,87	168,3818	24,75	529,57	3,5989	3,1451	58,02
	13	12,86	13,31	171,1666	24,13	735,51	3,8016	4,2627	55,66
	14	12,38	13,25	164,0350	24,20	1.243,01	3,6169	7,5777	56,49
	15	13,01	15,19	197,6219	23,67	1.176,82	3,0118	5,9549	57,16
4	17	12,14	12,11	147,0154	24,82	729,63	4,4058	4,9630	54,84
	18	14,75	13,22	194,9950	24,65	569,29	3,2272	2,9195	57,28
	19	13,93	14,18	197,5274	25,49	1.000,29	3,2881	5,0641	51,35
	20	13,23	12,66	167,4918	25,04	1.004,71	3,5186	5,9986	56,71
Média aritmética		12,8627	12,5587	161,5604	24,8413	791,2133	3,9415	4,9044	54,84
Desvio padrão		0,8595	1,5026	22,6259	0,6686	235,9172	0,5980	1,2684	2,12

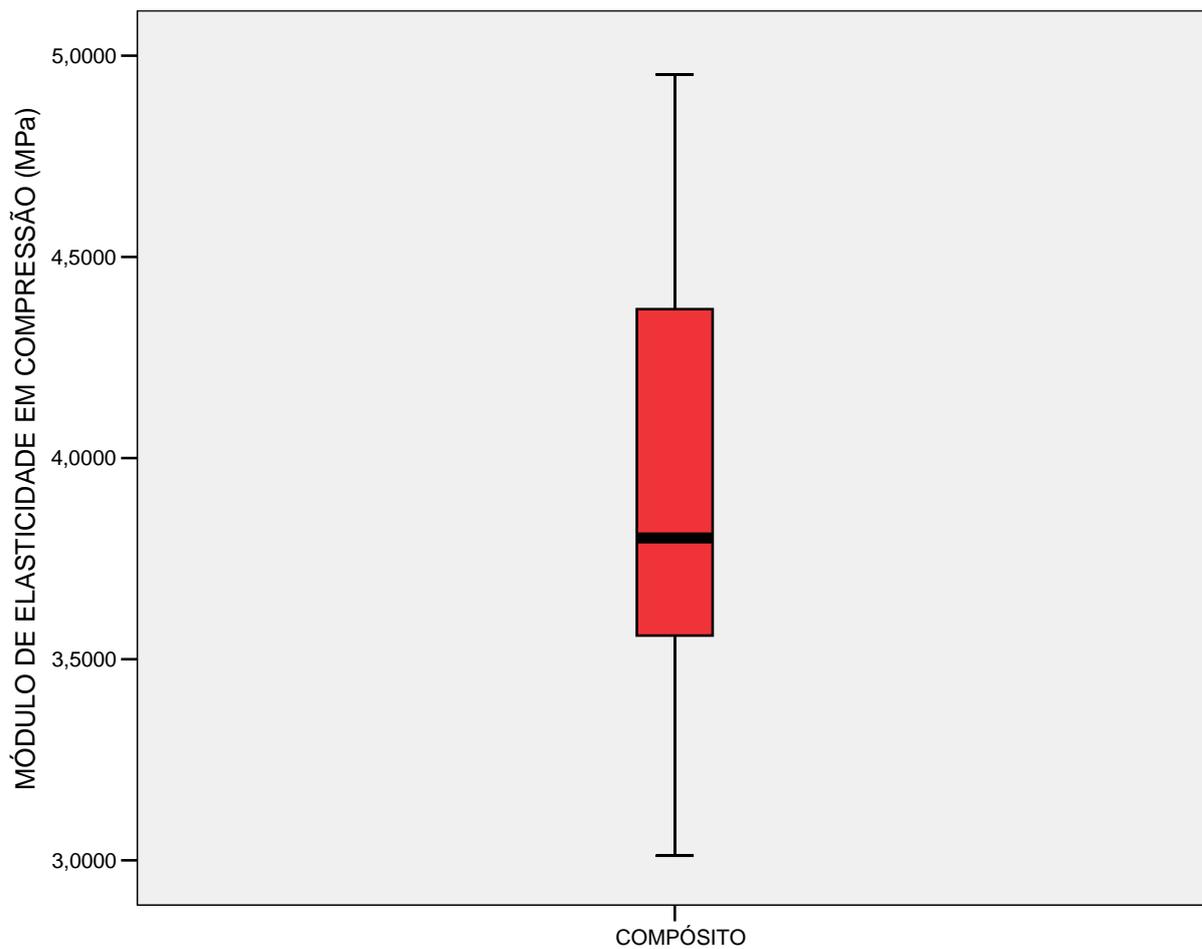


GRÁFICO 32 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do compósito no ensaio de compressão: não teve.

TABELA 105

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de compressão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster e juta e em duas lâminas de poliéster e juta) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	2	x	Houve delaminação total do corpo de prova e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	3	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e uma das partes foi quase separada ao meio
	4	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e depois, as duas partes escapuliram do equipamento sem outros danos
	5	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta

TABELA 105 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de compressão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
2	6	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster), uma parte escapuliu do equipamento e na outra surgiu uma trinca no meio do corpo de prova nas duas lâminas de poliéster e juta
	7	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e de uma lâmina de poliéster e juta. Depois, o corpo de prova escapuliu do equipamento
	8	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e das duas lâminas de poliéster e juta de cada parte. Depois, o corpo de prova escapuliu do equipamento
	9	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	10	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta

TABELA 105 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de compressão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
3	11	x	O corpo de prova escapuliu do equipamento
	12	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	13	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	14	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	15	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta

TABELA 105 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de compressão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
4	16	x	O corpo de prova escapuliu do equipamento
	17	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	18	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	19	x	Houve delaminação parcial (na união das duas lâminas de poliéster) e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta
	20	x	Houve delaminação total do corpo de prova e surgimento de uma trinca no meio do corpo de prova somente nas lâminas de poliéster e juta

ANEXO D – Ensaios de flexão

TABELA 106

Dados sobre os corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	FORÇA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DEFLEXÃO (mm)	DEFORMAÇÃO (%)
1	1	9,82	5,07	65,951	37,6233	0,84	12,80	4,23
	2	9,46	4,46	57,615	44,0897	1,09	12,80	3,70
2	3	9,27	4,82	82,132	54,9163	1,29	12,79	4,01
	4	9,30	4,87	40,453	26,4102	1,09	8,53	2,71
3	5	9,11	5,43	136,56	73,2096	1,52	12,77	4,51
	6	9,72	5,12	118,417	66,9222	1,51	12,80	4,27
4	7	9,81	4,89	86,75	53,2531	1,22	12,78	4,07
	8	9,12	4,38	70,364	57,9122	1,57	12,80	3,65
	9	9,67	5,84	106,649	46,5658	0,94	12,78	4,86
	10	8,90	5,42	92,184	50,7726	1,14	12,79	4,51
Média aritmética		9,418	5,03	85,7075	51,1675	1,221	12,364	4,05
Desvio padrão		0,3265	0,4490	29,0845	13,6046	0,2504	1,3472	0,60

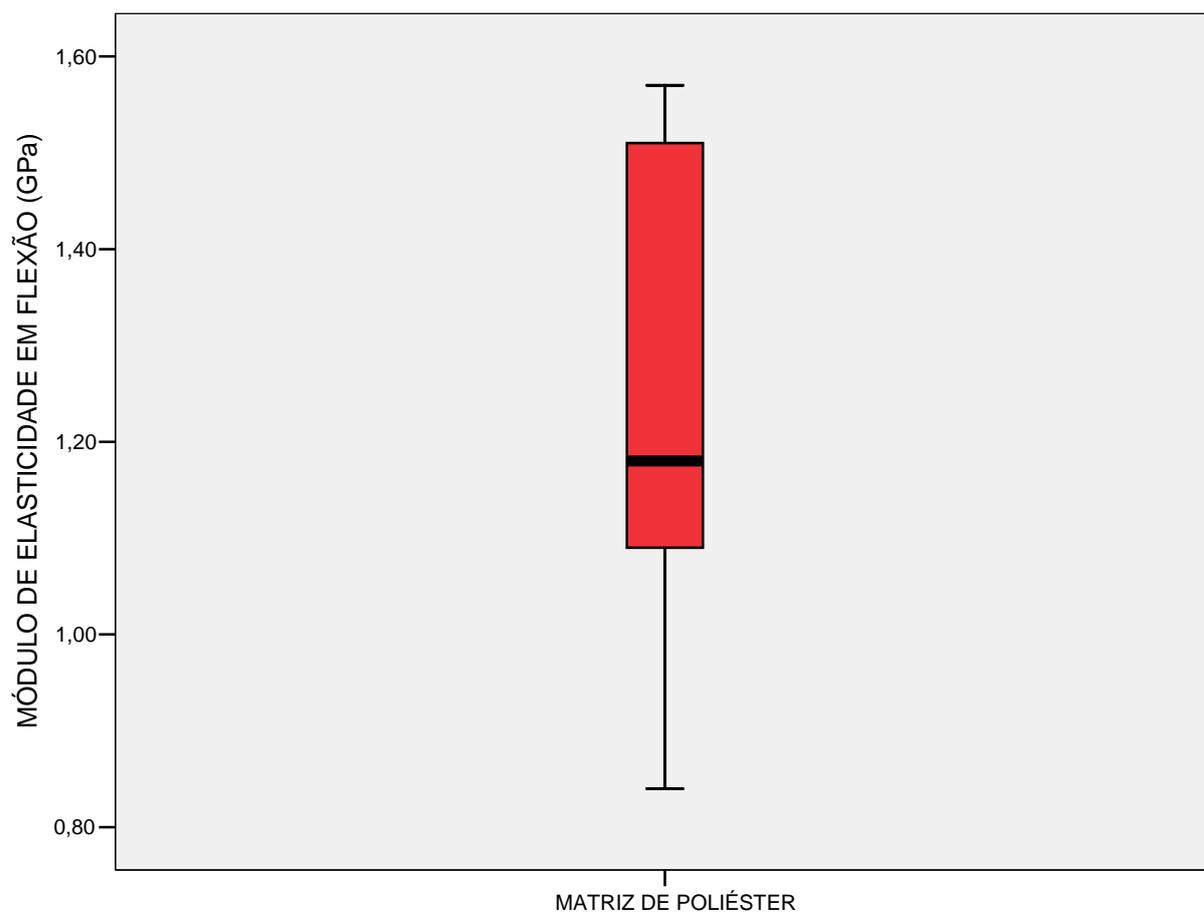


GRÁFICO 33 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz de poliéster no ensaio de flexão: não teve.

TABELA 107

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1	x	Quebrou em quatro partes
	2	x	Quebrou em duas partes
2	3	x	Quebrou em quatro partes
	4	x	Quebrou em cinco partes
3	5	x	Quebrou em quatro partes
	6	x	Quebrou em quatro partes
4	7	x	Quebrou em duas partes
	8	x	Quebrou em quatro partes
5	9	x	Quebrou em cinco partes
	10	x	Quebrou em quatro partes

TABELA 108

Dados sobre os corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	FORÇA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DEFLEXÃO (mm)	DEFORMAÇÃO (%)
1	1	10,84	6,04	58,596	21,3367	0,43*	12,68	4,99
	2	10,51	6,17	28,195	10,1476	0,14*	9,63	3,87
2	3	9,47	7,28	47,563	13,6464	0,27	10,52	4,99
3	5	9,63	9,25	61,538	10,7547	0,22	8,30	5,00
	6	10,18	7,92	34,079	7,6851	0,15*	9,67	4,99
4	7	9,19	7,01	63,744	20,3259	0,43*	10,95	5,00
	8	9,94	5,45	21,33	10,4034	0,23	12,78	4,53
5	9	8,41	8,14	50,26	12,9879	0,23	9,41	4,99
	10	9,96	7,31	49,034	13,2668	0,27	10,47	4,98
Média aritmética**		9,482	7,486	45,945	12,2118	0,244	10,296	4,90
Desvio padrão**		0,6344	1,3927	14,8309	1,5138	0,0241	1,6598	0,21

* Valores discrepantes do módulo de elasticidade.

** Médias aritméticas e desvios padrões obtidos somente entre os valores válidos.

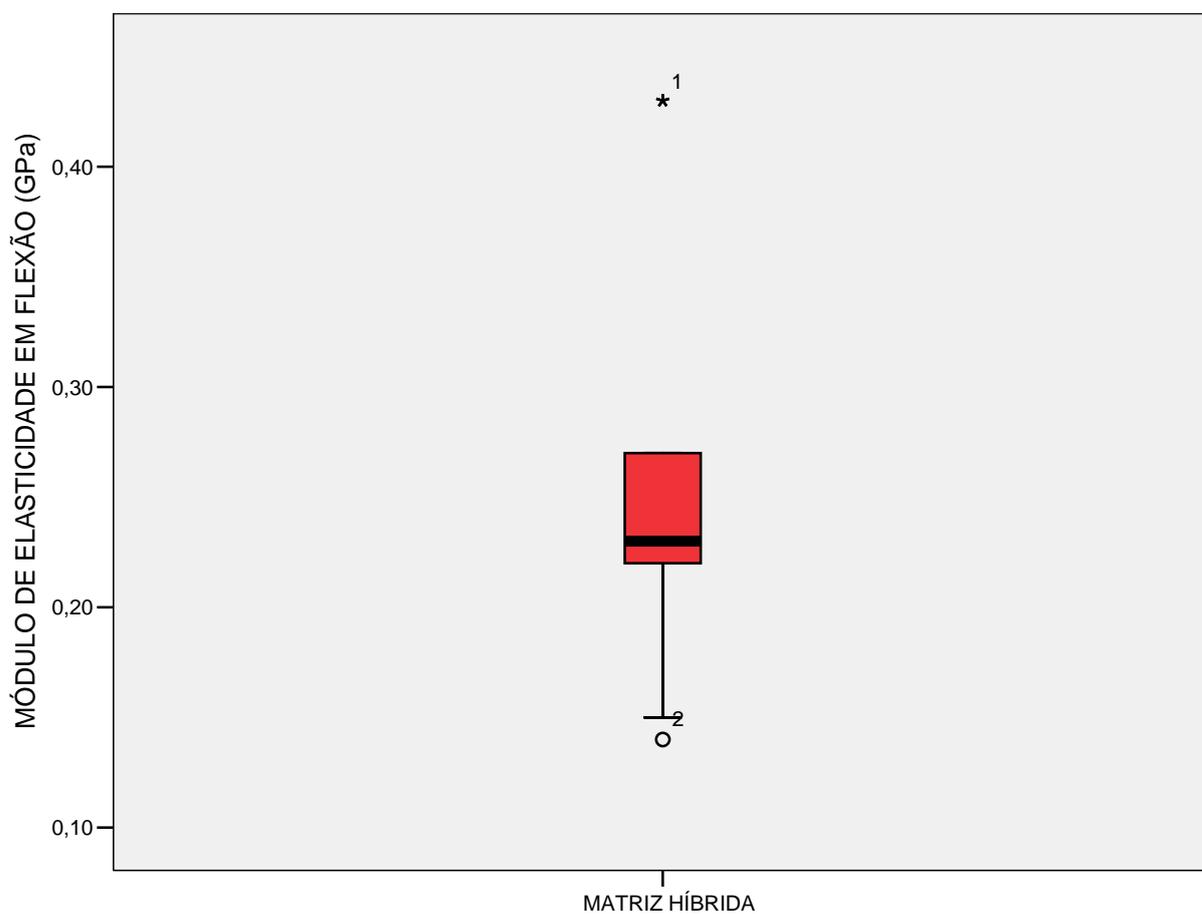


GRÁFICO 34 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade da matriz híbrida no ensaio de flexão: corpos de prova n^{os} 1 e 2. Pelos valores similares a esses módulos, os corpos de prova n^{os} 6 e 7 também devem ser descartados.

TABELA 109

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO COMPRIMIDA	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO TRACIONADA	DELAMINAÇÃO
1	1	x	Nada ocorreu	Nada ocorreu	Ocorreu uma delaminação em uma das extremidades da lâmina de poliéster na região tracionada
	2	x	Nada ocorreu	Nada ocorreu	Ocorreu uma delaminação em uma das extremidades da lâmina de poliéster na região tracionada
2	3	x	Apareceu uma trinca na lâmina de poliéster	Nada ocorreu	Ocorreu uma delaminação em uma das extremidades da lâmina de poliéster na região tracionada
3	5	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca na lâmina de poliéster	Ocorreu uma delaminação em uma das extremidades da lâmina de poliéster na região tracionada
	6	x	Apareceram duas trincas na lâmina de poliéster	Nada ocorreu	Soltou um pedaço em uma das extremidades da lâmina de poliéster na região comprimida

TABELA 109 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO COMPRIMIDA	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO TRACIONADA	DELAMINAÇÃO
4	7	x	Nada ocorreu	Nada ocorreu	Ocorreu uma delaminação em uma das extremidades da lâmina de poliéster na região comprimida
	8	x	Nada ocorreu	Apareceram quatro trincas na lâmina de poliéster	Na região tracionada, soltou um pedaço da lâmina de poliéster (entre duas trincas)
5	9	x	Apareceu uma trinca na lâmina de poliéster	Nada ocorreu	Não ocorreu delaminação
	10	x	Nada ocorreu	Nada ocorreu	Ocorreu uma delaminação em uma das extremidades da lâmina de poliéster na região tracionada

TABELA 110

Dados sobre os corpos de prova do compósito no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	FORÇA (N)	RESISTÊNCIA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DEFLEXÃO (mm)	DEFORMAÇÃO (%)
1	1	8,50	5,00	11,768	7,9546	0,17	12,80	4,17
	2	8,67	5,54	0,925	0,5006	0,01	12,77	4,61
	3	8,58	5,16	11,033	6,9546	0,16	12,78	4,29
	4	8,24	5,08	11,768	7,9691	0,17	12,79	4,23
	5	8,31	6,50	13,239	5,4299	0,11	11,81	5,00
2	6	8,88	6,20	15,201	6,4127	0,13	12,36	4,99
	7	7,70	5,76	4,658	2,6256	0,05	12,80	4,80
	8	8,72	7,03	6,865	2,2939	0,05	10,91	4,99
	9	8,42	6,07	6,374	2,9586	0,06	12,64	5,00
	10	8,45	5,27	13,73	8,4247	0,20	12,80	4,39
3	11	9,04	6,21	12,504	5,1649	0,16	8,24	3,33
	12	7,83	6,61	4,658	1,9606	0,04	11,59	4,99
	14	9,19	6,71	10,542	3,6688	0,07	11,43	4,99
	15	8,93	6,84	8,336	2,8731	0,06	11,19	4,98
4	16	9,00	7,55	37,266	10,4602	0,21	10,17	5,00
	17	8,54	6,31	7,11	3,0110	0,07	12,17	5,00
	18	9,55	7,17	6,62	1,9417	0,04	10,71	5,00
	19	9,04	7,21	11,768	3,6060	0,07	10,65	5,00
	20	8,99	6,00	5,394	2,4000	0,05	12,79	5,00
Média aritmética		8,6621	6,2221	10,5136	4,5585	0,0990	11,9329	4,72
Desvio padrão		0,4576	0,7721	7,5020	2,7521	0,0618	0,9439	0,45

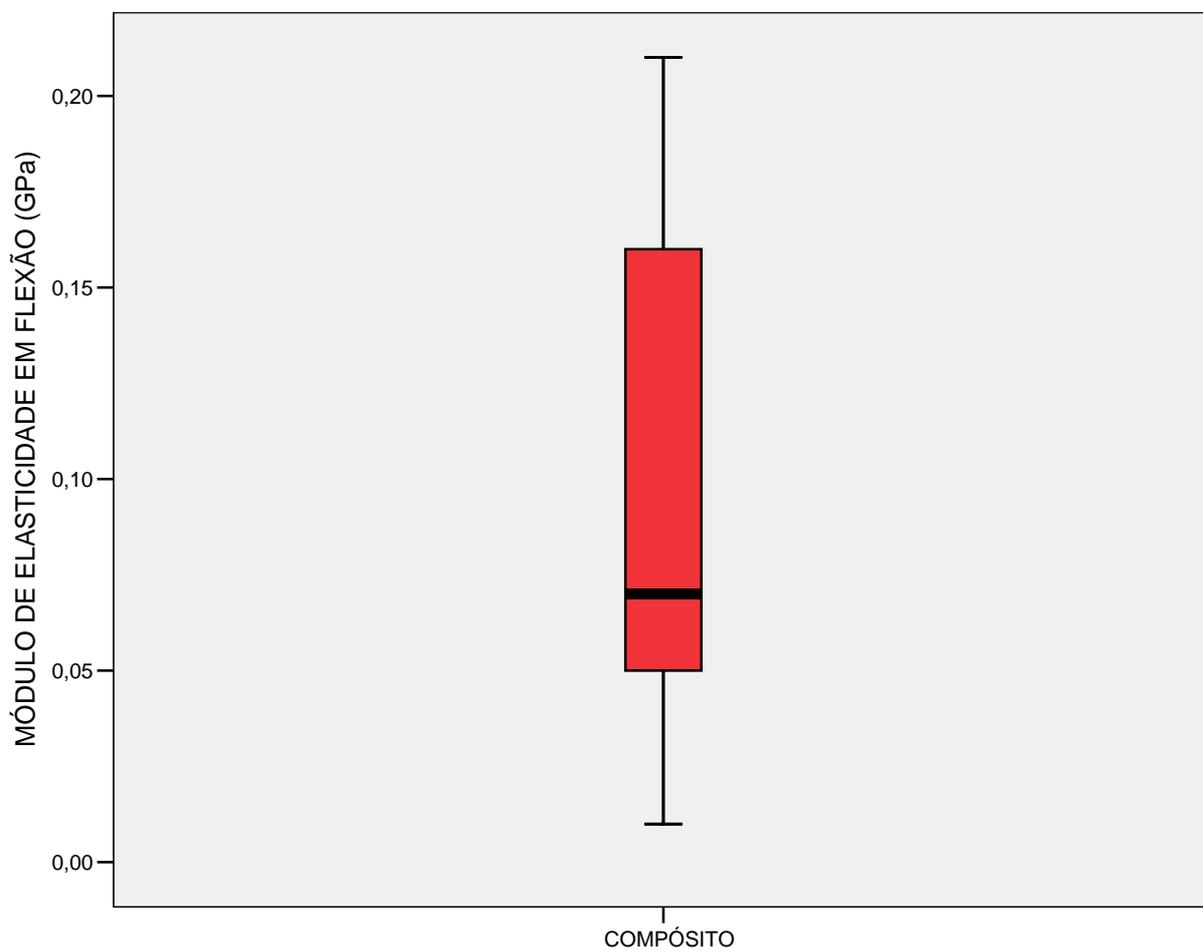


GRÁFICO 35 - Valores discrepantes do módulo de elasticidade do compósito no ensaio de flexão: não teve.

TABELA 111

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO COMPRIMIDA	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO TRACIONADA	DELAMINAÇÃO
1	1	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminações das três lâminas em uma das extremidades
	2	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminações das três lâminas em uma das extremidades
	3	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Não ocorreu delaminação
	4	x	Nada ocorreu	Nada ocorreu	Ocorreu delaminações das três lâminas em uma das extremidades
	5	x	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminação somente da lâmina de poliéster e juta na região comprimida

TABELA 111 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO COMPRIMIDA	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO TRACIONADA	DELAMINAÇÃO
2	6	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminação somente da lâmina de poliéster e juta na região comprimida
	7	x	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Nada ocorreu	Ocorreu delaminação total das três lâminas
	8	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminações das três lâminas em uma das extremidades e delaminação total da lâmina de poliéster e juta na região tracionada
	9	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminações das três lâminas em uma das extremidades e delaminação total da lâmina de poliéster e juta na região tracionada
	10	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Não ocorreu delaminação

TABELA 111 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO COMPRIMIDA	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO TRACIONADA	DELAMINAÇÃO
3	11	x	Nada ocorreu	Nada ocorreu	Ocorreu delaminação parcial somente da lâmina de poliéster e juta na região comprimida
	12	x	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminação total da lâmina de poliéster e juta na região tracionada
	13	x	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminação parcial somente da lâmina de poliéster e juta na região comprimida
	14	x	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminação parcial somente da lâmina de poliéster e juta na região comprimida
	15	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Não ocorreu delaminação

TABELA 111 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de flexão

AMOSTRA	CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO COMPRIMIDA	OBSERVAÇÕES NA REGIÃO TRACIONADA	DELAMINAÇÃO
4	16	x	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminação parcial somente da lâmina de poliéster e juta na região comprimida
	17	x	Nada ocorreu	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Não ocorreu delaminação
	18	x	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Nada ocorreu	Ocorreu delaminação total da lâmina de poliéster e juta na região comprimida
	19	x	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Apareceu uma trinca próxima ao meio do corpo de prova somente na lâmina de poliéster e juta	Ocorreu delaminação parcial somente da lâmina de poliéster e juta na região comprimida
	20	0	Nada ocorreu	Nada ocorreu	Não ocorreu delaminação

ANEXO E – Ensaios de Impacto Charpy

TABELA 112

Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano da matriz de poliuretana

AMOSTRA	Nº DO CORPO DE PROVA	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{CU} (kJ/m ²)
1	1F	6,6	14,19	93,654	3,0	32,0328
	2F	6,82	14,00	95,48	2,5	26,1835
2	3F	6,58	14,81	97,4498	3,0	30,7851
	4F	3,91	14,61	57,1251	2,5	43,7636
3	5F	4,23	13,73	58,0779	2,5	43,0456
	6F	3,84	15,70	60,288	2,5	41,4676
4	7F	3,79	14,70	55,713	3,0	53,8474
	8F	6,43	15,12	97,2216	1,5	15,4287
5	9F	4,47	15,02	67,1394	1,0	14,8944
	10F	4,26	14,28	60,8328	1,0	16,4385
Média aritmética		5,093	14,616	74,2982	2,25	31,78872
Desvio padrão		1,3227	0,5865	18,9064	0,790569	13,62826

* Desses valores foi deduzido 15J devido à resistência do ar e perdas mecânicas no equipamento.

W - Energia absorvida pela quebra do corpo de prova.

h – espessura do corpo de prova.

b – largura do corpo de prova.

a_{CU} - Resistência ao impacto.

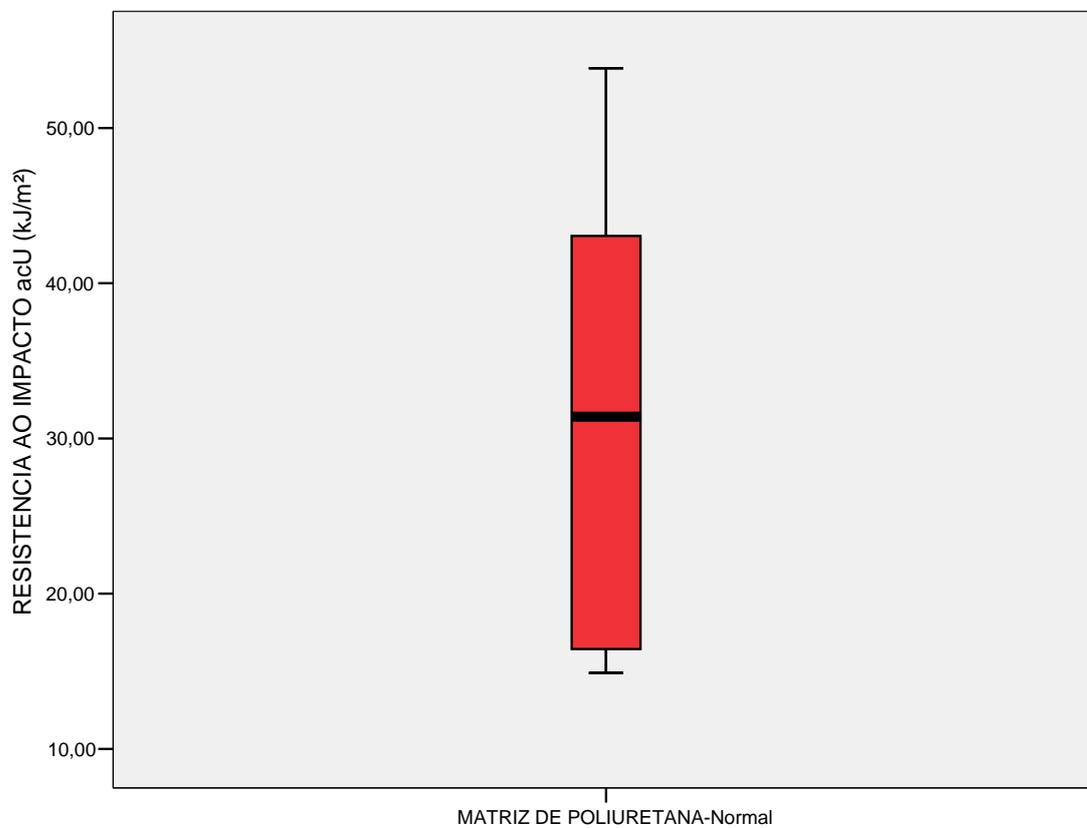


GRÁFICO 36 – Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz de poliuretana no ensaio Charpy normal: não teve.

TABELA 113

Comportamento dos corpos de prova de poliuretana no ensaio de impacto Charpy (normal)

AMOSTRA	Nº DO CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1N	0	O corpo de prova sofreu uma deformação elástica e foi arremessado, retornando a sua forma original após ser ensaiado, sem apresentar nenhuma falha
	2N	0	Idem do anterior
2	3N	0	Idem do anterior
	4N	0	Idem do anterior
3	5N	0	Idem do anterior
	6N	0	Idem do anterior
4	7N	0	Idem do anterior
	8N	0	Idem do anterior
5	9N	0	Idem do anterior
	10N	0	Idem do anterior

TABELA 114

Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano da matriz de poliuretana

AMOSTRA	Nº DO CORPO DE PROVA	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
1	1F	6,71	14,71	98,7041	9,0	91,1816
	2F	6,70	14,87	99,6290	8,0	80,2979
2	3F	6,84	14,28	97,6752	5,5	56,3091
	4F	3,89	13,82	53,7598	4,5	83,7057
3	5F	4,24	14,75	62,54	3,5	55,9642
	6F	3,63	14,54	52,7802	5,0	94,7325
4	7F	3,67	13,70	50,279	2,5	49,7226
	8F	6,24	15,13	94,4112	9,0	95,3277
5	9F	4,52	15,52	70,1504	6,5	92,6581
	10F	4,01	14,28	57,2628	3,5	61,1217
Média aritmética		5,045	14,56	73,7192	5,7	76,1021
Desvio padrão		1,3898	0,5623	21,3240	2,3476	18,2915

* Desses valores foi deduzido 15J devido à resistência do ar e perdas mecânicas no equipamento.

W - Energia absorvida pela quebra do corpo de prova.

h – espessura do corpo de prova.

b – largura do corpo de prova.

a_{cU} - Resistência ao impacto.



GRÁFICO 37 – Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz de poliuretana no ensaio Charpy paralelo: não teve.

TABELA 115

Comportamento dos corpos de prova de poliuretana no ensaio de impacto Charpy (paralelo)

AMOSTRA	Nº DO CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1P	0	O corpo de prova sofreu uma deformação elástica e foi arremessado, retornando a sua forma original após ser ensaiado, sem apresentar nenhuma falha.
	2P	0	Idem do anterior.
2	3P	0	Idem do anterior.
	4P	0	Idem do anterior.
3	5P	0	Idem do anterior.
	6P	0	Idem do anterior.
4	7P	0	Idem do anterior.
	8P	0	Idem do anterior.
5	9P	0	Idem do anterior.
	10P	0	Idem do anterior.

TABELA 116

Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano da matriz de poliéster

AMOSTRA	Nº DO CORPO DE PROVA	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
1	1F	5,4	14,5	78,30	0,5	6,3857
	2F	4,4	14,4	63,36	0,5	7,8914
2	3F	5,0	12,8	64,00	0,5	7,8125
	4F	4,9	14,4	70,56	1,0	14,1723
3	5F	5,7	14,1	80,37	1,0	12,4425
	6F	5,1	13,8	70,38	1,0	14,2086
4	7F	5,0	15,5	77,50	1,0	12,9032
	8F	4,8	13,7	65,76	0,5	7,6034
5	9F	5,9	14,9	87,91	1,0	11,3753
	10F	4,2	14,2	59,64	1,0	16,7673
Média aritmética		5,04	14,23	71,7780	0,8	11,1562
Desvio padrão		0,5275	0,7243	8,9919	0,2582	3,5257

* Desses valores foi deduzido 15J devido à resistência do ar e perdas mecânicas no equipamento.

W - Energia absorvida pela quebra do corpo de prova.

h – espessura do corpo de prova.

b – largura do corpo de prova.

a_{cU} - Resistência ao impacto.

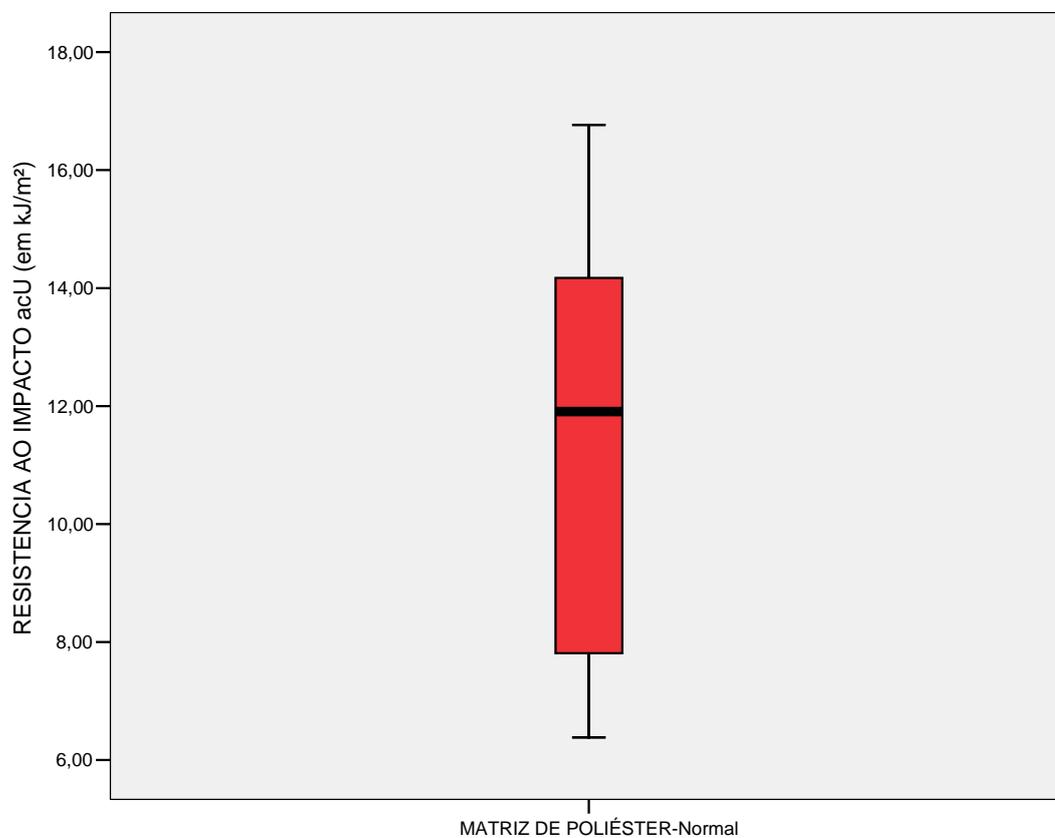


GRÁFICO 38 – Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz de poliéster no ensaio Charpy normal: não teve.

TABELA 117

Comportamento dos corpos de prova de poliéster no ensaio de impacto Charpy (normal)

AMOSTRA	Nº DO CORPO DE PROVA	FALHOU (x) NÃO FALHOU (0)	OBSERVAÇÕES
1	1N	x	O corpo de prova quebrou em duas partes.
	2N	x	Idem do anterior.
2	3N	x	Idem do anterior.
	4N	x	Idem do anterior.
3	5N	x	Idem do anterior.
	6N	x	Idem do anterior.
4	7N	x	Idem do anterior.
	8N	x	Idem do anterior.
5	9N	x	Idem do anterior.
	10N	x	Idem do anterior.

TABELA 118

Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano da matriz de poliéster

Amostra	Número do corpo de prova	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
1	1P	4,6	13,7	63,02	0,5	7,9340
	2P	5,0	13,7	68,50	0,5	7,2993
2	3P	5,2	13,8	71,76	1,0	13,9353
	4P	4,8	13,7	65,76	0,5	7,6034
3	5P	6,0	14,2	85,20	1,0	11,7371
	6P	5,3	14,0	74,20	1,0	13,4771
4	7P	5,0	14,9	74,50	1,0	13,4228
	8P	4,4	15,0	66,00	1,0	15,1515
5	9P	5,9	14,8	87,32	1,0	11,4521
	10P	4,0	14,1	56,40	1,0	17,7305
Média aritmética		5,02	14,19	71,266	0,85	11,9743
Desvio padrão		0,6233	0,5216	9,5794	0,2415	3,4808

* Desses valores foi deduzido 15J devido à resistência do ar e perdas mecânicas no equipamento.

h – espessura do corpo de prova.

b – largura do corpo de prova.

W - Energia absorvida pela quebra do corpo de prova.

a_{cU} - Resistência ao impacto.

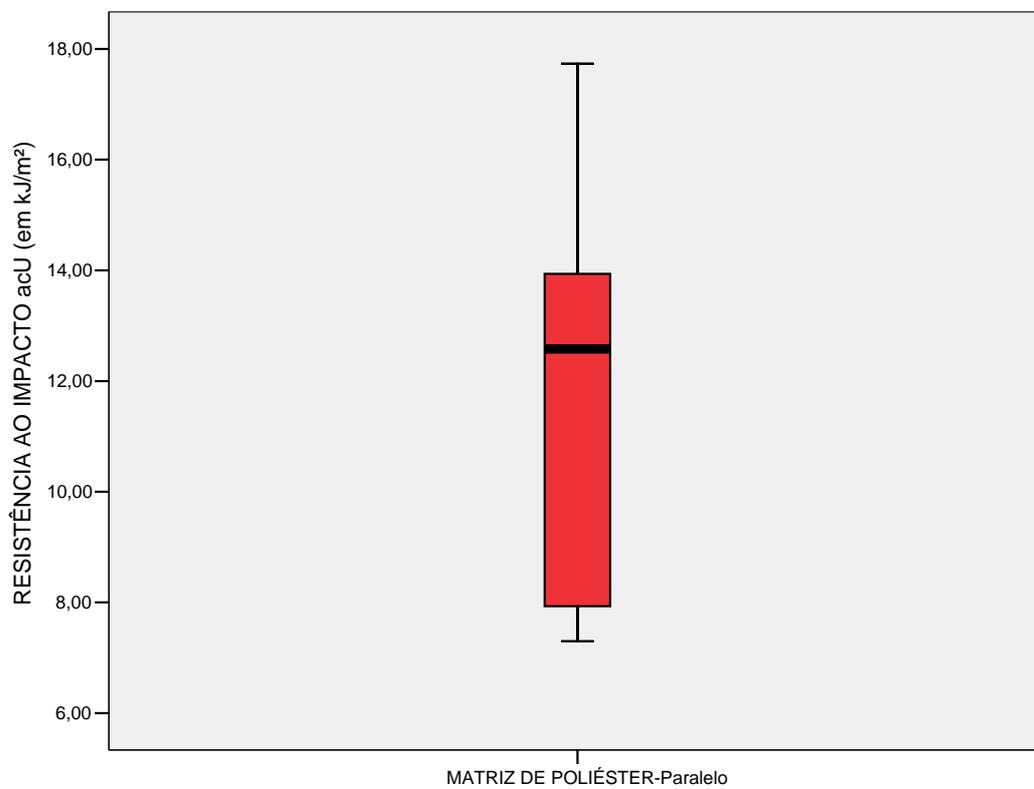


GRÁFICO 39 – Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz de poliéster no ensaio Charpy paralelo: não teve.

TABELA 119

Comportamento dos corpos de prova de poliéster no ensaio de impacto Charpy (paralelo)

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
1	1P	x	O corpo de prova quebrou em duas partes.
	2P	x	Idem do anterior.
2	3P	x	Idem do anterior.
	4P	x	Idem do anterior.
3	5P	x	Idem do anterior.
	6P	x	Idem do anterior.
4	7P	x	Idem do anterior.
	8P	x	Idem do anterior.
5	9P	x	Idem do anterior.
	10P	x	Idem do anterior.

TABELA 120

Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado da matriz híbrida

Amostra	Número do corpo de prova	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
1	1F	5,8	13,8	80,04	1,5	18,7406
	2F	6,6	13,3	87,78	2,5	28,4803
2	3F	7,8	13,8	107,64	3,0	27,8707
	4F	6,5	15,0	97,50	2,0	20,5128
3	5F	8,5	14,2	120,70	2,5	20,7125
	6F	8,0	15,0	120,00	2,5	20,8333
4	7F	7,6	14,4	109,44	2,0	18,2749
	8F	5,9	14,7	86,73	1,0	11,5300
5	9F	7,8	13,9	108,42	2,5	23,0585
	10F	7,5	14,7	110,25	1,0	9,0703**
Média aritmética		7,1667	14,2333	102,0278	2,1667	21,1126
Desvio padrão		0,9811	0,5895	14,7476	0,6124	5,1216

* Desses valores foi deduzido 15J devido à resistência do ar e perdas mecânicas no equipamento.

h – espessura do corpo de prova.

b – largura do corpo de prova.

W - Energia absorvida pela quebra do corpo de prova.

a_{cU} - Resistência ao impacto.

** Valor discrepante

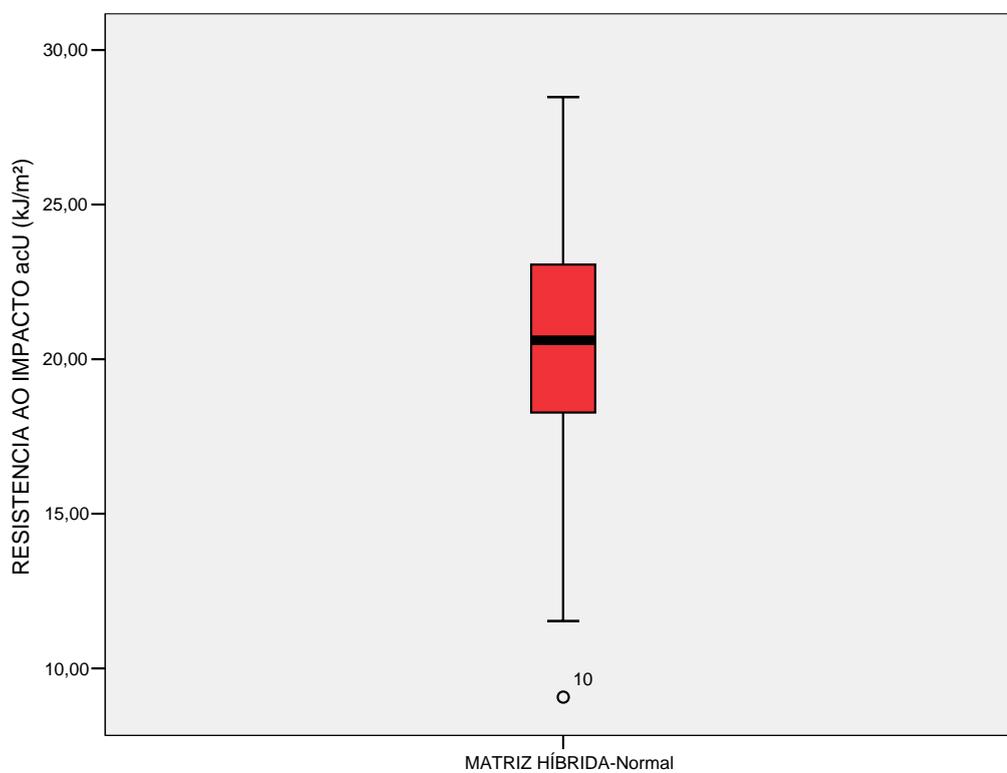


GRÁFICO 40 – Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz híbrida no ensaio Charpy normal: do corpo de prova n° 10.

TABELA 121

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy (normal)

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
1	1N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Essas lâminas externas não apresentaram trincas extras.
	2N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes no local do impacto. Na lâmina de poliéster comprimida só apareceu esta única trinca e na lâmina de poliéster tracionada, apareceram mais duas trincas no local de apoio dos corpos de prova.
2	3N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Essas lâminas externas não apresentaram trincas extras.
	4N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Somente a lâmina de poliéster tracionada apresentou mais duas trincas, uma próxima à região do impacto e outra no ponto de apoio do corpo de prova.

TABELA 121 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy (normal)

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
3	5N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Somente a lâmina externa de poliéster tracionada apresentou duas trincas extras, exatamente no ponto de apoio do corpo de prova.
	6N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Essas lâminas externas não apresentaram trincas extras.
4	7N	x	O corpo de prova foi quebrado em duas partes separadas no local do impacto e as lâminas externas de poliéster não apresentaram trincas extras.
	8N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Somente a lâmina de poliéster comprimida apresentou mais uma trinca próxima à região do impacto.

TABELA 121 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy (normal)

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
5	9N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Essas lâminas externas não apresentaram trincas extras.
	10N	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Essas lâminas externas não apresentaram trincas extras.

TABELA 122

Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado da matriz híbrida

Amostra	Número do corpo de prova	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
1	1P	5,9	15,3	90,27	7,0	77,5451
	2P	6,7	15,2	101,84	12,5	122,742
2	3P	7,6	14,3	108,68	8,5	78,2113
	4P	6,5	15,9	103,35	3,0	29,0276
3	5P	7,6	14,9	113,24	11,5	101,5542
	6P	8,2	14,1	115,62	8,0	69,1922
4	7P	8,1	14,0	113,40	7,0	61,7284
	8P	5,5	15,6	85,80	9,0	104,8951
5	9P	7,9	14,8	116,92	13,0	111,1871
	10P	7,6	13,5	102,60	7,5	73,0994
Média aritmética		7,16	14,76	105,172	8,7	82,9182
Desvio padrão		0,9477	0,7691	10,5969	3,0019	27,6976

* Desses valores foi deduzido 15J devido à resistência do ar e perdas mecânicas no equipamento.

h – espessura do corpo de prova.

b – largura do corpo de prova.

W - Energia absorvida pela quebra do corpo de prova.

a_{cU} - Resistência ao impacto.

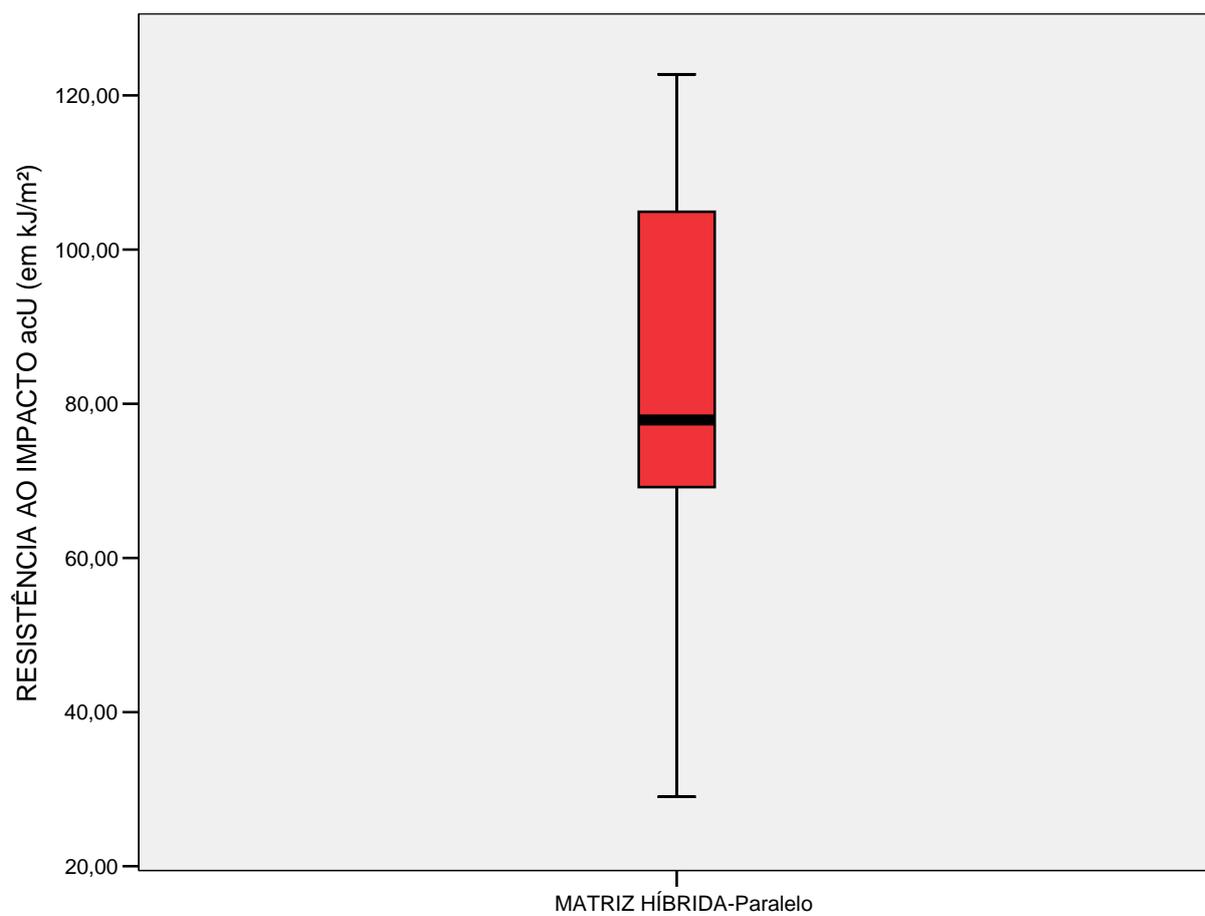


GRÁFICO 41 – Valores discrepantes de resistência ao impacto da matriz híbrida no ensaio Charpy paralelo: não teve.

TABELA 123

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy (paralelo)

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
1	1P	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes no local do impacto e nessas lâminas apareceram diversas trincas e duas extremidades de uma das lâminas descolaram da lâmina de poliuretana exatamente no ponto em que ocorreram duas trincas, no ponto de apoio do corpo de prova.
	2P	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes no local do impacto e nessas lâminas apareceram diversas trincas e as duas extremidades de cada uma das lâminas de poliéster descolaram da lâmina de poliuretana, exatamente nos pontos de apoio do corpo de prova, em que ocorreram quatro trincas.
2	3P	x	O corpo de prova foi quebrado em duas partes separadas no local do impacto e as duas extremidades de cada uma das lâminas de poliéster descolaram da lâmina de poliuretana, exatamente nos pontos de apoio do corpo de prova, em que ocorreram quatro trincas.
	4P	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes, porém ficaram presas à lâmina de poliuretana que nada sofreu. Essas lâminas externas não apresentaram trincas extras.

TABELA 123 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy (paralelo)

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
3	5P	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes no local do impacto. Em uma extremidade houve descolamento das lâminas de poliéster no ponto de apoio do corpo de prova e, no outro ponto de apoio, o corpo de prova foi quebrado em partes separadas.
	6P	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes no local do impacto e as duas extremidades de cada uma das lâminas de poliéster descolaram da lâmina de poliuretana, exatamente nos pontos de apoio do corpo de prova, locais em que ocorreram quatro trincas.
4	7P	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes no local do impacto e as duas extremidades de cada uma das lâminas de poliéster descolaram da lâmina de poliuretana, exatamente nos pontos de apoio do corpo de prova, locais em que ocorreram quatro trincas.

TABELA 123 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto Charpy (paralelo)

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
4	8P	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes no local do impacto. Em uma extremidade houve descolamento das lâminas de poliéster no ponto de apoio do corpo de prova e, no outro ponto de apoio, o corpo de prova foi quebrado em partes separadas.
5	9P	x	As lâminas externas de poliéster foram quebradas em duas partes no local do impacto. Em uma extremidade houve descolamento das lâminas de poliéster no ponto de apoio do corpo de prova e, no outro ponto de apoio, o corpo de prova foi quebrado em partes separadas.
	10P	x	O corpo de prova foi quebrado em duas partes separadas no local do impacto e, nas extremidades, de cada uma das lâminas de poliéster, ocorreram quatro trincas exatamente nos pontos de apoio dos corpos de prova e uma destas pontas descolou da lâmina de poliuretana.

TABELA 124

Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado do compósito

Amostra	Número do corpo de prova	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
1	1N	5,2	14,0	72,80	1,5	20,6044
	2N	5,5	13,6	74,80	1,0	13,3690
	3N	5,2	14,2	73,84	1,0	13,5428
	4N	5,4	14,5	78,30	1,0	12,7714
	5N	7,0	13,6	95,20	2,0	21,0084
2	6N	6,5	13,7	89,05	2,0	22,4593
	7N	5,7	12,7	72,39	1,0	13,8141
	8N	7,1	14,5	102,95	2,0	19,4269
	9N	5,5	14,3	78,65	1,5	19,0718
	10N	5,5	14,3	78,65	1,5	19,0718
3	11N	6,1	13,0	79,30	1,0	12,6103
	12N	6,7	12,5	83,75	1,0	11,9403
	13N	6,8	14,5	98,60	1,5	15,2130
	14N	6,5	13,7	89,05	1,5	16,8445
	15N	7,0	14,1	98,70	1,5	15,1976

TABELA 124 (continuação)

Resultado do ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado do compósito

Amostra	Número do corpo de prova	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
4	16N	6,9	14,8	102,12	1,5	14,6886
	17N	6,0	13,5	81,00	1,5	18,5185
	18N	7,3	15,0	109,50	1,5	13,6986
	19N	7,4	14,5	107,30	1,5	13,9795
	20N	6,3	14,3	90,09	1,5	16,6500
Média aritmética		6,28	13,965	87,802	1,425	16,2240
Desvio padrão		0,7367	0,6738	12,1466	0,3354	3,1920

* Desses valores foi deduzido 15J devido à resistência do ar e perdas mecânicas no equipamento.

W - Energia absorvida pela quebra do corpo de prova.

h – espessura do corpo de prova.

b – largura do corpo de prova.

a_{cU} - Resistência ao impacto.

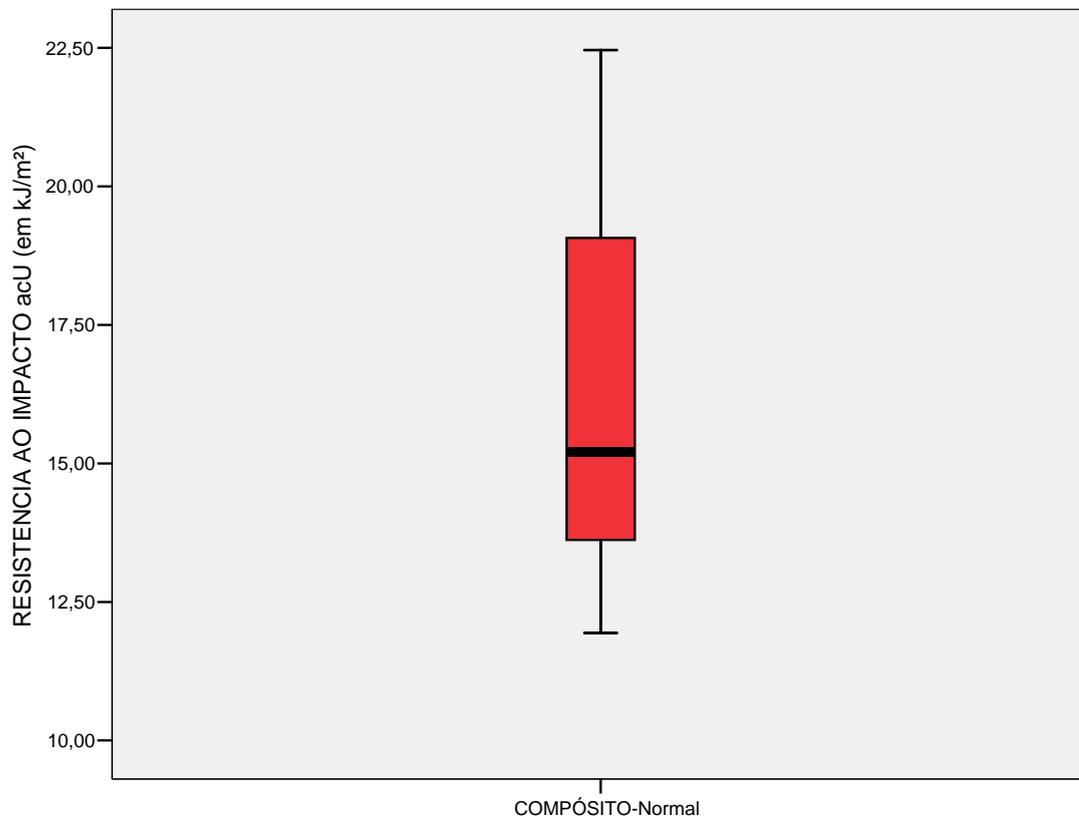


GRÁFICO 42 – Valores discrepantes de resistência ao impacto do compósito no ensaio Charpy normal: não teve.

TABELA 125

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
1	1N	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	2N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Não apresentou delaminação.
	3N	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	4N	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	5N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Não apresentou delaminação.

TABELA 125 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
2	6N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Não apresentou delaminação.
	7N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminações parciais nas duas lâminas externas.
	8N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminação total da lâmina externa na região tracionada.
	9N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Não houve delaminação.

TABELA 125 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
2	10N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminação total em uma das partes da lâmina externa na região comprimida.
3	11N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminação parcial na lâmina externa, na região comprimida.
	12N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve pequena delaminação na lâmina externa na região tracionada.
	13N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Não houve delaminação.

TABELA 125 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
3	14N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Não houve delaminação.
	15N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Não apresentou delaminação.
4	16N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminação total de metade de cada lâmina externa.
	17N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve pequena delaminação próximo ao impacto.

TABELA 125 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy normal ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
4	18N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminação parcial da lâmina externa, na região comprimida e uma pequena delaminação da lâmina externa, na região tracionada, próximo ao impacto.
	19N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve pequena delaminação na região comprimida, próximo ao impacto.
	20N	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve pequena delaminação da lâmina externa, na região tracionada, próximo ao impacto.

TABELA 126

Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado do compósito

Amostra	Número do corpo de prova	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
1	1P	5,2	13,2	68,64	3,0	43,7063
	2P	5,5	13,7	75,35	2,6	34,5056
	3P	5,0	14,1	70,5	9,0	127,6596
	4P	5,4	15,5	83,70	9,0	107,5269
	5P	6,6	14,0	92,40	8,0	86,5810
2	6P	6,5	13,5	87,75	8,0	91,1690
	7P	5,7	12,5	71,25	2,5	35,0877
	8P	7,0	13,3	93,10	3,5	37,5940
	9P	5,7	14,4	82,08	5,5	67,0078
	10P	5,5	14,2	78,10	8,0	102,4328
3	11P	6,3	14,6	91,98	4,0	43,4877
	12P	6,8	15,9	108,12	7,0	64,7429
	13P	6,7	13,2	88,44	3,0	33,9213
	14P	6,6	14,0	92,40	9,0	97,4026
	15P	7,0	13,2	92,40	5,0	54,1126

TABELA 126 (continuação)

Resultado do ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado do compósito

Amostra	Número do corpo de prova	h (mm)	b (mm)	h x b (mm ²)	W (J)*	a _{cU} (kJ/m ²)
4	16P	7,2	14,0	100,80	5,0	49,6032
	17P	6,0	13,9	83,40	3,0	35,9712
	18P	7,3	15,2	110,96	7,0	63,0858
	19P	7,5	14,3	107,25	8,0	74,5921
	20P	6,3	13,7	86,31	5,0	57,9307
Média aritmética		6,29	14,02	88,2465	5,755	65,40604
Desvio padrão		0,7490	0,8288	12,2744	2,385367	28,22747

* Desses valores foi deduzido 15J devido à resistência do ar e perdas mecânicas no equipamento.

W - Energia absorvida pela quebra do corpo de prova.

h – espessura do corpo de prova.

b – largura do corpo de prova.

a_{cU} - Resistência ao impacto.

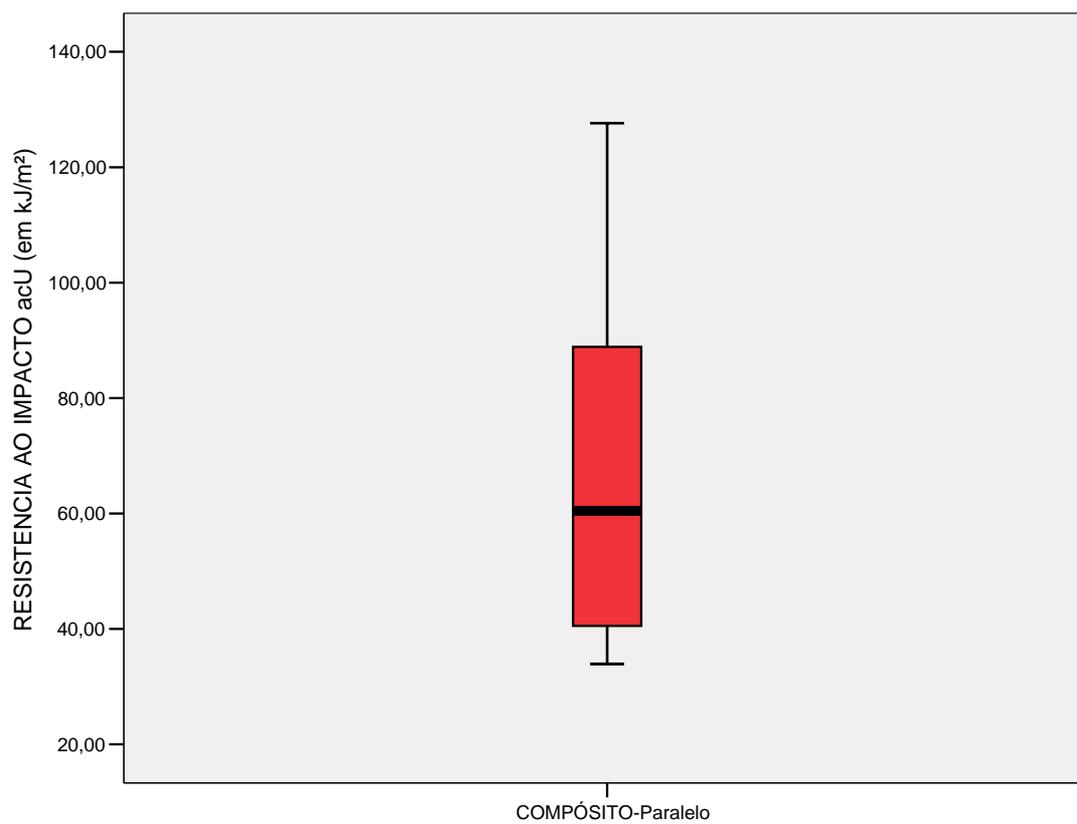


GRAFICO 43 – Valores discrepantes de resistência ao impacto do compósito no ensaio Charpy paralelo: não teve.

TABELA 127

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
1	1P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	2P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	3P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	4P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	5P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.

TABELA 127 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
2	6P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	7P	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminações parciais nas duas lâminas externas.
	8P	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminação total em uma das partes de uma lâmina externa.
	9P	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminações parciais nas duas lâminas externas.
	10P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Houve delaminação total de uma das lâminas externas.

TABELA 127 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
3	11P	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve descolamento total das duas lâminas externas.
	12P	x	O corpo de prova foi quase dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Apresentou delaminação em uma das partes de uma lâmina externa.
	13P	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve pequena delaminação próximo ao impacto.
	14P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.
	15P	x	O corpo de prova foi quase dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não apresentou delaminação.

TABELA 127 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto Charpy paralelo ao plano do laminado

Amostra	Número do corpo de prova	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
4	16P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Houve delaminação total das duas lâminas externas.
	17P	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve delaminação total em uma das partes de uma lâmina externa.
	18P	x	O corpo de prova foi quase dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Apresentou delaminações nas lâminas externas, quase total em metade de uma lâmina e pequena em outra.
	19P	x	O corpo de prova apresentou as duas lâminas externas totalmente rompidas, com exposição de algumas fibras e a lâmina interna, aparentemente, intacta. Houve pequena delaminação das lâminas externas, próximo ao impacto.
	20P	x	O corpo de prova foi dividido em duas partes, com exposição de algumas fibras. Não houve delaminação.

ANEXO F – Ensaios de impacto por queda de dardo

TABELA 128

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliuretana no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,10kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
1	1	7,16	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.
	2	7,01	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.
Massa: 0,30kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região compressiva do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
2	3	6,53	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.
	4	4,07	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.
Massa: 0,50kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região compressiva do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
3	5	4,08	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.
	6	4,18	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.

TABELA 128 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliuretana no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,70kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região compressiva do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
4	7	4,16	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.
	8	6,31	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.
Massa: 0,90kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região compressiva do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
5	9	4,50	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.
	10	3,77	0	A superfície se manteve intacta, sem trincas.	A superfície se manteve intacta, sem trincas.

TABELA 129

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,10kg				
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
1	1	5,35	x	- Fratura total do corpo de prova em quatro trincas principais em ângulos quase ortogonais.
	2	4,37	x	- Fratura total do corpo de prova em quatro trincas principais em ângulos quase ortogonais.
Massa: 0,30kg				
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
2	3	5,04	x	- Fratura total do corpo de prova em seis partes, com quatro trincas principais quase ortogonais causadas pela queda do dardo e a outra secundária que surgiu em consequência de uma falha (bolha de ar) presente no corpo de prova (na direção de uma das trincas principais), dividindo essas duas partes em quatro.
	4	4,86	x	- Fratura total do corpo de prova por quatro trincas principais em ângulos quase ortogonais.
Massa: 0,50kg				
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
3	5	5,70	x	- Fratura total do corpo de prova por quatro trincas principais em ângulos quase ortogonais.
	6	5,05	x	- Fratura total do corpo de prova por cinco trincas principais em ângulos de quase 70° em cada parte restante.

TABELA 129 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz de poliéster no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,70kg				
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
4	7	4,96	x	- Fratura total do corpo de prova por seis trincas principais em ângulos de quase 60° em cada parte restante.
	8	4,79	x	- Fratura total do corpo de prova por seis trincas principais e duas trincas secundárias devido às falhas (bolhas de ar) presentes no corpo de prova (na direção de duas trincas principais), dividindo essas seis partes em doze.
Massa: 0,90kg				
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações
5	9	5,93	x	- Fratura total do corpo de prova em 8 trincas principais em ângulos de quase 45° em cada parte restante e duas trincas secundárias devido às falhas (bolhas de ar) presentes no corpo de prova (na direção de duas trincas principais), dividindo essas oito partes em dezesseis, dando o aspecto estilhaçado no corpo de prova.
	10	4,16	x	- Fratura total do corpo de prova em 10 trincas principais e duas trincas secundárias devido às falhas (bolhas de ar) presentes no corpo de prova (na direção de duas trincas principais), dividindo essas dez partes em vinte, dando o aspecto estilhaçado no corpo de prova.

TABELA 130

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,10kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
1	1	6,57	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4; - Ângulos entre as trincas: 110, 110, 70 e 70°; - Comprimentos das trincas: 10, 10, 15 e 20mm; - Trinca secundária: 1 de 8mm; - Área atingida (A): 900,00mm² (lâmina de poliéster) (11,36% da área de superfície do cp). 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 7; - Ângulos entre as trincas: 50, 40, 70, 60, 60, 50 e 30°; - Comprimentos das trincas: 45, 30, 45 (até a borda), 40 (até a borda), 50 (até a borda), 55 (até a borda) e 60mm (até a borda); - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.
	2	6,81	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 5; - Ângulos entre as trincas: 50, 90, 70, 70 e 80°; - Comprimentos das trincas: 25, 45 (até a borda), 20, 35 e 45mm (até a borda); - Trincas secundárias: 2 de 8 e 25mm; - Área atingida (A): 5.600,00mm² (lâmina de poliéster) (70,70% da área de superfície do cp). 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 8; - Ângulos entre as trincas: 35, 45, 30, 50, 40, 40, 55 e 65°; - Comprimentos das trincas: 55 (até a borda), 30, 45 (até a borda), 35, 30, 25, 40 e 50mm (até a borda); - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.

TABELA 130 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,30kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
2	3	7,42	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 7; - Ângulos entre as trincas: 60, 40, 30, 50, 60, 50 e 70°; - Comprimentos das trincas: 25, 38 (até a borda), 23, 10, 53 (até a borda), 15 e 18mm; - Trincas secundárias: 3 de 10, 15 e 45mm; - Área atingida (A): 6.230,00mm² (lâmina de poliéster) (78,65% da área de superfície do cp). 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 10; - Ângulos entre as trincas: 45, 40, 45, 40, 35, 30, 30, 40, 30 e 25°; - Comprimentos das trincas: 65 (até a borda), 50 (até a borda), 40, 40 (até a borda), 40 (até a borda), 35, 50 (até a borda), 50 (até a borda), 55 (até a borda) e 50mm (até a borda); - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.

TABELA 130 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,30kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
2	4	8,28	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 7; - Ângulos entre as trincas: 50, 65, 40, 60, 70, 30 e 45°; - Comprimentos das trincas: 25, 15, 15, 25, 25, 25 e 35mm; - Trinca secundária: 1 de 15mm; - Área atingida (A): 5.600,00mm² (lâmina de poliéster) (70,70% da área de superfície do cp).. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 11; - Ângulos entre as trincas: 45, 40, 45, 40, 35, 30, 30, 10, 40, 30 e 25°; - Comprimentos das trincas: 50 (até a borda), 42 (até a borda), 15, 50, 40 (até a borda), 40 (até a borda), 50 (até a borda), 40, 38, 52 (até a borda) e 55mm (até a borda); - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.

TABELA 130 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,50kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
3	5	9,17	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 6; - Ângulos entre as trincas: 80, 50, 70, 65, 30 e 65°; - Comprimentos das trincas: 35, 45 (até a borda), 30, 45 (até a borda), 30 e 30mm; - Trincas secundárias: 2 de 7 e 13mm; - Área atingida (A): 5.625,00mm² (lâmina de poliéster) (71,01% da área de superfície do cp). 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 10; - Ângulos entre as trincas: 45, 40, 45, 40, 35, 30, 30, 40, 30 e 25°; - Comprimentos das trincas: 53 (até a borda), 43 (até a borda), 40, 42 (até a borda), 42 (até a borda), 48 (até a borda), 45 (até a borda), 50 (até a borda), 58 (até a borda) e 50mm (até a borda); - Trinca secundária: 1 de 60mm; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.

TABELA 130 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,50kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
	6	8,16	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 10; - Ângulos entre as trincas: 25, 30, 40, 30, 25, 50, 45, 30, 40 e 45°; - Comprimentos das trincas: 20, 25, 28, 38, 40, 45, 50 (até a borda), 45, 10 e 35mm; - Trincas secundárias: 3 de 10, 25 e 60mm; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 10; - Ângulos entre as trincas: 55, 30, 40, 30, 30, 35, 25, 30, 40 e 45°; - Comprimentos das trincas: 45 (até a borda), 40 (até a borda), 52, 50 (até a borda), 60 (até a borda), 55 (até a borda), 50 (até a borda), 60 (até a borda), 35 e 33mm; - Trinca secundária: 1 de 70mm; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.

TABELA 130 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,70kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
4	7	8,25	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 7; - Ângulos entre as trincas: 80, 20, 70, 40, 50, 50 e 50°; - Comprimentos das trincas: 50, 55, 54, 55, 50, 45 e 45mm (todas até a borda); - Trincas secundárias: 3 de 15, 50 e 80mm; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 9; - Ângulos entre as trincas: 60, 50, 25, 40, 50, 30, 25, 35 e 45°; - Comprimentos das trincas: 47, 45, 45, 55, 40, 63, 50, 48 e 40mm (todas até a borda); - Trincas secundárias: 2 de 35 e 80mm; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.

TABELA 130 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,70kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
4	8	8,75	x	<p>- Trincas primárias: 10;</p> <p>- Ângulos entre as trincas: 40, 50, 30, 20, 40, 30, 40, 30, 30 e 50°;</p> <p>- Comprimentos das trincas: 48 (até a borda), 35, 38, 43 (até a borda), 25, 18, 40 (até a borda), 55, 33 e 30mm;</p> <p>- Trincas secundárias: 4 de 10, 13, 55 e 60mm;</p> <p>- Área atingida (A): 6.141,00mm² (lâmina de poliéster) (77,53% da área de superfície do cp).</p>	<p>- Trincas primárias: 11;</p> <p>- Ângulos entre as trincas: 15, 30, 30, 50, 40, 40, 35, 30, 35, 30 e 25°;</p> <p>- Comprimentos das trincas: 40, 50 (até a borda), 45 (até a borda), 55 (até a borda), 30, 45 (até a borda), 55 (até a borda), 45 (até a borda), 55 (até a borda), 55 (até a borda) e 50mm (até a borda);</p> <p>- Trincas secundárias: 2 de 40 e 80mm;</p> <p>- Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.</p>

TABELA 130 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,90kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
5	9	8,41	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 9; - Ângulos entre as trincas: 50, 40, 50, 40, 30, 35, 40, 30 e 45°; - Comprimentos das trincas: 40, 35, 45 (até a borda), 25, 50 (até a borda), 45 (até a borda), 45 (até a borda), 55 (até a borda) e 48mm (até a borda); - Trincas secundárias: 3 de 8, 45 e 60mm; - Área atingida (A): 7.031,00mm² (lâmina de poliéster) (88,76% da área de superfície do cp). 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 8; - Ângulos entre as trincas: 40, 70, 50, 40, 50, 30, 50 e 30°; - Comprimentos das trincas: 45, 45, 40, 55, 42, 40, 55 e 50mm (todas até a borda); - Trinca secundária: 1 de 60mm; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.

TABELA 130 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova da matriz híbrida no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,90kg					
Amostra	Número do corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
5	10	7,46	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 9; - Ângulos entre as trincas: 40, 40, 30, 60, 40, 30, 30, 50 e 40°; - Comprimentos das trincas: 35, 40 (até a borda), 35, 35, 37, 33, 50 (até a borda), 50 (até a borda) e 40mm (até a borda); - Trincas secundárias: 4 de 16, 50, 66 e 70mm; - Área atingida (A): 6.586,00mm² (lâmina de poliéster) (83,15% da área de superfície do cp). 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 10; - Ângulos entre as trincas: 25, 20, 30, 40, 50, 30, 30, 30, 50 e 55°; - Comprimentos das trincas: 50 (até a borda), 40 (até a borda), 40 (até a borda), 50 (até a borda), 45, 43, 55 (até a borda), 35, 40 (até a borda) e 35mm; - Trincas secundárias: 2 de 40 e 80mm; - Área atingida (A): toda a lâmina de poliéster do corpo de prova.

TABELA 131

Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,10kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)
1	1	6,57	11,36	12,4392	100
	2	6,81	70,70	80,2445	100
Média aritmética		6,69	41,03	46,3419	100
Desvio padrão		0,1697	41,9597	47,9455	0

TABELA 132

Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,30kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)
2	3	7,42	78,65	97,2638	100
	4	8,28	70,70	97,566	100
Média aritmética		7,85	74,675	97,4149	100
Desvio padrão		0,6081	5,6215	0,2137	0

TABELA 133

Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,50kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)
3	5	9,17	71,01	100	100
	6	8,16	100	100	100
Média aritmética		8,665	85,505	100	100
Desvio padrão		0,7142	20,499	0	0

TABELA 134

Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,70kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)
4	7	8,25	100	100	100
	8	8,75	77,53	100	100
Média aritmética		8,5	88,765	100	100
Desvio padrão		0,3536	15,8887	0	0

TABELA 135

Danos sobre os corpos de prova da matriz híbrida submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,90kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)
5	9	8,41	88,76	100	100
	10	7,46	83,15	100	100
Média aritmética		7,935	85,955	100	100
Desvio padrão		0,6718	3,9669	0	0

TABELA 136

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,10kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
1	1	6,0	x	- Trincas primárias: não apresentou; - Trinca secundária: 1 de 8mm; - da área atingida: 8mm; - Área atingida (A): 200,96mm ² (2,54% da área de superfície do cp).	- Trincas primárias: 4 (somente na poliéster); - Ângulo entre as trincas: 80, 90, 90 e 100°; - Comprimentos das trincas: 10, 10, 12 e 15mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 250,00mm ² (3,16% da área de superfície do cp).
2	6	7,5	x	- Trincas primárias: não apresentou; - Trinca secundária: 1 de 5mm; - da área atingida: 5mm; - Área atingida (A): 78,50mm ² (0,99% da área de superfície do cp).	- Trincas primárias: 3 (somente na poliéster); - Ângulo entre as trincas: 80, 140 e 140°; - Comprimentos das trincas: 5, 7 e 10mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 100,00mm ² (1,26% da área de superfície do cp).
3	11	6,6	x	- Trincas primárias: não apresentou; - Trinca secundária: 1 de 7mm; - da área atingida: 7mm; - Área atingida (A): 153,86mm ² (1,94% da área de superfície do cp).	- Trincas primárias: 4 (somente na poliéster); - Ângulo entre as trincas: 70, 80, 80 e 130°; - Comprimentos das trincas: 9, 10, 11 e 13mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 169,00mm ² (2,13% da área de superfície do cp).
4	16	6,6	x	- Trincas primárias: não apresentou; - Trinca secundária: 1 de 6mm; - da área atingida: 6mm; - Área atingida (A): 113,04mm ² (1,43% da área de superfície do cp).	- Trincas primárias: 3 (somente na poliéster); - Ângulo entre as trincas: 80, 100 e 180°; - Comprimentos das trincas: 9, 10 e 12mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 144,00mm ² (1,82% da área de superfície do cp).

TABELA 136 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,30kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
1	2	7,7	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 2 de 8 e 10mm; - da área atingida: 10mm; - Área atingida (A): 314,00mm² (3,23% da área de superfície do cp); - Houve esmagamento da 1ª camada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 3 (somente na poliéster); - Ângulos entre as trincas: 60, 90 e 210°; - Comprimentos das trincas: 7, 10 e 15mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 300,00mm² (3,79% da área de superfície do cp).
2	7	5,8	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 2 de 10 e 13mm; - da área atingid - Área atingida (A): a: 13mm; 530,66mm² (6,70% da área de superfície do cp); - Houve esmagamento da 1ª camada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (somente na poliéster); - Ângulos entre as trincas: 80, 90, 60 e 130°; - Comprimentos das trincas: 10, 15, 12 e 7mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 900,00mm² (11,36% da área de superfície do cp).

TABELA 136 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,30kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
3	12	5,8	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 3 de 10, 12 e 15mm; - da área atingida: 15mm; - Área atingida (A): 706,50mm² (8,92% da área de superfície do cp); - Não houve esmagamento da 1ª camada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (somente na poliéster); - Ângulos entre as trincas: 90, 50, 130 e 100°; - Comprimentos das trincas: 15, 7, 15 e 20mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 1050,00mm² (13,26% da área de superfície do cp).
4	17	7,0	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 3 de 6, 12 e 15mm; - da área atingida: 20mm; - Área atingida (A): 700,00mm² (8,84% da área de superfície do cp); - Não houve esmagamento da 1ª camada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 5 (somente na poliéster); - Ângulos entre as trincas: 50, 60, 130 e 120°; - Comprimentos das trincas: 10, 17, 15 e 12mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 750,00mm² (9,47% da área de superfície do cp).

TABELA 136 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,50kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
1	3	6,8	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 3 de 15, 18 e 20mm; - da área atingida: 20mm; - Área atingida (A): 1256,00mm² (15,86% da área de superfície do cp). - Houve esmagamento da 1ª camada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 3 (com rompimento das fibras); - Ângulos entre as trincas: 90, 90 e 180°; - Comprimentos das trincas: 18, 20 e 25mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 960,00mm² (12,12% da área de superfície do cp).
2	8	6,0	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 4 de 15, 18, 20 e 25mm; - da área atingida: 25mm; - Área atingida (A): 1500,00mm² (18,94% da área de superfície do cp). - Houve esmagamento da 1ª camada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (somente na poliéster); - Ângulos entre as trincas: 90, 140, 50 e 80°; - Comprimentos das trincas: 15, 15, 18 e 20mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 1050,00mm² (13,26% da área de superfície do cp).

TABELA 136 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,50kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
3	13	7,0	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 2 de 15 e 18mm; - da área atingida: 18mm; - Área atingida (A): 1017,36mm² (12,84% da área de superfície do cp). - Houve esmagamento da 1ª camada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (somente na poliéster); - Ângulos entre as trincas: 80, 90, 50 e 80°; - Comprimentos das trincas: 15, 17, 15 e 17mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 625,00mm² (7,89% da área de superfície do cp).
4	18	7,7	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trinca primária: 1; - Comprimento da trinca: 14mm; - Trinca secundária: 1 de 15mm; - Área atingida (A): 706,50mm² (8,92% da área de superfície do cp). - Houve esmagamento da 1ª camada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (somente na poliéster); - Ângulos entre as trincas: 90, 90, 90 e 90°; - Comprimentos das trincas: 10, 15, 20 e 10mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 600,00mm² (7,57% da área de superfície do cp).

TABELA 136 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,70kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
1	4	7,0	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4; - Ângulo entre as trincas: 90, 90, 100 e 80°; - Comprimento da trinca: 10, 12, 15 e 8mm; - Trincas secundárias: 2 de 8 e 10mm; - Área atingida (A): 400,00mm² (4,11% da área de superfície do cp); - O corpo de prova foi quase traspassado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 3 (com rompimento das fibras); - Ângulos entre as trincas: 140, 90 e 130°; - Comprimentos das trincas: 26, 20 e 15mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 1400,00mm² (17,67% da área de superfície do cp).
2	9	6,9	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 1; - Comprimento da trinca: 6mm; - Trinca secundária: 1 de 20mm; - Área atingida (A): 500,00mm² (6,31% da área de superfície do cp); - O corpo de prova foi quase traspassado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (com rompimento das fibras); - Ângulos entre as trincas: 90, 90, 110 e 70°; - Comprimentos das trincas: 40, 18, 10 e 10mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 1500,00mm² (18,94% da área de superfície do cp).

TABELA 136 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,70kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
3	14	6,1	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 2; - Ângulo entre as trincas: 140 e 220°; - Comprimento da trinca: 20 e 45mm (esta última ocorreu até a borda do corpo de prova); - Trinca secundária: 1 de 10mm; - Área atingida (A): 550,00mm² (6,94% da área de superfície do cp); - O corpo de prova foi quase traspassado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 3 (com rompimento das fibras); - Ângulos entre as trincas: 90, 130 e 140°; - Comprimentos das trincas: 17, 18 e 45mm (esta última ocorreu até a borda do corpo de prova); - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 1800,00mm² (22,72% da área de superfície do cp).
4	19	5,5	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 3 de 13, 18 e 20mm; - da área atingida: 20mm; - Área atingida (A): 1256,00mm² (15,86% da área de superfície do cp); - O corpo de prova foi quase traspassado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 3 (com rompimento das fibras); - Ângulos entre as trincas: 90, 150 e 120°; - Comprimentos das trincas: 25, 27 e 35mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 2200,00mm² (27,77% da área de superfície do cp).

TABELA 136 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,90kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
1	5	5,5	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trincas secundárias: 2 de 16 e 25mm; - Área atingida (A): 500,00mm² (6,31% da área de superfície do cp); - O corpo de prova foi traspassado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (com rompimento das fibras); - Ângulos entre as trincas: 90, 80, 90 e 100°; - Comprimentos das trincas: 13, 18, 20 e 25mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 2300,00mm² (29,04% da área de superfície do cp).
2	10	6,9	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trinca secundária: 1 de 15mm; - Área atingida (A): 345,00mm² (4,36% da área de superfície do cp); - O corpo de prova foi traspassado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (com rompimento das fibras); - Ângulos entre as trincas: 90, 80, 50 e 140°; - Comprimentos das trincas: 35, 25, 15 e 23mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 2000,00mm² (25,25% da área de superfície do cp).

TABELA 136 (continuação)

Comportamento dos corpos de prova do compósito no ensaio de impacto por queda de dardo

Massa: 0,90kg					
Amostra	Corpo de prova	Espessura do centro do corpo de prova (mm)	Falhou (x) Não-falhou (0)	Observações na região comprimida do corpo de prova	Observações na região tracionada do corpo de prova
3	15	7,0	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trinca primária: 1; - Comprimento da trinca: 10mm; - Trinca secundária: 1 de 14mm; - Área atingida (A): 280,00mm² (3,53% da área de superfície do cp); - O corpo de prova foi traspassado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (com rompimento das fibras); - Ângulos entre as trincas: 110, 90, 40 e 120°; - Comprimentos das trincas: 40, 20, 15 e 25mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 2000,00mm² (25,25% da área de superfície do cp).
4	20	6,3	x	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: não apresentou; - Trinca secundária: 1 de 20mm; - Área atingida (A): 400,00mm² (5,05% da área de superfície do cp); - O corpo de prova foi traspassado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trincas primárias: 4 (com rompimento das fibras e arrancamento de parte da última camada, com exposição da camada interna de poliuretana e juta); - Ângulos entre as trincas: 60, 90, 90 e 120°; - Comprimentos das trincas: 15, 15, 12 e 15mm; - Trinca secundária: não apresentou; - Área atingida (A): 2100,00mm² (26,51% da área de superfície do cp).

BELA 137

Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,10kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)	Danos na região tracionada do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)
1	1	6,0	2,54	2,54	3,16	3,16
2	6	7,5	0,99	1,2375	1,26	1,575
3	11	6,6	1,94	2,134	2,13	2,343
4	16	6,6	1,43	1,573	1,82	2,002
Média aritmética		6,675	1,725	1,8711	2,0925	2,27
Desvio padrão		0,6185	0,6678	0,5794	0,7976	0,6714

TABELA 138

Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,30kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)	Danos na região tracionada do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)
1	2	7,7	3,23	4,1451 *	3,79	4,8637
2	7	5,8	6,70	6,4767 *	11,36	10,9813
3	12	5,8	8,92	8,6227	13,26	12,818
4	17	7,0	8,84	10,3136	9,47	11,0486
Média aritmética		6,575	6,9225	7,3895	9,47	9,9279
Desvio padrão		0,9394	2,6677	2,6728	4,0906	3,4816

* Houve esmagamento da 1ª camada no ponto onde o dardo caiu.

TABELA 139

Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,50kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)	Danos na região tracionada do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)
1	3	6,8	15,86	17,9741 *	12,12	13,7356
2	8	6,0	18,94	18,94 *	13,26	13,26
3	13	7,0	12,84	14,9804 *	7,89	9,2053
4	18	7,7	8,92	11,4470 *	7,57	9,7146
Média aritmética		6,875	14,14	15,8354	10,21	11,4789
Desvio padrão		0,6994	4,2793	3,3763	2,9041	2,3484

* Houve esmagamento da 1ª camada no ponto onde o dardo caiu.

TABELA 140

Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,70kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)	Danos na região tracionada do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)
1	4	7,0	4,11	4,7951 *	17,67	20,6156
2	9	6,9	6,31	7,2565 *	18,94	21,781
3	14	6,1	6,94	7,0559 *	22,72	23,0994
4	19	5,5	15,86	14,5383 *	27,77	25,4558
Média aritmética		6,375	8,305	8,4115	21,775	22,7380
Desvio padrão		0,7088	5,1807	4,2342	4,5358	2,0760

* O corpo de prova foi quase traspassado pelo dardo.

TABELA 141

Danos sobre os corpos de prova do compósito submetidos ao ensaio de impacto por queda de dardo com a massa 0,90kg

Amostra	Número do corpo de prova	Espessura no centro do cp (mm)	Danos na região comprimida do cp (%)	Danos na região comprimida do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)	Danos na região tracionada do cp (%)	Danos na região tracionada do cp (%) (corrigidos para a espessura 6mm)
1	5	5,5	6,31	5,7842 *	29,04	26,62
2	10	6,9	4,36	5,014 *	25,25	29,0375
3	15	7,0	3,53	4,1185 *	25,25	29,4592
4	20	6,3	5,05	5,3025 *	26,51	27,8355
Média aritmética		6,425	4,8125	5,0548	26,5125	28,2381
Desvio padrão		0,6898	1,1759	0,7004	1,7866	1,2794

* O corpo de prova foi traspassado pelo dardo.