



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GENILSON CUNHA DE OLIVEIRA FILHO

**EFEITOS DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS REFORÇADOS POR TECIDO DE FIBRAS DE PIAÇAVA**

Recife

2019

GENILSON CUNHA DE OLIVEIRA FILHO

**EFEITOS DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS REFORÇADOS POR TECIDO DE FIBRAS DE PIAÇAVA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araújo Filho.

Coorientadora: Profa. Dra. Mirtania Antunes Leão.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel da Luz, CRB-4 / 2222

O48e Oliveira Filho, Genilson Cunha de.
Efeitos da hibridização nas propriedades mecânicas de compósitos reforçados por tecido de fibras de piaçava / Genilson Cunha de Oliveira Filho – Recife, 2019.

105 f., fig., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araújo Filho.

Coorientadora: Profa. Dra. Mirtania Antunes Leão.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Compósito polimérico. 3. Tecido de fibras de piaçava. 4. Hibridização. I. Araújo Filho, Oscar Olimpio de (Orientador). II. Leão, Mirtania Antunes (Coorientadora). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-461

GENILSON CUNHA DE OLIVEIRA FILHO

**EFEITOS DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS REFORÇADOS POR TECIDO DE FIBRAS DE PIAÇAVA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Aprovada em: 26/08/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profª Drª Mirtânia Antunes Leão (Coorientadora)
Instituto Federal da Bahia

Prof. Dr. Yogendra Prasad Yadava (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Cezar Henrique Gonzalez (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profª Drª Sara Horácio de Oliveira Maciel (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me iluminar sempre nos meu objetivo e metas de vida.

A minha família pelo apoio incondicional nos melhores e piores momentos.

A Universidade do Estado da Bahia (UNEB) pelo investimento na minha qualificação.

Ao Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho e a Dra. Mirtania Antunes Leão pela orientação e participação efetiva no planejamento e acompanhamento de todas as atividades para a concretização deste trabalho.

Ao Dr. Evans Paiva da Costa Ferreira da Universidade Federal do Rio Grande do Norte por colaborar no aprendizado sobre a laminação dos compósitos.

Aos amigos do DMMDC na UFBA, Anderson Luis da Paixão Café, Gilliam Leandro de Queiroga Lima, Tereza Crsitina Braga Ferreira, Cinara Ciberia Meireles Bahia e Joabson Guimarães da Silva, pelo companheirismo e disponibilidade de orientações.

A técnica Carina Soares do Nascimento pela realização dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura no IFBA.

Ao técnico Yuri Martins Campos pelo apoio dos ensaios destrutivos no laboratório do IFBA.

Aos técnicos de química do IFBA: Alex Silva de Cerqueira, Jamile Farias A. Soares, Josiane Francisca dos Santos e Marluce Moraes Oliveira Santos.

Aos professores Valter Alves Gomes Júnior e Cleverton Araújo Almeida pela utilização do Laboratório de Química do IFBA.

Ao Dr. Ricardo Fernandes Carvalho pela utilização do Laboratório de laminação a quente da Escola Politécnica da UFBA.

A todos os meus amigos e amigas que me deram apoio e contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao fornecedor da fibra de Piaçava, Augusto Souza, em Ilhéus-BA.

Aos Colegas da UFPE, Adson Beserra da Silva, Ednaldo Evangelista de Lacerda Junior e Jarmison de Araújo Silva, Juan Alberto Rojas Tueros e Ana Carla Santos da Silva pelas contribuições e conselhos.

A secretaria da UFPE em nome de Jorge Rodrigo da Silva Oliveira e Luana Antero de Melo pelo apoio imprescindível.

A coordenação, Dr. Cezar Henrique Gonzalez, do PPGEM-UFPE, pela compreensão e apoio.

A Janaina André Cirino e ao Ivaldo Dantas de França pelo apoio dos laboratórios do PPGEM-PE para realização de ensaios preliminares.

Aos colaboradores do IFBA: Dr. Rui Carlos de Sousa Mota, Dr. Niels Fontes Lima, Dr. Romilson Lopes Sampaio, Dr. Ronaldo Pedreira Silva, Dr. Marcelo Vera Cruz Diniz e a Eng. Ana Claudia Rangel da Conceição.

A Terphane pela atenção e contribuição

RESUMO

A substituição gradual de materiais convencionais por materiais compósitos torna-se realidade quando propriedades específicas não podem ser alcançadas por estes. Além disso, está sendo realizada a busca por novos compósitos que utilizem fibras naturais ou uma mistura de fibras naturais com fibras sintéticas como reforço, tendo em vista a questão ambiental. Nesse sentido este projeto de pesquisa visa o desenvolvimento de dois laminados compósitos, um baseado em tecido de fibra de piaçava e outro composto híbrido à base de fibra de piaçava e tecidos de vidro-E, tendo em vista o estudo da influência da hibridização no comportamento mecânico do compósito. As placas laminadas foram preparadas e processadas para o fabrico das amostras, de acordo com as especificações do ASTM D3039 - Ensaio Uniaxial de Tração e ASTM D790 - Ensaio de Flexão em Três Pontos. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) também foi realizada para analisar os mecanismos de danos provenientes das fraturas. Os resultados obtidos demonstraram que o processo de hibridização garantiu um crescimento considerável nas propriedades mecânicas do compósito, analisadas através dos ensaios mecânicos de tração uniaxial e flexão em três pontos.

Palavras-chave: Compósito polimérico. Tecido de fibras de piaçava. Hibridização.

ABSTRACT

The gradual replacement of conventional materials by composite materials becomes reality when specific properties cannot be achieved by them. In addition, a search is being made for new composites using natural fibers or a blend of natural fibers and synthetic fibers as reinforcement for environmental reasons. In this sense, this research project aims at the development of two composite laminates, one based on piassava fiber fabric and another hybrid composite based on piassava fiber and E-glass fabrics, in order to study the influence of hybridization on the behavior mechanical composite. The laminated plates were prepared and processed for sample manufacture in accordance with the specifications of ASTM D3039 - Uniaxial Tensile Test and ASTM D790 - Three Point Bending Test. Scanning Electron Microscopy (SEM) was also performed to analyze the mechanisms of fracture damage. The results showed that the hybridization process ensured a considerable growth in the mechanical properties of the composite, analyzed through mechanical tests of uniaxial traction and flexion at three points.

Keywords: Polymeric composite. Fabric fiber piassava. Hybridization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A evolução dos materiais da engenharia como o tempo.....	18
Figura 2 - Classificação dos Materiais Compósitos quanto ao tipo de reforço.	25
Figura 3 - Estrutura Química de constituintes de fibras vegetais.....	26
Figura 4 - Fibra Vegetal.....	27
Figura 5 - Fibra de Juta.	28
Figura 6 - Fibras de Licuri.....	29
Figura 7 - Fibra de Curauá.	30
Figura 8 - Fibra de Sisal.	31
Figura 9 - Palmeira de Piaçava.	32
Figura 10 - Características estruturais fibra de piaçava.	33
Figura 11 - Quantidade produzida da extração vegetal do Nordeste (toneladas)	35
Figura 12 - Quantidade produzida da Extração Vegetal do Norte (toneladas).	35
Figura 13 - Valor(R\$) de produção da Extração Vegetal do Brasil em 2016.	36
Figura 14 - Piaçava no tanque lavada.....	36
Figura 15 - Fibra bruta cortada.....	37
Figura 16 - Piaçava sendo cortada e empacotada para venda.	37
Figura 17 - Produção de fibra de vidro adaptado de Murphy 1994.	39
Figura 18 - Fibra de Aramida (kevlar).....	41
Figura 19 - Tecido de fibra de Carbono.....	42
Figura 20 - Aplicação da fibra de carbono na McLaren.	43
Figura 21 - Formas de Reforço. Figura A = Roving; Figura B = Manta; Figura C = Tecido.....	44
Figura 22 - Exemplo pré-formas.....	45
Figura 23 - Entrançado em forma tubular.....	45
Figura 24 - Tecidos Tafetá (a), Sarja (b) e Cetim (c).....	46
Figura 25 - Componentes do Tear.	47
Figura 26 - Sistema Global de referência do material compósito (x-y-z) e sistema de referência de uma lâmina (1-2-3), Mesoescala: lâmina e interface. ...	50
Figura 27 - Delaminação entre as camadas.....	51
Figura 28 - Rompimento da fibra de vidro em compósito polimérico.....	51
Figura 29 - Rompimento característico de fibra natural no compósito de sisal.	52

Figura 30 - Vários exemplos de danos.....	53
Figura 31 - Fluxograma da produção do compósito	55
Figura 32 - Fibra de Piaçava sendo utilizada para se confeccionar um tecido.....	57
Figura 33 - Fibra passando pelo processo de tratamento alcalino.....	57
Figura 34 - Tecido natural de piaçava.	58
Figura 35 - Tecido de fibra de vidro tipo E.	58
Figura 36 - Distribuindo a resina no tecido.....	59
Figura 37 - Espalhando uniformemente a resina no tecido.	59
Figura 38 - Dispositivo de alguns ângulos.....	60
Figura 39 - Esquema do compósito de piaçava.	61
Figura 40 - Esquema do compósito híbrido.....	61
Figura 41 - Placa de Piaçava (MPMPM).	62
Figura 42 - Placa de Poliester com Piaçava e Fibra de vidro-E.	62
Figura 43 - Tração no Compósito de Piaçava.	64
Figura 44 - Flexão em três pontos no Compósito de Piaçava.....	64
Figura 45 - Tração do compósito híbrido seguindo a ASTM D3039.....	65
Figura 46 - Corpo de prova de híbrido para flexão seguindo a ASTM d790.	65
Figura 47 - Corpo de prova de tração CPIA	66
Figura 48 - Corpo de prova de piaçava CPIA seguindo as normas de Flexão ASTM.	66
Figura 49 - Ensaio de Densidade Volumétrica	68
Figura 50 - EMIC DL 30000.....	68
Figura 51 - MEV da Marca TESCAN Modelo VEJA 3 LMU.....	69
Figura 52 - Metalizador para banhar a fibra natural de ouro. Marca Quorum e Modelo Q150R.	70
Figura 53 - Tensão x Deformação para o CPIA	72
Figura 54 - Tensão x Deformação para o CHYB.....	74
Figura 55 – Desvio padrão dos ensaios de tração uniaxial do CPIA e CHYB.....	75
Figura 56 - Módulo de Elasticidade para o ensaio de tração	76
Figura 57 - Deformação para o ensaio de tração	76
Figura 58 - Fratura do tipo LAT no CPIA pela ASTM	77
Figura 59 - MEV de CPIA mostrando fraturas adesiva e coesiva na matriz.....	78
Figura 60 - Bolha e fratura adesiva.	78

Figura 61 - Arrancamento onde se tem a fibra de piaçava aparente.....	79
Figura 62 - Fratura adesiva e coesiva no compósito.....	79
Figura 63 - Fratura coesiva na matriz.....	80
Figura 64 - Fratura coesiva na fibra de piaçava	80
Figura 65 - Fraturas coesivas na matriz.	81
Figura 66 - Bolhas com dimensões.	81
Figura 67 - Amostra de CHYB para o ensaio de tração do tipo LAT	83
Figura 68 - Fibra de Vidro-E.....	83
Figura 69 - Compósito com a fibra de piaçava e a de vidro-E.....	84
Figura 70 - Tração x Deflexão para o ensaio CPIA de flexão em três pontos	85
Figura 71 - Amostras de CPIA do ensaio de flexão em tres pontos.	85
Figura 72 - CPIA após ensaio de flexão.....	86
Figura 73 - Tensão x Deflexão de CHYB.	87
Figura 74 - Tensão Última do CHYB	88
Figura 75 - Gráfico do Modulo de Young para flexão em três pontos.	89
Figura 76 - Deflexão para o ensaio de flexão em três pontos.	89
Figura 77 - Visibilidade da fibra de vidro-E no CHYB ensaiado.	90
Figura 78 - Fibra de vidro-E em outra perspectiva.	90
Figura 79 - Gráfico comparativo com alguns compósitos.....	91
Figura 80 - Configuração do laminado hibrido de curauá.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais de matriz polimérica para fibra de vidro.....	20
Tabela 2 - Vantagens da Utilização dos compósitos.....	21
Tabela 3 - Composição das Fibras Vegetais.....	27
Tabela 4 - Propriedades da Fibra de Licuri.	29
Tabela 5 - Valor da produção na extração vegetal (mil reais).	34
Tabela 6 - Propriedades de algumas Fibras Naturais.	38
Tabela 7 - Comportamento mecânico de compósitos de epoxi de alto desempenho com vários tipos de fibras sintéticas.	40
Tabela 8 - Propriedades Mecânicas do CPIA – tração Uniaxial.....	73
Tabela 9 - Propriedades Mecânicas do CHYB – tração Uniaxial.....	74
Tabela 10 - Propriedades Mecânicas do CPIA - Flexão em Três pontos.....	86
Tabela 11 - Propriedades mecânicas do CHYB - Teste de flexão em três pontos....	88
Tabela 12 - Valores das tensões últimas dos compósitos utilizados.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CHYB	Compósito Híbrido (tecido de piaçava e tecido de fibra)
CLCG	Compósito de curauá e vidro-E
CLSG	Compósito de sisal e vidro-E
CLSJG	Compósito de juta, sisal e vidro-E
CP	Corpo de prova
CP'S	Corpos de prova
CPIA	Compósito de Tecido de Piaçava
CPLH	Compósito Polimérico Laminado Híbrido Reforçado por tecido de Piaçava e Tecido de Fibra de Vidro
CPLP	Compósito Polimérico Laminado Reforçado por tecido de Piaçava
DCB	Double Cantilever Beam (Modo I da norma ASTM D790)
DMMDC	Doutorado Multi-Institucional e Multidisciplinar em Difusão do Conhecimento na UFBA
ENF	End Notched Flexure (Modo II da norma ASTM D790)
FC	Tecido de fibra de curauá = Curaua fiber
FV	Tecido de fibra de vidro-E = Glass fiber
HIPS	High Impact Polystyrene
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEKP	Methyl Ethyl Ketone Peroxide ou Peroxido de metiletil cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPMPM	Matriz Piaçava Matriz Piaçava Matriz
PAN	PoliAcriloNitrila
PIRFV	Poliéster Insaturado Reforçado com Fibra de Vidro
PTFE	PoliTetraFluorEtileno
PVC	Policoreto de Vinila
R	Resina de poliéster

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
2.2	TIPOS DE MATERIAIS	18
2.3	COMPÓSITOS HÍBRIDOS	22
2.3.1	Processo de Fabricação de Compósitos Poliméricos	24
2.4	REFORÇOS	24
2.4.1	Fibras Naturais	25
2.4.1.1	<i>Fibra de Juta</i>	28
2.4.1.2	<i>Fibra de Licuri</i>	28
2.4.1.3	<i>Fibra de Curauá</i>	29
2.4.1.4	<i>Fibra de Sisal</i>	30
2.4.1.5	<i>Fibra de Piaçava</i>	31
2.4.2	Fibras Sintéticas	38
2.4.2.1	<i>Fibra de Vidro</i>	38
2.4.2.2	<i>Fibra Poliamida (Kevlar)</i>	40
2.4.2.3	<i>Fibra de Carbono</i>	41
2.5	CONFECÇÃO DE REFORÇOS (TECELAGEM)	43
2.5.1	Padrão dos tecidos entrelaçados (<i>woven fabrics</i>)	46
2.6	MECANISMOS DE DANOS	47
2.6.1	Análise Macroscópica do Mecanismo de dano	49
2.6.2	Análise Microscópica do Mecanismo de dano	50
2.7	TRATAMENTO QUÍMICO	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	GERAÇÃO DAS PRIMEIRAS AMOSTRAS	56
3.1.1	Ensaio Mecânico nos Compósitos Laminados	63
3.1.2	Determinação de Densidade do compósito elaborado	67
3.1.3	Análise Microscópica das fraturas dos compósitos	69

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1	ENSAIOS MECÂNICOS DO LAMINADO COM TECIDO DE PIAÇAVA.	71
4.1.1	Densidade Volumétrica.....	71
4.1.2	Ensaio de Tração Uniaxial - CPIA	71
4.1.3	Tração Uniaxial - CHYB.....	73
4.1.4	Influência da Hibridização – Estudo Comparativo	75
4.2	ANÁLISE DE FRATURA – ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL (CPIA)	76
4.3	ANÁLISE DE FRATURA – ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL (CHYB)...	82
4.4	ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS – CPIA.....	84
4.5	ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS – CHYB	87
4.6	INFLUÊNCIA DA HIBRIDIZAÇÃO – ESTUDO COMPARATIVO.....	88
4.7	MICROGRAFIA DA FLEXÃO EM TRÊS PONTOS - CHYB	89
4.8	COMPARATIVO CHYB COM OUTROS COMPÓSITOS HIBRIDIZADOS	91
5	CONCLUSÕES.....	93
5.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS LAMINADOS CPIA E CHYB	93
5.2	ANÁLISE DA FRATURA.....	93
6	TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

Compósitos são materiais híbridos que se constituem pela combinação dos componentes orgânicos e inorgânicos nas quais apresentam propriedades complementares dando origem a um único material com propriedades diferenciadas daquelas que lhe deram origem (JOSE e PRADO, 2005).

De maneira simples a constituição dos compósitos fibrosos é formada pela união de fibras longas ou curtas em meio de uma matriz atuante como material de reforço. A resina de poliéster é mais utilizada como matriz polimérica por possuir cura rápida, boas propriedades mecânicas e custo de aquisição baixo (TABATABAI, JANBAZ e NABIZADEH, 2018).

O compósito híbrido contém dois ou mais tipos de fibras diferentes, que juntas dão as propriedades desejadas ao compósito (JAWAID e KHALIL, 2011).

Destaca-se que o compósito híbrido depende de características e propriedades de cada elemento na composição. No processo de elaboração de um compósito se espera que as vantagens que um elemento (fibras) possui seja compartilhado na união formada com outro elemento. Assim sendo, o novo elemento constituído, o compósito, irá depender da compatibilidade dos elementos envolvidos, adicionados e compatíveis como reforço, principalmente na forma híbrida (JAWAID e KHALIL, 2011).

As fibras vegetais são, geralmente, classificadas de acordo com a sua origem e podem ser agrupadas em fibras de semente (algodão), fibras de caule (bananeira, juta, linho, cânhamo), fibras de folhas (sisal, piaçava, curauá, abacá, henequém), fibras de fruto (coco) e fibras de raiz (zacatão) (BISMARCK e LAMPKE, 2005).

As dificuldades encontradas por compósitos reforçados por fibras naturais (aderência, compatibilidade fibra matriz, absorção de umidade, resistência mecânica etc.) vem diminuindo devido a inúmeras pesquisas sendo realizadas em relação a isso. A forma como as fibras são adicionadas na matriz podem influenciar, na resistência mecânica do compósito, bem como adição de fibras sintéticas com as fibras naturais formando os compósitos híbridos. As fibras são usadas como reforço de materiais a base de matriz polimérica na qual pode ser moldada de diversas formas como tecidos, tapetes e fios (SANJAY, M R; MADHU, P; JAWAID, MOHAMMAD; SENTHAMARAIKANNAN, P; SENTHIL, S; PRADEEP, S, 2017).

A pesquisa da fibra da casca exterior do côco (chamada de coir) é usada para fazer cordas e esteiras. Isso se deve ao aumento da consciência ambiental e do interesse da comunidade, pois as novas regulamentações ambientais e insustentáveis do consumo de petróleo levaram a pensar no uso de materiais ecológicos. Fibra natural é considerada um dos materiais ambientalmente amigáveis que têm boas propriedades em comparação com fibras sintéticas (MAY-PAT, VALADEZ-GONZALEZ e HERRERA-FRANCO, 2013).

A composição química de celulose e lignina do côco era de 32 a 43 (wt %) e de lignina em torno de 40 a 45 (wt%). Esses parâmetros estão bem próximos da piaçava que foram de 31,6 (wt%) e 48 (wt%), respectivamente (MOHAMMED, ANSARI, *et al.*, 2015; PEREIRA, FREITAS, *et al.*, 2015)

Os Indicadores do ano de 2015 mostraram o interesse na indústria de NFPCs (Compósito Polimérico Reforçado por Fibra Natural = Natural Fiber Reinforced Polymer Composites) que obteve um grande crescimento em todo o mundo. A estimativa foi bem aceita em virtude do seu crescimento industrial de NFPC em torno de 10% no mundo (MOHAMMED, LAYTH; ANSARI, M N M; PUA, GRACE; JAWAID, MOHAMMAD; ISLAM, M SIAFUL, 2015).

As propriedades mecânicas que se avalia em um compósito de polímero reforçado com fibra natural, resulta, de propriedades das composições químicas dos materiais envolvidos, e das propriedades da interface (que circundam a região da fibra). A propagação de tensão da matriz para a fibra acontece na interface sendo importante identificar suas propriedades para entender melhor a resposta do compósito. De modo geral, se aceita que a falta de uma aderência mais eficaz fibra-matriz demonstra fracas propriedades no compósito. Existem inúmeras pesquisas para reduzir a falta de compatibilidade entre as fibras celulósicas hidrofílicas e as matrizes poliméricas hidrofóbicas (GEORGE, SREEKALA e THOMAS, 2004; KABIR, WANG, *et al.*, 2011; KALIA, KAITH e KAUR, 2009). Ainda, alguns relatos mencionam a pré-impregnação da fibra com a solução de poliolefina no auxílio da adesão fibra-matriz (VALADEZ-GONZALEZ, A; CERVANTES-UC, J M; OLAYO, R; HERRERA-FRANCO, P J, 1999).

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudo da influência da hibridização nas propriedades mecânicas e mecanismos de danos em um compósito polimérico reforçado por tecido unidirecional de piaçava.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolvimento de dois laminados compósitos de matriz polimérica, sendo um reforçado somente com tecido unidirecional de fibras de piaçava (**CPIA**) e um tipo híbrido com camadas alternadas de tecido bidirecional de vidro e tecido unidirecional de piaçava (**CHYB**);
- Estudo do desempenho mecânico do laminado compósito (**CPIA**) (resistência, rigidez e fratura) mediante os ensaios mecânicos de tração uniaxial e flexão em três pontos;
- Estudo do desempenho mecânico do laminado compósito **CHYB** (resistência, rigidez e fratura) mediante os ensaios mecânicos de tração uniaxial e flexão em três pontos;
- Estudo da influência da hibridização, através de análise comparativa, das propriedades mecânicas e características da fratura do compósito (**CPIA**).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

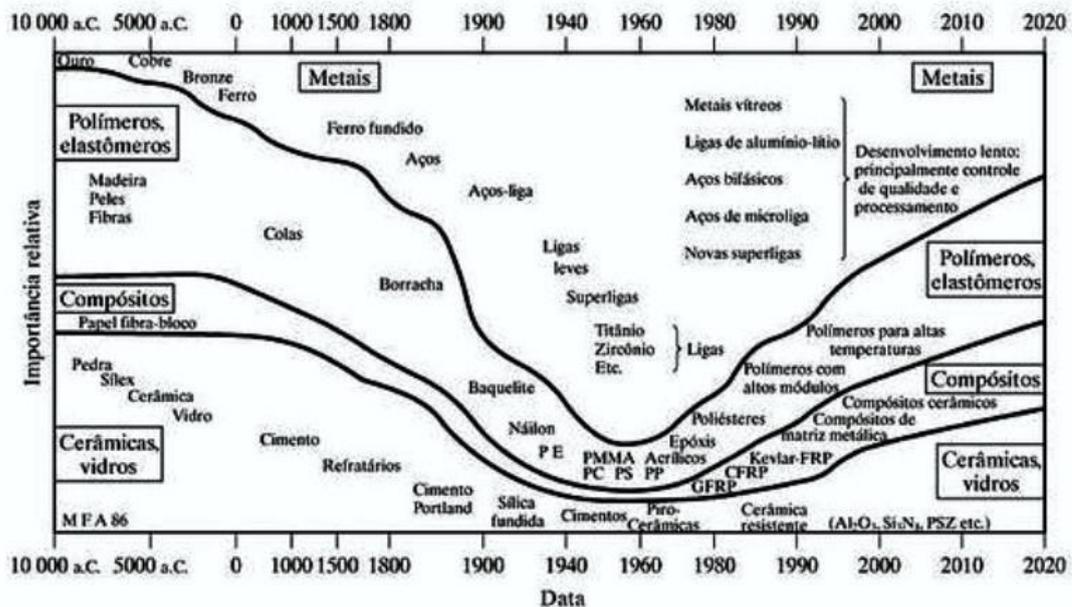
Nesse item serão apresentados os fundamentos essenciais para trabalho de pesquisa desenvolvido.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Figura 1 mostra uma interpretação visual preponderante sobre a importância dos materiais da engenharia no transcorrer da história humana. Contudo, a escala do tempo demonstra a não linearidade, devido a evolução ser muito rápida da tecnologia nos tempos modernos.

E nesse contexto é possível ver que os compósitos estão presentes na história desde as ligas metálicas.

Figura 1 - A evolução dos materiais da engenharia como o tempo.



Fonte: (SHACKERLFORD, 2008) *apud* (ASHBY, 2005)

2.2 TIPOS DE MATERIAIS

A produção em grande escala das matrizes poliméricas se deu após 1930 onde os plásticos modernos se desenvolveram com a criação da química orgânica. A expressão "Polímero" foi criada por Berzelius, em 1832, em oposição ao isômero, para

fixar conjuntos de pesos moleculares múltiplos, ou de mesmo peso molecular (RAMOS, 2007). O termo polímero do grego significa muitas partes ou macromolécula resultante da união de moléculas menores, segundo o Dicionário Priberam.

A baquelita, descoberta por Leo Hendrik Baekeland em 1907, foi a primeira da série dos plásticos sintéticos (CALLAPEZ, 2007).

Em 1935, foi descoberto o polietileno. Em 1938 descobriu-se o politetrafluoretileno (PTFE).

A matriz polimérica serve para dar forma ao resultado final previsto, e possui a finalidade de agir como uma interface de transferência de carga para os reforços incorporados, como uma fibra vegetal, além de proteger o reforço da abrasão mútua, danos e meios de degradação (RAMOS, 2007).

Os polímeros quanto ao comportamento mecânico são classificados (CANEVAROLO JR, 2006):

- a) termoplásticos. Podem ser repetidamente conformados mecanicamente, através de variação de temperatura e pressão, podendo ser submetidos a novas temperaturas e pressão para produzirem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo. Este procedimento é uma forma reversível (transformação física). Ex: polietileno, policloreto de vinila (PVC), polipropileno e poliestireno;
- b) termorígidos. São conformáveis plasticamente apenas em um estágio intermediário de sua fabricação. O produto final é duro e não amolece mais com o aumento da temperatura. Uma conformação plástica posterior não é possível. Não são recicláveis. Os termorígidos são completamente amorfos, por não apresentar estrutura cristalina. Podem ser chamados de Termofixos. Ex; baquelite, resinas epoxídicas, poliésteres e poliuretanos;
- c) elastômeros (borrachas). Materiais conformáveis plasticamente que se alongam elasticamente de maneira acentuada até a temperatura de decomposição e mantem estas características em baixas temperaturas. São parcialmente cristalinos semelhantes aos termoplásticos. Ex: borracha natural, neopreno, borracha de estireno, borracha de butila e borracha denitrile.

Para Shackerlford (2008) os termofixos mais utilizados podem ser verificados na Tabela 1 com suas principais características e aplicações. Vale ressaltar que algumas aplicações já estão bem mais desenvolvidas, pois já foram aprimoradas algumas aplicações na última década.

Tabela 1 - Materiais de matriz polimérica para fibra de vidro.

Polímero	Características e Aplicações
Termofixo	
Epóxis	Alta Resistência (para recipientes feitos por bobinagem)
Poliésteres	Para estruturas gerais (normalmente usada para reforço de
Fenólicos	Aplicações em altas temperaturas
Silicones	Aplicações elétricas (Usada em placas de circuito impresso)

Fonte: (SHACKERLFORD, 2008)

Os materiais compósitos são materiais projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais. Exemplo típico é o compósito de fibra de vidro em matriz polimérica. A fibra de vidro confere resistência mecânica, enquanto a matriz polimérica, na maioria dos casos constituída de resina epoxi é responsável pela flexibilidade do compósito. (PADILHA, 1997).

A produção de Blendas é uma forma de obter novos compostos poliméricos sem necessitar investir em novos monômeros ou processo de polimerização. Para isso já existem aplicações comerciais como o poliestireno de alto impacto (HIPS¹) uma blenda imiscível² composta de poliestireno, polibutadieno e uma quantidade concentrada do copolímero por enxertia³ dos dois componentes (PAOLI, 2008).

¹ HIPS do inglês “*high impact polystyrene*”

² Que não admite mistura ou liga. “**imiscível**”, *in* Dicionário Priberam da Língua Portuguesa.

³ Enxertia – Segundo do dicionário do priberam algo ou coisa que se juntou a outra para um fim qualquer; introduzir ou inserir algo.

O reforço na matriz polimérica pode ser feito dando ao polímero uma adição de carga particulada fibrosa sintética (fibra de vidro, carbono, kevlar) para aumentar as propriedades mecânicas do novo material constituído (CANEVAROLO JR, 2006).

De acordo com Shackerlford (2008) a moldagem por compressão ou moldagem por transferência são os métodos mais utilizados para os termofixos, no caso de se utilizar o poliéster.

Os compósitos fibrosos são materiais híbridos orgânico-inorgânicos que se constituem pela combinação dos componentes orgânicos e inorgânicos nas quais apresentam propriedades complementares dando origem a um único material com propriedades diferenciadas daquelas que lhe deram origem de acordo com (MAMEDE e PRADO, 2005).

De maneira simples a constituição dos compósitos fibrosos é formada pela união de fibras longas, em meio de uma matriz, atuante como material de reforço.

A resistência de uma fibra, em particular, a sua tração unidirecional é bem maior que a de sua matéria-prima bruta. Em geral possuem baixas densidades e variação de média a alta resistência. Ponto preponderante se dará pelos valores de razão entre rigidez à tração e a densidade.

Em resumo as vantagens de utilização dos compósitos poliméricos podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Vantagens da utilização dos compósitos.

Vantagens da utilização dos compósitos poliméricos
Baixo peso específico e facilidade de transporte
Resistência as intempéries como umidade, vento, sol e oscilações de temperaturas
Adaptação a designers complexos
Tempo de vida útil prolongado devido à composição
Elevada resistência mecânica e rigidez específica
Facilidade de manutenção e reparos

Fonte: (FELIPE, 2012).

A finalidade do compósito reflete a adoção e a importância da combinação de materiais nas quais estão reportadas na História da Humanidade, como a fábrica de tijolos no Egito Antigo e de Espadas Medievais (GUIMARAES, 2006).

A nova estrutura deve se constituir de um novo material com características homogêneas. A composição de materiais permite vantagens nas propriedades mecânicas, tais como o aumento da rigidez e da resistência mecânica, melhores resposta a fadiga, redução de peso ou densidade, garantindo o nível de resistência dentre outras. O objetivo final é a obtenção de um novo material final (um composto ou compósito) com propriedades mecânicas superiores aos seus constituintes originais (GUIMARAES, 2006).

A aplicabilidade do compósito nos setores petrolíferos ou químicos requer transporte de fluidos a altas pressões e temperaturas, onde esses são potenciais usuários de estruturas tubulares cilíndricas. Os tubos são usados em aplicação de armamentos, desde armas leves às pesadas, variando o calibre e comprimento dos tubos, esperando redução do seu peso e mantendo a capacidade primária de resistência (GUIMARAES, 2006).

Na indústria bélica se exemplifica a produção de armamentos e proteção balística: produção de capacetes de soldados a coletes balísticos e blindagens para carros de combate e veículos militares, lanchas e helicópteros (GUIMARAES, 2006).

Já na engenharia cita-se os revestimentos e isolamento de edifícios, portas e janelas de segurança, torres de energia eólica (torres e pás), tubos e reservatórios de pressão (SANTOS, 2010).

Para o desporto e lazer tem-se os equipamentos esportivos (tacos de golfe, raquete de tênis mais modernos, pranchas de surf e outros) (SANTOS, 2010).

2.3 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

É interessante falar sobre o termo híbrido que possui uma abrangência de contextualização diversificada, pela sua própria origem grega (FELIPE, 2012).

Segundo Fuet *et al.* (2002) e Karger (2000) um compósito híbrido tem um tipo de matriz que incorpora dois ou mais tipos de reforços.

De acordo com Thwe (2003) o termo compósito híbrido deve conter dois ou mais tipos de fibras diferentes, no qual esse compósito vem a proporcionar a vantagem de complementar alguma propriedade que o outro elemento do compósito

não tenha.

Destaca-se que o compósito híbrido depende de características e propriedades de cada elemento na composição. Espera-se que as vantagens de uma fibra possam ser complementadas por outra fibra ou elemento. Assim sendo, a utilização desse processo, fomentará um balanceamento entre custo e desempenho para resolver a aplicação. Para obter-se uma solução mais eficiente, devem-se observar quais reforços do compósito híbrido são compatíveis com os elementos a serem adicionados (JAWAID *et al.*, 2001; JOHN *et al.*, 2008).

No Compósito híbrido as propriedades que prevalecem para avaliação das possíveis vantagens dessa mistura são:

- a) propriedade da fibra;
- b) comprimento das fibras individuais;
- c) orientação da Fibra;
- d) ligação da fibra com a matriz (interface, aderência);
- e) disposição das fibras na Matriz;
- f) deformação individual até a ruptura da fibra estudada.

A resistência do compósito híbrido depende da tensão de falha das fibras individuais, pois os melhores resultados são obtidos quando as fibras são compatíveis (JOHN e THOMAS, 2008).

As propriedades desse sistema híbrido consistem em dois componentes que podem ser previstos por regras de misturas, conforme equação 1.

$$P_H = P_1V_1 + P_2V_2 \quad (1)$$

Onde:

P_H = é a propriedade investigada;

P_1 = propriedade do primeiro sistema ou fibra estudada;

P_2 = propriedade do segundo sistema ou fibra estudada;

V_1 = fração de volume relativa do primeiro sistema

V_2 = fração de volume relativa do segundo sistema

Onde $V_1 + V_2 = 1$.

2.3.1 Processo de Fabricação de Compósitos Poliméricos

O processo de fabricação ou desenvolvimento com que os componentes dos materiais são misturados está relacionado com os métodos e propriedades de cada material a ser combinado, que são diferentes. As diversas formas nas quais os processos devem ser utilizados dependem daquilo que se obterá como produto final (formato, dimensão e acabamento do produto) e qual molde, aberto ou fechado (LEÃO, 2008).

No caso do molde aberto, com tecnologia mais simples e pequena produção em baixa escala, tem-se:

- a) laminação manual (Hand Lay Up);
- b) laminação a pistola;
- c) centrifugação;
- d) enrolamento;
- e) moldagem por compressão;
- f) injeção;
- g) pultrusão.

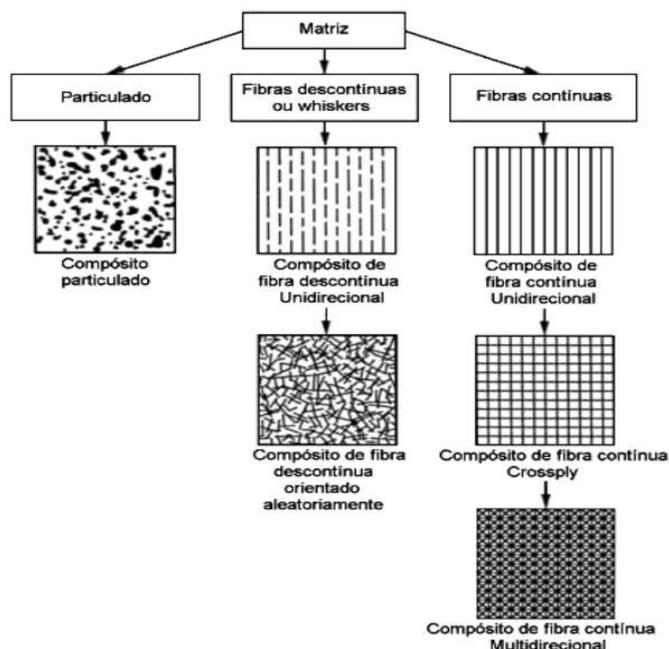
2.4 REFORÇOS

Os reforços podem ser distribuídos da seguinte forma:

- a) orgânico – aramida e poliamida;
- b) mineral – fibra de carbono e de vidro;
- c) metal – Boro e Alumínio;
- d) fibras naturais.

A classificação dos compósitos quanto ao tipo de reforço pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2 - Classificação dos Materiais Compósitos quanto ao tipo de reforço.



Fonte: (DANIEL, *et al.*, 2006)

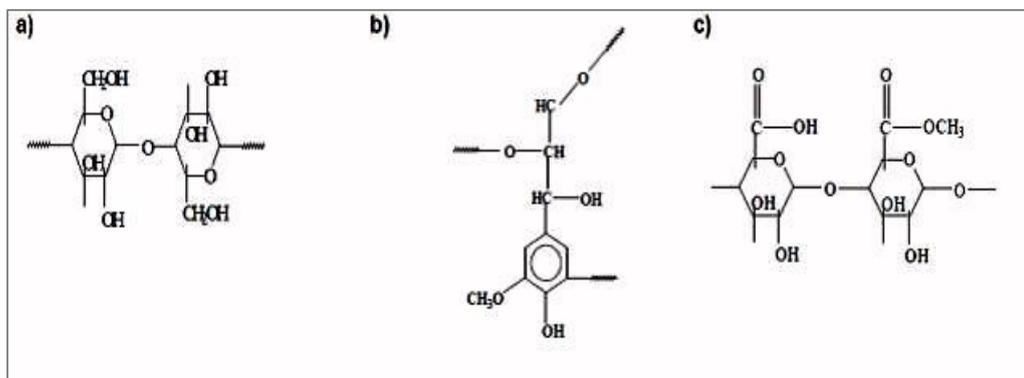
2.4.1 Fibras Naturais

As fibras vegetais são, geralmente, classificadas de acordo com a sua origem e podem ser agrupadas em fibras de semente (algodão), fibras de caule (bananeira, juta, linho, cânhamo), fibras de folhas (sisal, piaçava, curauá, abacá, henequém), fibras de fruto (côco) e fibras de raiz (zacatão) (MORASSI *apud* SILVA, 2003).

Segundo Nabi Saheb e Jog (1999), as fibras de juta, rami e sisal são as mais utilizadas em compósitos poliméricos.

As estruturas mais conhecidas nas fibras chamadas de lignocelulosicas estão esquematizadas pela Figura 3 que representam a constituição básica formada por celulose, hemicelulose e lignina. Existem ainda a pectina, sais inorgânicos, substâncias nitrogenadas e corantes naturais (PAULA, 2011)

Figura 3 - Estrutura Química de constituintes de fibras vegetais.



Fonte: (PAULA, 2011)

a) celulose; um polímero linear; b) lignina; um polímero reticulado; c) pectina; molécula

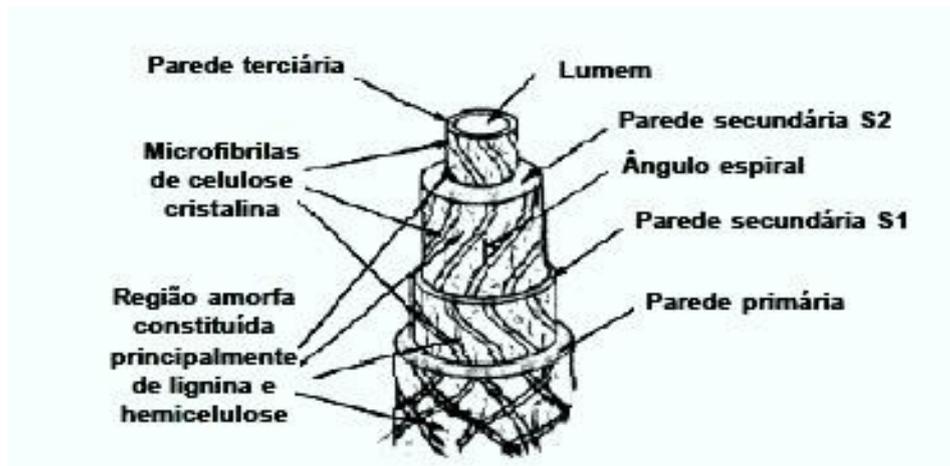
A celulose é o componente básico de todas as plantas, possui ligações de hidrogênio, sendo hidrofílica (podem absorver água na faixa de 8% a 12,6%) (PAULA, 2011).

A lignina com parte da fibra possui a função de juntar as fibras celulósicas, formando uma parede celular. É denominado de polímero amorfo na qual possui constituintes alifáticos e aromáticos. Seu percentual presente nas fibras influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise. Com isso, permite resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, dando maior enrijecimento na parede celular e criando uma proteção aos carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos. As Fibras que possuem alto teor de lignina são consideradas de excelente qualidade e flexibilidade (SILVA, 2011).

Outros componentes das fibras vegetais são a pectina e componentes minerais. A pectina, tem uma função aglutinante, sendo um polissacarídeo rico em ácido galacturônico, evidenciado nas paredes celulares. Os componentes minerais, depois de incinerados, tem como resultado a formação das cinzas (SILVA, 2011).

A estrutura da fibra vegetal pode ser vista pela Figura 4 onde são observadas diversas partes até chegar ao lúmen que seria a denominação da fibra "real".

Figura 4 - Fibra Vegetal



Fonte: (SILVA, 2011)

A incompatibilidade entre as fibras hidrofílicas e os polímeros que são hidrofóbicos, pode acarretar a necessidade de inserir aditivos ou agentes químicos para aumentar a capacidade de ligação química entre as fases de composição de um compósito (SILVA, 2011).

A composição de algumas fibras vegetais é mostrada na Tabela 3

Tabela 3 - Composição das Fibras Vegetais.

Fonte de Fibra	Ângulo espiral (°)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Pectina (%)	Cinza (%)	Água (%)
Sisal	20	65,8	12	9,9	0,8	NA	10
Bananeira	-	60-65	6-8	5-10	NA	4,7	10-15
Juta	8	64,4	12	11,8	0,2	NA	10
Rami	7,5	68,6	13,1	0,6	1,9	NA	10
Coco	45	36-43	0,15-0,25	20-45	3	2,7-10,2	10-12
Algodão	-	82,7	5,7	-	5,7	NA	10
Linho	10	64,1	16,7	2	1,8	NA	10

Fonte: (BLEDZKI, REIHMANE e GASSAN, 1996)

2.4.1.1 Fibra de Juta

É uma fibra da família das *Filáceas*, obtida das espécies *Corchorus*, cultivada na Índia e Bangladesh. É de origem de climas quentes e úmidos, necessitando de solo fértil e com boa drenagem para se desenvolver. No Brasil seu cultivo se dá na região alagadiça da Amazônia, na qual existem altas temperaturas e água demasiadamente (LION FILHO, 2013). A Figura 5 mostra a Juta sendo armazenada e como sua fibra é longa.

Figura 5 - Fibra de Juta.



Fonte: (GUERREIRO, 2015)

Essa fibra é biodegradável e na fase de crescimento auxilia a controlar a erosão, apresentando boas propriedades ecológicas. Possui um comprimento de 25 a 300 milímetros, sendo utilizada em sacarias, e com destaque no armazenamento de produtos agrícolas e bolsas esportivas (LEÃO, 2008).

2.4.1.2 Fibra de Licuri

A fibra de licuri (*Syagrus coronata*) é uma palmeira descoberta no leste do rio São Francisco, situado no nordeste, especificamente na Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, além do Estado de Minas Gerais (LEÃO, 2013). A Figura 6 mostra as fibras de licuri.

O fruto do licuri pode servir de ingredientes para se fazer cuscuz, uma iguaria típica da culinária nordestina (LEÃO, 2013). Algumas características da fibra de licuri são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades da Fibra de Licuri.

Diametro médio (mm)	Densidade Volumetrica média (g/cm³)	Absorção máxima (%)	Resistência à tração (MPa)	Modulo de Elasticidade (GPa)
0,141	0,542	109,98	369,8 – 902,0	4,5 – 43,25

Fonte: (LEÃO, 2013)

Figura 6 - Fibras de Licuri.



Fonte: (LEÃO, 2013)

2.4.1.3 Fibra de Curauá

A fibra de curauá (*Ananas erectifolius*) é uma planta originada da Amazonas ou região norte do Brasil. Ela é da família das bromeliáceas que vem merecendo uma atenção devida nas suas aplicações na linha automotiva e outros fins. Existe uma tendência a estudar essa fibra devido a sua resistência a tração em torno de 400 MPa. Contudo, a sua diversidade heterogênea expõe sua grande dispersão nessa

propriedade, que pode variar de 200 MPa a 700 MPa, sendo comum em fibras vegetais individuais (MONTEIRO e AQUINO, 2007). Isso é ocasionado pela variação dimensional ao longo do comprimento das fibras e pela diversidade dos diâmetros nas fibras. (SILVA e AQUINO, 2008)

A resistência a tração desta fibra é cerca de 5 a 9 vezes maior quando comparada às fibras consideradas de boa resistência nessa classe vegetal (SILVA, *et al.*, 2008; SATYANARAYANA, *et al.*, 2007; MONTEIRO, *et al.*) Esta fibra possui um comprimento de aproximadamente 1 a 1,5 m, largura de 0,04 m e espessura no valor de 5 mm (SILVA, 2010). A Figura 7 mostra a fibra de curauá.

Figura 7 - Fibra de Curauá.



Fonte: (MONTEIRO, *et al.*, 2006)

2.4.1.4 Fibra de Sisal

De acordo com Lion Filho (2013) a fibra de Sisal é retirada de uma planta que possui origem no México, chamada de *Agave Sisalana Perrine*. Esta possui alta resistência a clima seco e inóspito. No Brasil essa fibra tem uma produção de grande escala mundial, sendo que o estado da Bahia produz uma quantidade correspondente a 80% da produção total do país. A fibra de sisal pertence a família de fibras longas que possuem medidas em torno de 90 a 120 centímetros de comprimentos.

De acordo com a literatura, a fibra de sisal (Figura 8) é muito dura e resistente. Esta é utilizada na confecção de produtos artesanais como bolsas, chapéus, cintos,

cortinas, cordas de vários usos, como para embarcações navais, tapetes e outros (LION FILHO, 2013).

Possui um dos maiores valores de módulo de elasticidade e que deve ser utilizado como uma forma de reforço nos polímeros (LEÃO, 2008).

Figura 8 - Fibra de Sisal.



Fonte: (SISAL, 2015)

As indústrias automobilísticas usam muito as fibras de sisal no lugar das fibras de vidro, em virtude de sua capacidade de absorção da transpiração humana, ainda mais para os profissionais que ficam longos períodos sentados. Inclusive, a Mercedes Bens, da Alemanha já a utiliza em seu estofamento (LION FILHO, 2013).

2.4.1.5 Fibra de Piaçava

A piaçava (Figura 9) faz parte da família das palmeiras que são, de forma geral, arborescentes, e excepcionalmente podem se apresentar como trepadeiras ou acaules, com raízes adventícias basilares (essencialmente por acaso). São tropicais e plantas de grande utilidade por possuírem valor ornamental, comercial e industrial (AQUINO, 2003).

Exemplificando suas utilidades essenciais, pode-se citar: cera vegetal, óleos diversos, azeite comestível, materiais para construção, marfim vegetal para fabrico de

botões, frutos para confecção de doces, palmito para alimentação, fibras para outras finalidades (AQUINO, 2003).

A piaçava é cultivada em ambientes quentes, em temperatura média variando cerca de 24 °C, com umidade relativa do ar no valor superior a 80%. A Classe da piaçava é dividida em duas espécies chamadas de *Attalea Funifera Mart*, nativa, cultivada e extraída na Bahia, e a *Leopoldina Piassaba Wallace*, piaçava do Pará, que vem do alto rio Negro do Amazonas, e do norte do Pará. As espécies de piaçava pertecem a família das palmáceas (MOREAU, 1997).

Figura 9 - Palmeira de Piaçava.



Fonte: (NASCIMENTO, 2009)

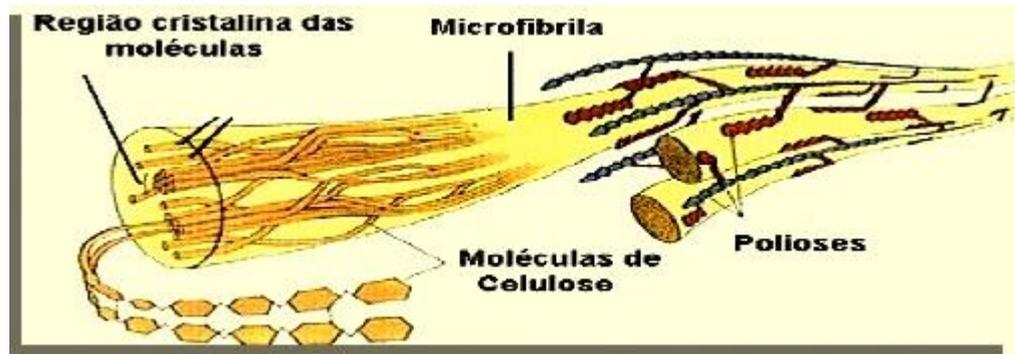
De acordo com o IBGE a procura da piaçava na região do nordeste, precisamente na Bahia, ainda é explorada e traz contribuição ao desenvolvimento e extrativo da espécie mencionada (AQUINO, 2003).

A piaçava *Leopoldina Piassaba Wallace* tem uma textura mais macia. Possui folhas achatadas e a fibra é flexível e elástica. Contudo, a *Attalea funifera Mart* é uma fibra impermeável e conserva sua elasticidade quando molhada (VINHA, 1997).

As propriedades estruturais da fibra de piaçava estão diretamente ligadas a celulose e a sua cristalinidade, onde as fibras vegetais servem como compósitos de

fibrilas de celulose mantidas unidas ou aderentes por uma matriz formada de lignina e hemicelulose, conforme Figura 10 (NASCIMENTO, 2009).

Figura 10 - Características estruturais fibra de piaçava.



Fonte: (MIRANDA, 2009)

De acordo com o IBGE, censo 2016, a piaçava teve uma produção de 45.645 toneladas no Brasil e o Nordeste contribuiu com 42988 toneladas de produção, ou seja, 94% de contribuição dessa produção de extração vegetal.

A produção, em reais, de piaçava rendeu ao Brasil o valor de R\$ 103.711,00, onde o Nordeste possui uma participação de R\$ 99.087,00 (sendo 95%) do total de produção da piaçava conforme a Tabela 5. Isso comprova que a fibra de piaçava possui importância para o Brasil, destacando o Nordeste como principal cooperador.

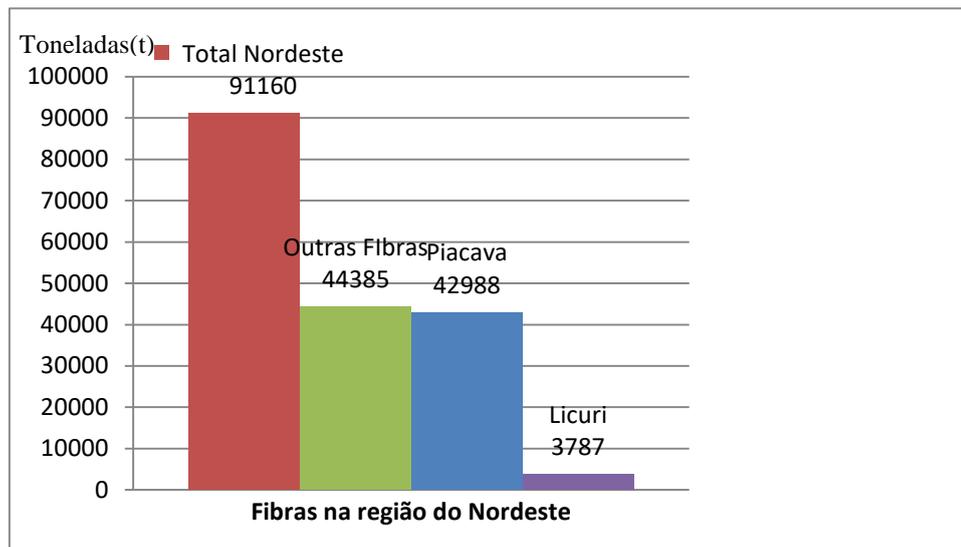
Tabela 5 - Valor da produção na extração vegetal (mil reais).

Variável - Valor da produção na extração vegetal (mil reais)				
Brasil e Grande Região	Ano x Tipo de produto extrativo			
	2016			
	Total	Fibras	Piaçava	Licuri
Brasil	R\$ 4.426.293,00	R\$ 109.329,00	R\$ 103.711,00	R\$ 3.741,00
Norte	R\$ 1.996.645,00	R\$ 5.783,00	R\$ 4.624,00	-
Nordeste	R\$ 1.146.861,00	R\$ 103.546,00	R\$ 99.087,00	R\$ 3.741,00
Sudeste	R\$ 57.879,00	-	-	-
Sul	R\$ 542.825,00	-	-	-
Centro-Oeste	R\$ 682.083,00	-	-	-

Fonte: Adaptado IBGE (2016)

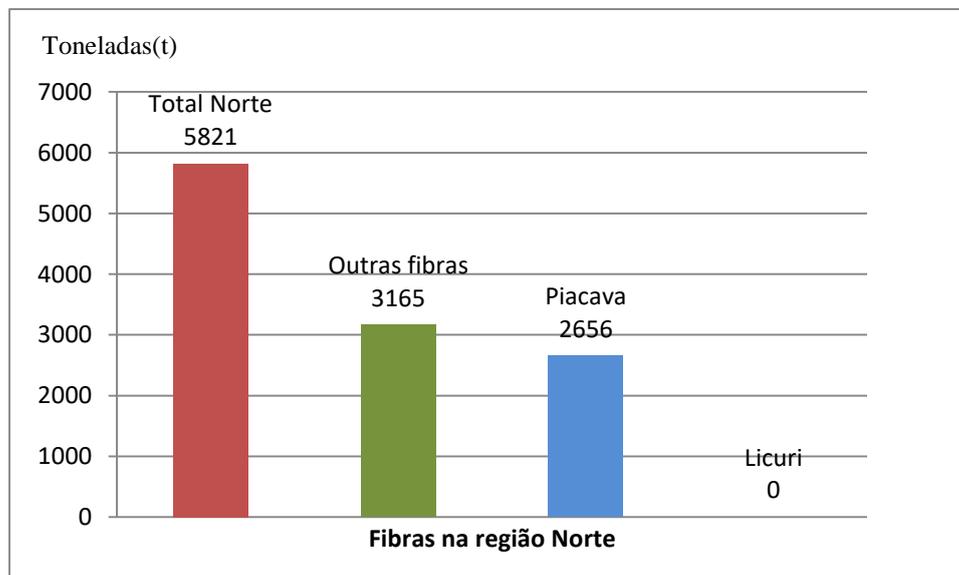
A Figura 11 nos mostra a quantidade produzida de extração vegetal do Nordeste (toneladas). Veja a produção de piaçava que ficou em torno de 43 mil toneladas. A Figura 12 já mostra a quantidade produzida pela extração vegetal na região Norte onde a piaçava teve 2656 toneladas.

Figura 11 - Quantidade produzida da extração vegetal do Nordeste (toneladas)



Fonte: Adaptado IBGE (2016)

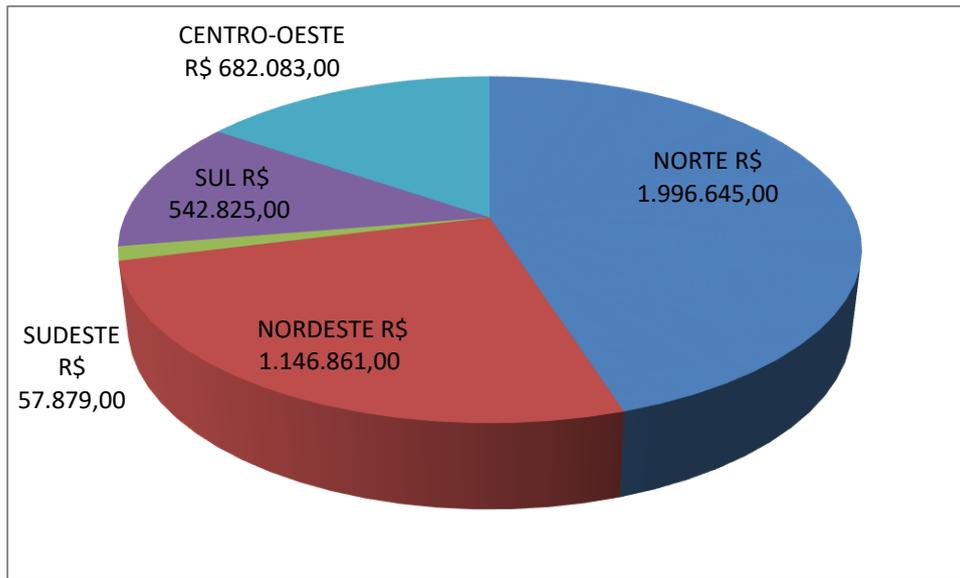
Figura 12 - Quantidade produzida da Extração Vegetal do Norte (toneladas).



Fonte: Adaptado IBGE (2016).

A Figura 13 exibe o valor (R\$) de produção por região da extração vegetal no Brasil.

Figura 13 - Valor(R\$) de produção da Extração Vegetal do Brasil em 2016.



Fonte: Adaptado IBGE (2016).

As Figuras 14, 15 e 16 mostram o preparo das fibras de piaçava para comercialização, ou seja, a pré-lavagem, separação para corte e empacotamento das fibras respectivamente.

Figura 14 - Piaçava no tanque lavada.



Fonte: O autor (2019)

Figura 15 - Fibra bruta cortada.



Fonte: O autor (2019)

Figura 16 - Piaçava sendo cortada e empacotada para venda.



Fonte: O autor (2019)

A Tabela 6 mostra o estudo comparativo entre as propriedades químicas das fibras naturais mais utilizadas.

Tabela 6 - Propriedades de algumas Fibras Naturais.

Fibra	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Fibras totais
Buriti	51,29	18,80	16,37	86,46
Bambu	35	15	27	38
Cana	45	20	23	80
Canhamo	67	16	8	83
Coco	45	43	0,3	90
Curauá	71	8	3,1	82,1
Juta	60	15	16	91
Linho	60	16	4	91
Madeira	45	22	25	88,3
Piaçava	29	11	45	88,3
Rami	69	13	1	82
Sisal	60	12	10	92

Fonte: Adaptado (BARBOSA, 2011)

2.4.2 Fibras Sintéticas

As fibras sintéticas surgiram para substituir ou melhorar determinadas propriedades que as fibras naturais não pudessem atender, sendo mais baratas e com altas propriedades de resistência. Para essa classe de fibras existem as fibras de vidro, carbono e poliamida (Kevlar).

2.4.2.1 Fibra de Vidro

A fibra de vidro é um exemplo de carga reforçante e a sua inserção proporciona melhores propriedades mecânicas aos compósitos poliméricos. Pode se destacar o aumento do módulo Young (elasticidade) nos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos. Além disso, a fibra de vidro (PIRFV⁴) é utilizada na produção de barcos,

⁴ PIRFV = Poliester Insaturado Reforçado com Fibra de Vidro. (CANEVAROLO JR, 2006)

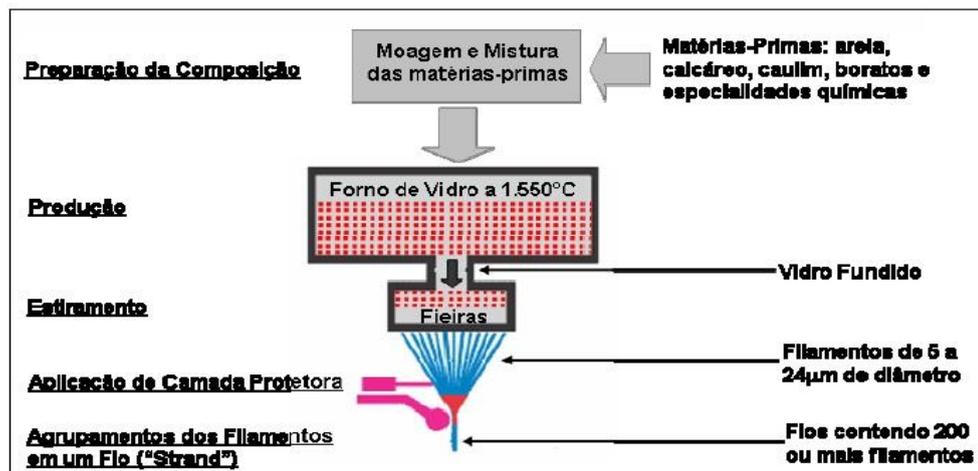
pranchas de surf, estruturas externas de carro e caminhões (CANEVAROLO JR, 2006).

As fibras de vidro são materiais de reforço utilizados em compósitos termoplásticos e termofixos. Isso acontece pela combinação da propriedade elevada de tração com baixo custo com relação a outras fibras de reforço conhecida na literatura e indústria, dando uma boa relação custo-benefício (BAPTISTA, 2004).

Os principais itens para a composição da fibra de vidro são a areia, o calcário, o caulim, os boratos e outras especialidades químicas. No geral esses itens são moídos e misturados em uma grande quantidade, chamado de batch que depois é alimentado ao forno de fusão (tanque). A mistura tem que ser fundida a uma temperatura em torno de 1550°C, no forno de tijolos refratários (FELTRAN, 2008).

Após a fundição a massa resultante deve fluir para bandejas de platina que resista a alta temperatura, denominadas de feiras ou bunchings. Essas feiras possuem milhares de aberturas furadas por seção circular com precisão onde o vidro passa formando os filamentos. Após isso se resfria com técnicas próprias e outros processos de 200 ou mais filamentos são agrupados em fios (strands) para finalizar a fibra. A Figura 17 mostra o processo de produção da fibra de vidro (FELTRAN, 2008). Pode-se conferir o comportamento mecânico dos compósitos de epóxi com vários tipos de fibras sintéticas, inclusive a fibra de vidro, através da Tabela 7.

Figura 17 - Produção de fibra de vidro adaptado de Murphy 1994.



Fonte: (FELTRAN, 2008)

Tabela 7 - Comportamento mecânico de compósitos de epoxi de alto desempenho com vários tipos de fibras sintéticas.

Material utilizado	E (GPa)	Res. Tração (MPa)	Densidade (g/cm³)
Resina Epoxi	3,5	0,09	1,20
Fibra de Vidro Tipo E	72,4	2,4	2,54
Compósito Epoxi (Resina Epoxi + Fibra de Vidro E)	45	1,1	2,10
Fibra de Vidro Tipo S	85,5	4,5	2,49
Compósito Epoxi (Resina Epoxi + Fibra de Vidro S)	55	2,0	2,00
Fibra de Aramida	124	3,6	1,44
Compósito de Epoxi (Resina Epoxi + Fibra de Aramida)	80	2,0	1,38

E = Modulo de Elasticidade. Fonte: Adaptado (CANEVAROLO JR, 2006)

2.4.2.2 Fibra Poliamida (Kevlar)

O polímero de Aramida conhecido por Kevlar apresenta propriedades adequadas para as aplicações de engenharia, tais como a resistência a corrosão e ao calor (aplicada em motores de foguetes e vasos de pressão), possui ainda baixa densidade, facilidade de manutenção de suas propriedades a baixas temperaturas, elevado módulo de elasticidade, boa resistência ao impacto e grande resistência mecânica (BERNARDI, 2003).

O Kevlar possui sete vezes a resistência do aço por unidade de peso (RECORD, 2015).

De acordo com a resistência ser maior do que o do aço, a não utilização do Kevlar no lugar do aço, se justifica porque o kevlar não possui uma boa resistência a

compressão como o aço nas aplicações de pontes, construção de edifícios e outras opções na construção civil (TROMBETA, 2012).

De acordo com Yang (1993), a descoberta da fibra aramida tipo Kevlar aconteceu em 1965 pela cientista Stephanie Kwolek, pesquisadora da Du Pont, que sintetizou uma série de poliamidas aromáticas.

As aplicações do Kevlar são abrangentes no que permeia a engenharia. De acordo com a duPont de Nemours (1802) nos carros de passeio e outros produtos no mesmo segmento de veículos leves, a fibra de kevlar, coopera na melhoria de segurança e desempenho. Isso se comprova pelos sistemas de transmissão, pneus, componentes de carroceria e mangueiras (DUPONT, 1802).

A Figura 18 mostra uma fibra de Aramida chamada comercialmente de Kevlar.

Figura 18 - Fibra de Aramida (kevlar).



Fonte: (MANUTENÇÃO_E_SUPRIMENTOS, 2017)

2.4.2.3 Fibra de Carbono

O processo de fabricação da fibra de Carbono é dado pelas seguintes etapas (TECMUNDO, 2015; IGTPAN, 2016):

- a) pirolise controlada da poliacrilonitrila (PAN, conhecida por orlon, acrilon e darlon) – decomposição ou ruptura da estrutura molecular original que acontece pela ação das altas temperaturas;
- b) estiramento de 90 a 190 °C – alongamento através de tensões mecânicas;
- c) estabilização Oxidativa sob estiramento para fazer com que os átomos de hidrogênio sejam retirados em uma temperatura de 200 a 300 °C;

- d) no processo anterior é adicionado o oxigênio. Oxidação da PAN (Poliacrilonitrila);
- e) processo de Carbonização é induzido com temperatura mínima de 500°C até 1500 °C onde se libera N₂;
- f) grafitação - Tratamento térmico que varia de 1700 a 2800 °C para cristalizar os cristais do carbono na fibra;
- g) produtos finais têm dois: Tipos I e II da fibra de carbono.

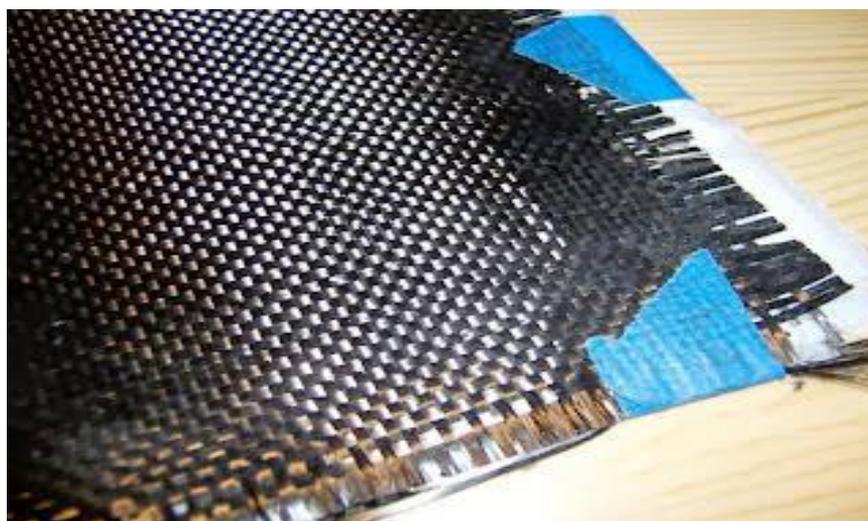
O processo descrito anteriormente pode ser resumido em polimerização por pirolise, ciclização, oxidação e adicção de reagente (TECMUNDO, 2015).

A fibra de Carbono (Figura 19) tem uma aplicação muito grande nas indústrias automobilísticas, inclusive na confecção dos carros da Fórmula 1, a exemplo da MCLAREN, considerada pioneira na aplicação dessa fibra nos seus modelos de automóveis de corrida, conforme a Figura 20 (AUTOENTUSIASTASCLASSIC, 2013)

Existem referência da fibra de carbono em bicicletas “Carbon”, pois é visível o desempenho nas pistas de corridas utilizadas por profissionais (TECMUNDO, 2015).

Outros caminhos rentáveis são utilizados, tais como produção de turbinas, áreas bélicas e construção aeronáutica, materiais esportivos, construção civil e outras (TECMUNDO, 2015).

Figura 19 - Tecido de fibra de Carbono.



Fonte: (AUTOENTUSIASTASCLASSIC, 2013)

Figura 20 - Aplicação da fibra de carbono na McLaren.



Fonte: (AUTOENTUSIASTASCLASSIC, 2013)

As propriedades mecânicas da fibra de carbono estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas da fibra de Carbono.

Propriedades	Valor
Modulo de Elasticidade longitudinal (GPa)	170
Modulo de Elasticidade transversal (GPa)	12,4
Modulo de Cisalhamento no plano (GPa)	7,1
Coefficiente de Poisson no plano	0,27
Resistencia longitudinal a compressão (MPa)	661
Resistencia transversal a tração (MPa)	16
Resistencia transversal a compressão (MPa)	126
Resistencia longitudinal a compressão (MPa)	40

Fonte: (GONÇALVES, *et al.*, 2001)

2.5 CONFECÇÃO DE REFORÇOS (TECELAGEM)

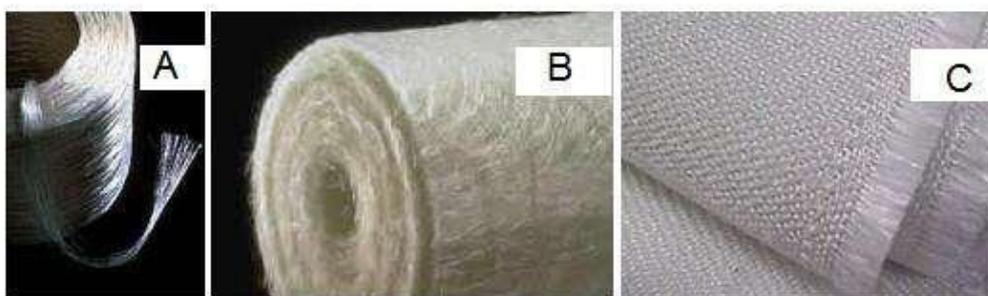
O termo Tecelagem não se alterou desde sua origem. As técnicas de tecelagem e o ato de colorir já possuía um estágio avançado nas Américas.

As formas de tecer já se faziam com talos de folhas, folhas de palmeiras etc. As técnicas iniciais se utilizavam do entrelaçamento simples e repetitivo de fios. (BAPTISTA, 2004)

As formas que se pode apresentar os reforços são: (MOURA, MORAIS e MAGALHÃES, 2005)

- a) roving – é definido como um cordão de filamentos contínuos enrolados helicoidamente em bobinas, ver Figura 21a. Seus diâmetros atendem a 9 ou 13 micrometros. Destina-se á produção de fibras curtas (na aplicação a moldagem por projeção), tecidos, ou pode ser processado para a produção de mantas entrançadas, malhas ou híbrido;
- b) mantas – As mantas são fibras distribuídas aleatoriamente e agregadas por um ligante especial em emulsão ou em um pó que confere estabilidade e deve ser solúvel na impregnação, ver Figura 21b;
- c) tecidos 2d – Define-se como a confecção de uma ligação entre feixes de fibras longas de carbono, aramida, vidro ou a combinação destas para aplicações em que se exigem elevadas propriedades mecânicas. Deve manter uma grande capacidade de conformação a forma de molde (*drapability*). Podem ser do tipo tecidos entrelaçados (*woven fabrics*), tecidos quase unidirecionais e híbridos. Ver Figura 21c;

Figura 21 - Formas de Reforço. Figura A = Roving; Figura B = Manta; Figura C = Tecido.



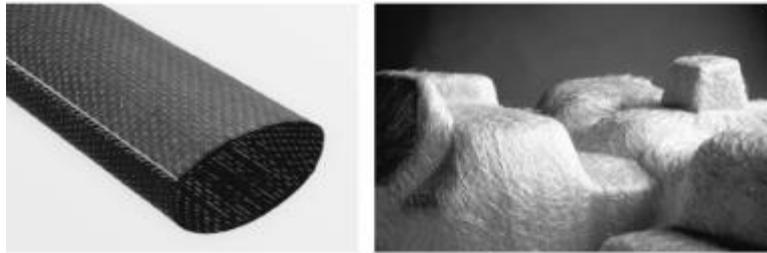
Fonte: (MOURA, MORAIS e MAGALHÃES, 2005)

- d) malhas (*Knitted fabrics*) – São produzidos pela ligação sucessiva de fibras alinhadas. Apresenta excelente conformabilidade e boa resistência

interlaminar;

- e) tecidos 3d – são confeccionados por processos especiais de tecelagem na qual possui multiplas camadas de ligações de fibra com orientações diversas. A resistência interlaminar é considerada boa;
- f) pré-formas – sao produzidas a partir das diversas formas 2D ou 3D, tendo fibras curtas ou contínuas. Essas são usadas em produção de objetos complexos. Possuem uma boa estabilidade e consequente relação resistência – peso. Veja a Figura 22 a e b;

Figura 22 - Exemplo pré-formas.



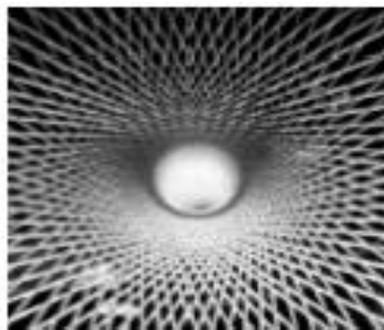
a) 2D em fibra de carbono

b) 3D em fibra de Vidro

Fonte: (MOURA, MORAIS e MAGALHÃES, 2005)

- g) Entrançados (*Braids*) – são mais caros do que as mantas em virtude do processo de confecção. Tem resistência específica elevada. Aplicados em configuração tubular e plana, apresentam conformabilidade podendo ser empregados como reforço de raquetes de tênis ou pás de hélices de avião. Ver Figura 23.

Figura 23 - Entrançado em forma tubular.



Fonte: (MOURA, MORAIS e MAGALHÃES, 2005)

2.5.1 Padrão dos tecidos entrelaçados (*woven fabrics*)

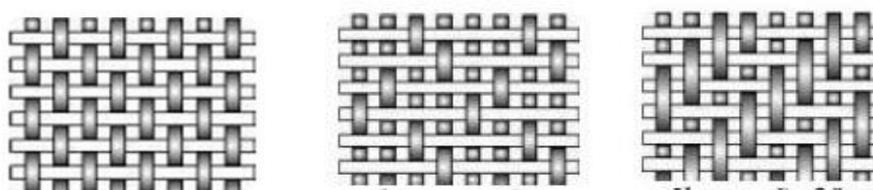
O padrão dos tipos de entrelaçamentos dos fios que harmonizam ou formam um tecido possui algumas características. Estes dá a necessidade de classificação técnica, que tem como base no entrelaçamento dos fios, e a comercial que se referencia na aparência do tecido. Esses tecidos possuem como origem os planos que são obtidos pelo entrelaçamento de duas camadas, que na disposição longitudinal é chamado de urdume, e na transversal é chamada de trama. (BAPTISTA, 2004)

De acordo com a Dupont apud Pereira:

Os fios no sentido do comprimento são conhecidos como fios de urdume, enquanto os fios na direção da largura são conhecidos por fios de trama. As bordas do tecido no comprimento são as orelhas, que são facilmente distinguíveis do resto do material. (DUPONT, 1991, p.5 apud PEREIRA, 2010).

Os tecidos Fundamentais são chamados de Tafetá, Sarja e Cetim representados nas Figura 24 a, b e c, respectivamente (MOURA, MORAIS e MAGALHÃES, 2005):

Figura 24 - Tecidos Tafetá (a), Sarja (b) e Cetim (c)



FONTE: (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2005)

a) Tafetá

b) Sarja

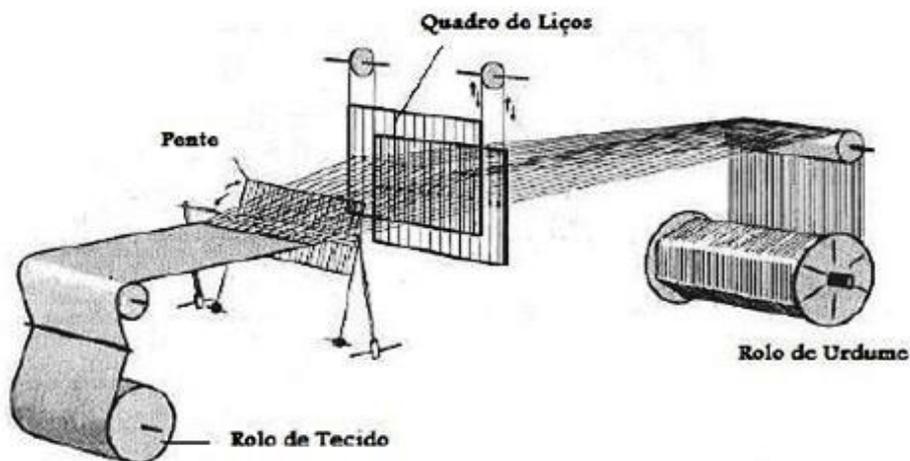
c) Cetim

Os tecidos são processados em equipamentos denominados de teares (Figura 25), onde estes possuem os seguintes componentes:

- a) rolo de Urdume: Esse contém os fios de urdimento que são os rolos de fios paralelos;
- b) quadros de Liços: São quadros responsáveis pela formação da cala

- (abertura formada por duas camadas de fios de urdume);
- c) pente: Os fios passam por um pente que determinará a largura e a densidade do urdume;
- d) rolo de Tecido: Armazenador do produto final (tecido).

Figura 25 - Componentes do Tear.



Fonte: (PEREIRA, 2010)

2.6 MECANISMOS DE DANOS

Os compósitos podem manifestar muitos danos antes do rompimento. Nesse sentido são observadas três escalas para a descrição dos danos (SALEMO, 2013):

- macroescala – Considera o comportamento global do compósito laminado avaliado;
- mesoescala – define a lâmina e interface associada;
- microescala – Considera a estrutura heterogênea.

Na microestrutura (interação fibra/matriz) existe a fratura das fibras e por consequência pode haver fratura na matriz, além do deslocamento entre a matriz e fibra, e possivelmente a flambagem das fibras.

Microscopicamente, o mecanismo de danos pode ocasionar uma ruptura da matriz ou da fibra, delaminação e uma ruptura transversal da lâmina ou laminado, na

qual pode acontecer de forma independente ou devido a interface da fibra/matriz. (SHIINO, MARCOS Y.; CIOFFI, MARIA O H; VOORWALD, HERMAN C J; REZENDE, MIRABEL C, 2009)

De acordo com Leão (2013) *apud* Rodrigues (2007) para melhor fundamentar o mecanismo de danos, os principais tipos encontrados em compósitos são:

- a) fissuração na matriz – acontecimento de uma ou mais fissura na matriz do material compósito. Esse tipo de fissura é denominado de fratura coesiva na matriz, que demonstra um rompimento;
- b) ruptura da fibra – acontecimento da ruptura transversal e longitudinal da fibra. Esse tipo de fissura é denominado de fratura coesiva na fibra;
- c) desaderência fibra/matriz – efeito de deslocamento ou desprendimento na interface entre fibra e matriz. Esse tipo de desaderência é denominada de fratura adesiva.

Segundo Felipe (2012), o mecanismo de dano pode acontecer por diversos fatores tais como:

- a) propriedades físicas e químicas dos reforços e da matriz;
- b) configuração do compósito;
- c) processo de fabricação do compósito;
- d) tipo de carregamento submetido;
- e) características microestruturais do compósito observando os percentuais de resina, fibra e vazios;
- f) condições ambientais como temperatura de trabalho, umidade do meio e tipo de radiação.

O processo de delaminação consiste na separação das camadas devido a liga adesiva se degradar por algum fator. Um desses fatores tem a ver com a umidade, devido as oscilações de pressão e de temperatura, causando fissuras e desgaste em certos materiais com mais rapidez (MANUTENÇÃO_E_SUPRIMENTOS, 2017).

O processo de fratura ou danos pode ocorrer em qualquer compósito fibroso, contudo a delaminação tende a ocorrer apenas em compósitos laminados. Estas fraturas devem ocorrer em vários tipos de cargas submetidas, com restrição a

microflambagem, na qual deve ocorrer com cargas resultantes de compressão (YANG, B; KOZEY, V; ADANUR, S; KUMAR, S, 2000).

No mecanismo de fadiga em compósitos fibrosos devem-se considerar quatro estágios (SHIINO, MARCOS Y; CIOFFI, MARIA O H; VOORWALD, HERMAN C J; REZENDE, MIRABEL C, 2009):

- a) nucleação do dano local a carga ciclica (Acontece em locais de alta intensidade de tensão);
- b) nucleação de microtrincas;
- c) propagação estável da trinca em virtude da carga cíclica;
- d) propagação local da trinca – depende da orientação da fibra, ductilidade da matriz e do grau de adesão da interface.

As tensões de compressão não geram propagação das trincas, já as tensões de tração são as responsáveis por este fenômeno (MEYERS e CHAWLA, 2009)

O conjunto de estruturas de formação e difusão do dano que acontece durante a carga dos materiais compósitos não é entendido e existem teorias diversas sobre vários tipos de materiais compósitos com a presença de fibras vegetais e seus efeitos, como exemplo a absorção de umidade como fatores de influência para mecanismos de danos. (LEÃO, 2013 *apud* SILVA, 2004).

Segundo Rodrigues (2007) os tipos de danos em compósitos são:

- a) fissuração na Matriz;
- b) ruptura da Fibra;
- c) desaderencia fibra/matriz;
- d) delaminação.

2.6.1 Análise Macroscópica do Mecanismo de dano

Na análise macroscópica dos mecanismos de danos os mesmos são visíveis a olho nu. Dentro dessa análise pode-se destacar pelo menos duas formas de dano: quando o mesmo se dá por tempo de uso, principalmente em ambientes agressivos (desgaste no material), ou quando o mesmo é originado pela ação de carregamentos externos, ou seja, a fratura mecânica do elemento estrutural. FELIPE (2012, p.47)

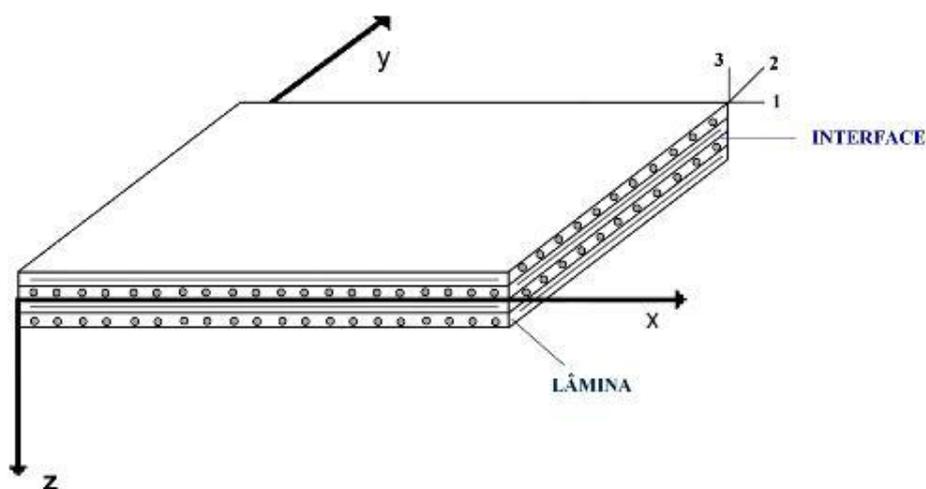
A análise macroscópica do mecanismo de dano acontece a partir de características da fratura nos corpos de prova em ensaios mecânicos, podendo revelar a ocorrência de microfissuração na matriz, ruptura de fibras e até mesmo a delaminação (caracterizada por desaderência entre as interfaces de um laminado) (TINÔ, 2010).

2.6.2 Análise Microscópica do Mecanismo de dano

A mecânica da fratura possui uma energia crítica que precisa ser determinada experimentalmente chamada de energia crítica de fratura (G_c). Nesse caso os ensaios são feitos de acordo com as normas ISO15024 e ASTM D5528 para os casos de interfaces 0/0 e 0/90. Ainda para os ENF⁵ (End Notched Flexure) a norma é a ASTM D790 para interface 0/0 (SALEMO, 2013).

Na Figura 26 pode ser vista o sistema global de referência de um material compósito, como também as referências de uma de suas lâminas.

Figura 26 - Sistema Global de referência do material compósito (x-y-z) e sistema de referência de uma lâmina (1-2-3), Mesoescala: lâmina e interface.

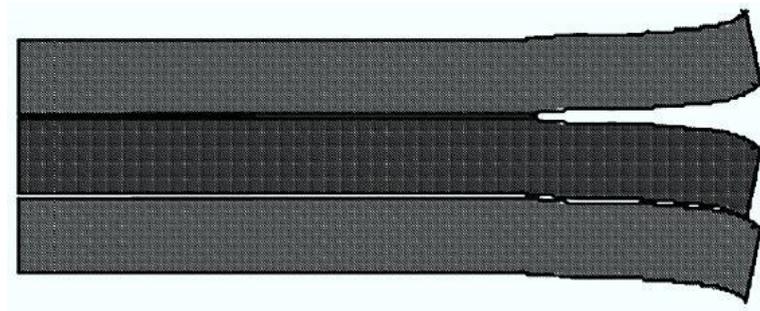


Fonte: (SALEMO, 2013)

Um exemplo de delaminação é mostrado na Figura 27.

⁵ De acordo com Salerno (2013) a nomenclatura ENF (End Notched Flexure) é um dos tipos de ensaios de delaminação que identifica a energia crítica de fratura para as interfaces 0/0 e 0/90 em modos II. O modo I é chamado DCB (*Double Cantilever Beam*)

Figura 27 - Delaminação entre as camadas.

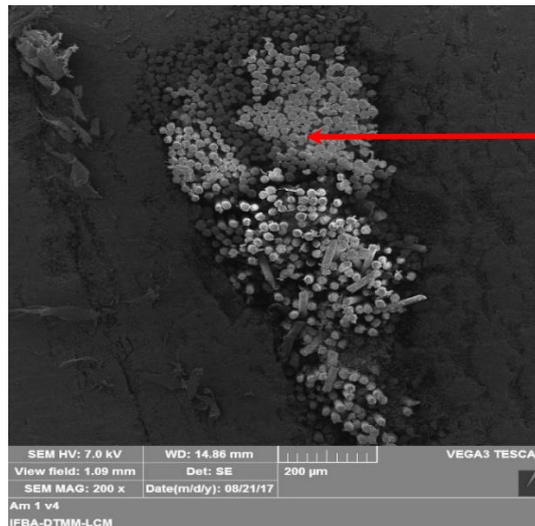


Fonte: (SALEMO, 2013)

Um outro exemplo de mecanismo de danos é mostrado na

Figura 28 e Figura 29 que caracteriza a fratura coesiva da fibra sintética de vidro e fibra natural de sisal, respectivamente.

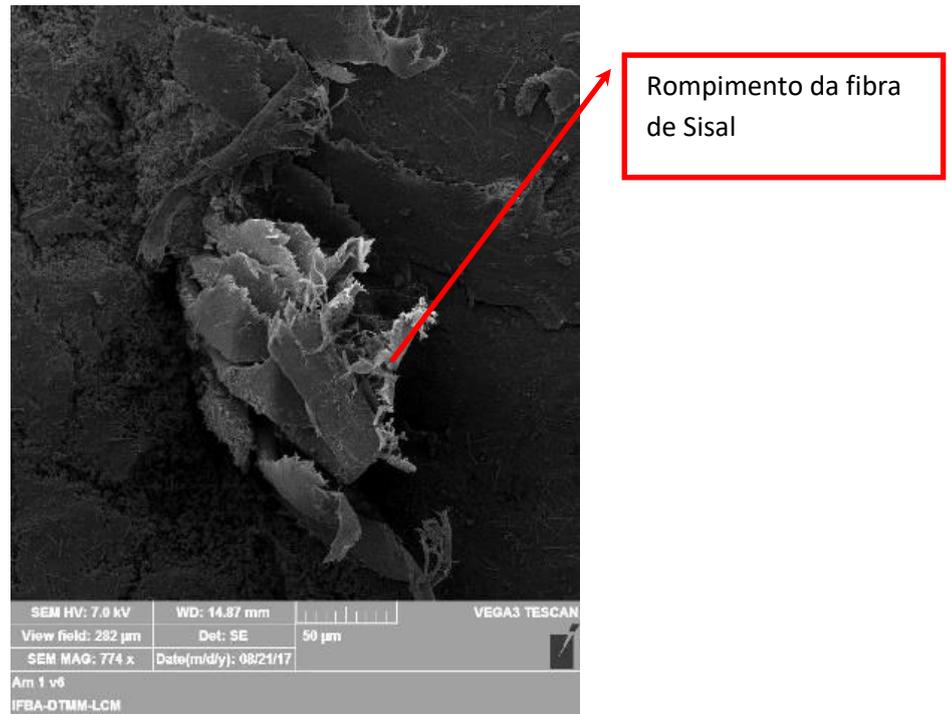
Figura 28 - Rompimento da fibra de vidro em compósito polimérico.



Rompimento da
fibra de vidro.

Fonte: O autor (2019)

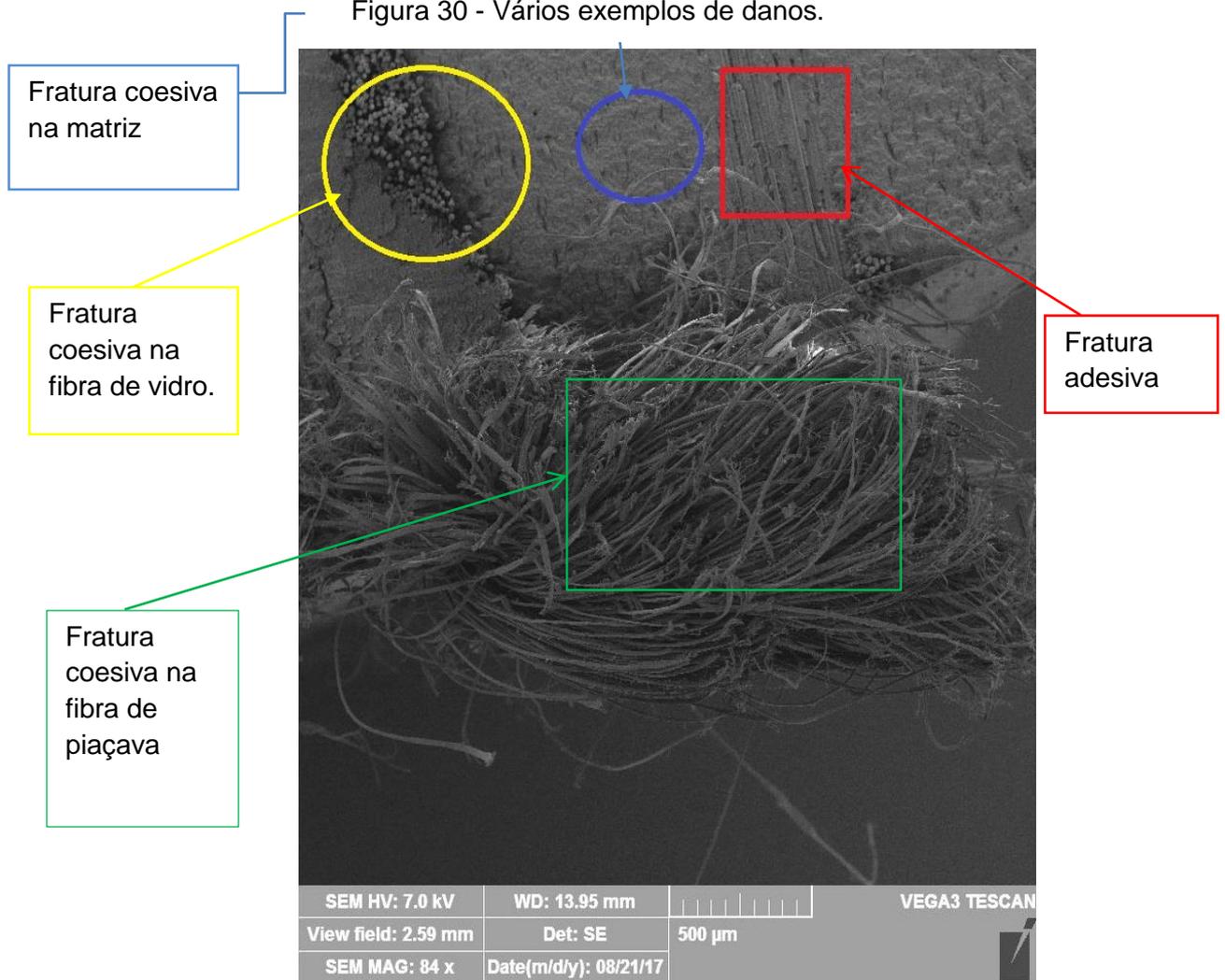
Figura 29 - Rompimento característico de fibra natural no compósito de sisal.



Fonte: O autor (2019)

A Figura 30 mostra alguns danos que ocorrem nos compósitos poliméricos que exemplificam a teoria do referencial teórico sobre os mecanismos de danos na micrografia.

Figura 30 - Vários exemplos de danos.



Fonte: O autor (2019)

2.7 TRATAMENTO QUÍMICO

O tratamento químico alcalino das fibras naturais consiste na retirada de impurezas, nesse caso pode se citar a hemicelulose e a lignina que esta presente na fibra, de maneira a aumentar o teor de celulose (MARQUES, 2012 *apud* XIAO; SUN *et al.*, 2001).

O procedimento padrão do tratamento alcalino que de forma geral se utiliza de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH a 5% em massa), à temperatura ambiente por 6 horas. Após esse tempo o material deve ser lavado para se alcançar ph neutro e secar o material em estufa a uma temperatura de 60 °C (PIRES, EDUARDO N.;

MELINI, CLAUDIA; AL-QURESHI, HAZIM ALI; SALMORIA, GEAN V.; BARRA, GUILHERME M. O., 2012).

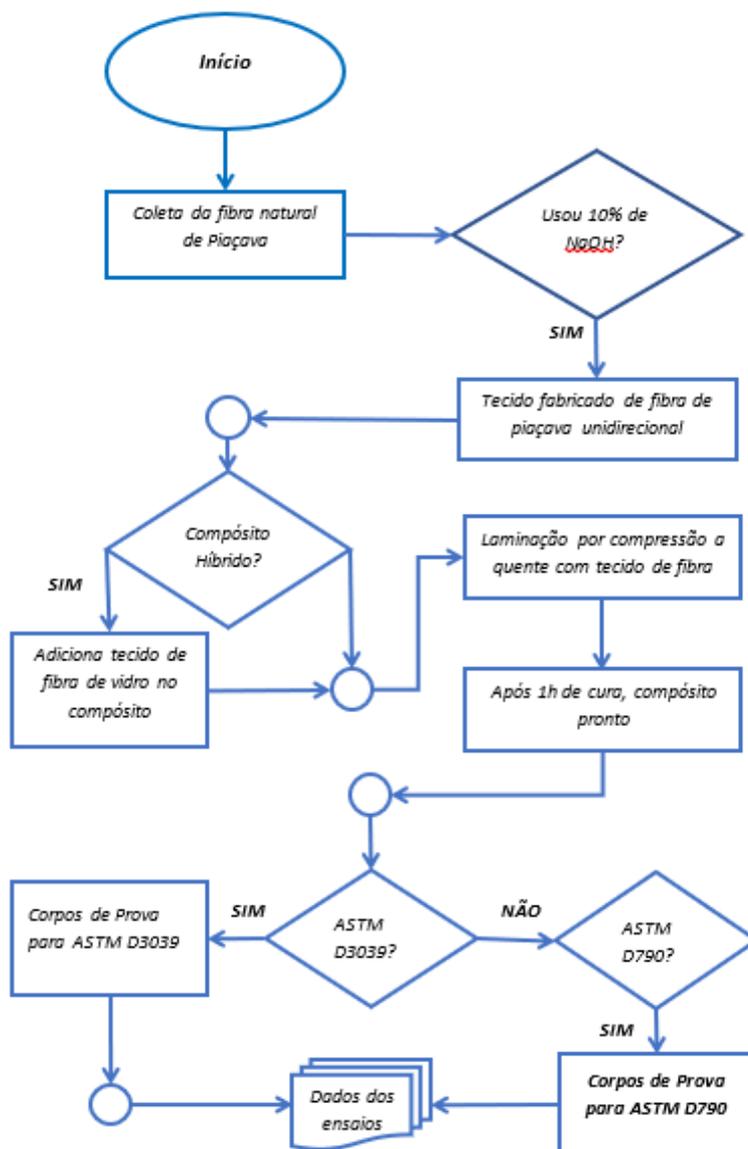
Existe literatura que os autores relatam sobre a aplicação de carga durante o processo de mercerização reduz o ângulo microfibrilar em fibras do tipo rami, alcançando em um alinhamento satisfatório ao longo do eixo da fibra, portanto, modificando as propriedades mecânicas condicionando maior resistência e rigidez (MARQUES, 2012 *apud* KIM; NETRAVALI, 2010; GODA; SREEKALA *et al.*, 2006).

O método de tratamento alcalino foi utilizado de diversas formas para o bagaço de fibra de piaçava, como tratamento superficial, lavando com água destilada e secando em estufa a 100 °C por 48 h. Outra forma foi a utilização de uma solução de 10% de NaOH se mergulhando as fibras por 1 h na temperatura ambiente. Em seguida as fibras foram lavadas com água normal e com água destilada e secas na estufa a temperatura de 100 °C por 48 h (MIRANDA, CLEIDIENE S.; FIUZA, RAIGENIS P.; CARVALHO, RICARDO F; JOSÉ, NADIA M., 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão apresentados os materiais utilizados e a metodologia necessária para o desenvolvimento da tese. Inclui-se aqui os ensaios mecânicos para a caracterização das propriedades mecânicas e microestruturais. Como síntese desse capítulo a Figura 31 - Fluxograma da produção do compósito, mostra, em forma de fluxograma, as etapas que foram desenvolvidas.

Figura 31 - Fluxograma da produção do compósito



Fonte: O autor (2019)

3.1 GERAÇÃO DAS PRIMEIRAS AMOSTRAS

A metodologia foi realizada seguindo a organização dos objetivos específicos para obter-se um roteiro mais prático do projeto proposto. Assim sendo, o roteiro se baseou nos seguintes aspectos:

- a) foi confeccionado um compósito polimérico reforçado por tecidos de fibras naturais;
- b) escolha da Fibra Vegetal - A fibra escolhida como reforço foi a fibra de piaçava abundante no estado da Bahia adquirida na cidade de Ilhéus;
- c) a resina utilizada como matriz foi a polimérica ortoftálica, a base de poliéster, denominada de C400 da centerglass, cujas especificações constam na Tabela 09.

Tabela 9 - Propriedades da Resina Curada L120

Descrição	Unidade	Especificações
Viscosidade Brook (SPD 2/60 rpm)	cP	250-350
Densidade Volumetrica a 25°C	g/cm ³	1,12
Gel Time (1% MEKP) a 25 °C	Min	9-13
Pico Exotermico	°C	150-190
Resistência a Tração sem reforço pela ASTM d638	MPa	53
Módulo de Elasticidade pela ASTM D638	GPa	2,9
Resistencia a Flexão pela ASTM D790	MPa	94
Modulo a Flexão pela ASTM D790	GPa	3,2

Fonte: (NOVAPOL, 2017)

- d) Tecidos de reforço – a confecção do tecido de piaçava foi realizada em um tear manual utilizando a técnica de urdume e trama na sua produção (Figura 32).

Figura 32 - Fibra de Piaçava sendo utilizada para se confeccionar um tecido.



Fonte: O autor (2019)

Antes da confecção do tecido as fibras foram submetidas ao processo de tratamento alcalino para a retirada da cera e resíduos encontrados na própria fibra, que dificultam a aderência à matriz a ser utilizada no processo de moldagem do compósito. Antes do processo de merceirização foi realizada uma lavagem prévia em água corrente para retirada de resíduos. A merceirização acontece através da imersão em uma solução de NaOH a 10% por uma hora (Figura 33). Após o tratamento alcalino as fibras foram lavadas em água destilada para a remoção total do produto (NaOH), sendo posteriormente secas em estufa por 24 horas, na temperatura de 60° C para confecção do tecido.

Figura 33 - Fibra passando pelo processo de tratamento alcalino.



Fonte: O autor (2019)

O tecido de piaçava foi unidirecional conforme mostra Figura 34. O reforço do tecido de fibra de vidro foi bidirecional industrializado (Figura 35).

Figura 34 - Tecido natural de piaçava.



Fonte: O autor (2019)

Figura 35 - Tecido de fibra de vidro tipo E.



Fonte: O autor (2019)

Moldagem do Compósito - Para a determinação da quantidade de resina foi utilizado um fator de 3,5 x peso do tecido para se encontrar a quantidade de resina para a moldagem. Após a determinação da quantidade de resina calculada, foi

acrescentado 1% do catalisador (MEKP) para a cura. Nas Figura 36 e Figura 37 são mostradas a distribuição e uniformização da resina no tecido, respectivamente.

Figura 36 - Distribuindo a resina no tecido.



Fonte: O autor (2019)

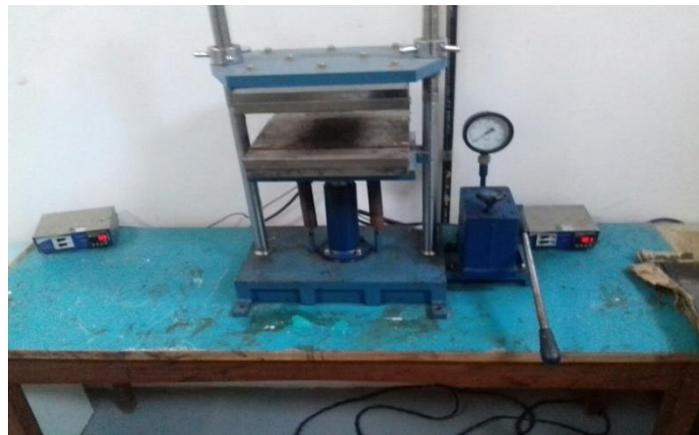
Figura 37 - Espalhando uniformemente a resina no tecido.



Fonte: O autor (2019)

A compressão a quente utilizada foi de 6 toneladas com a temperatura de 90 °C, conforme a Figura 38. O processo de cura aplicado foi de 1(uma) hora aproximadamente.

Figura 38 - Dispositivo de alguns ângulos.



Fonte: O autor (2019)

Foram confeccionadas duas placas de matriz polimérica sendo uma reforçada com tecido unidirecional de piaçava e outra híbrida, reforçada com tecido unidirecional de piaçava e tecido bidirecional de fibra de vidro-E. As placas tinham as dimensões de 200 mm X 320 mm e foram confeccionadas conforme Figura 39 e Figura 40.

A especificação do equipamento utilizados na moldagem ppor compressão a quente consiste de uma prensa hidráulica manual de modelo TE-098 com capacidade de 15 ton, acoplado por um sistema de placas por aquecimento, tanto para a parte superior quanto na inferior, monitorados por um dispositivo eletrônico que regula a temperatura de modelo TE-007MP(220V). A dimensão dos moldes de aço tem (400 x 400) mm², com um desbaste na região central de (200 x 320) mm² para a inserção do reforço de piaçava e a resina de poliéster.

Figura 39 - Esquema do compósito de piaçava.



Fonte: O autor (2019)

Figura 40 - Esquema do compósito híbrido.



Fonte: O autor (2019)

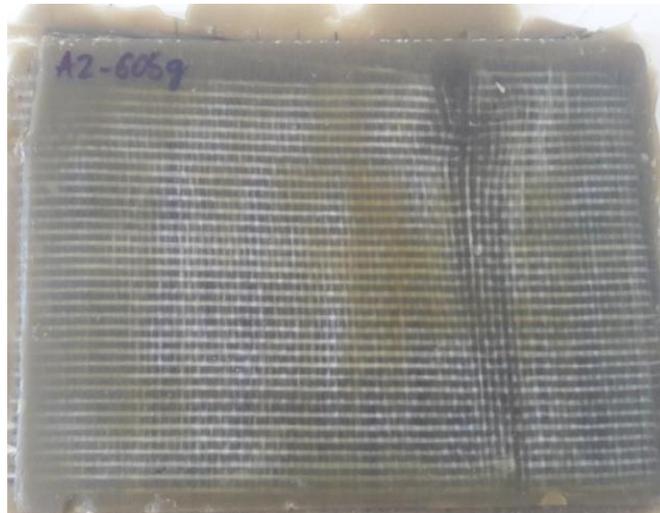
As Figura 41 e Figura 42 apresentam as placas confeccionadas.

Figura 41 - Placa de Piaçava (MPMPM).



Fonte: O autor (2019)

Figura 42 - Placa de Poliéster com Piaçava e Fibra de vidro-E.



Fonte: O autor (2019)

3.1.1 Ensaios Mecânicos nos Compósitos Laminados

O comportamento mecânico dos Compósitos Poliméricos Laminados Reforçados por Tecido de Piaçava (CPLP) e Compósito Polimérico Laminado Híbrido (CPLH) reforçado por Tecido de Piaçava e Tecido de Fibra de Vidro-E foi determinado com a realização dos ensaios de tração uniaxial, flexão em três pontos.

Para a realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova (CPs) foram cortados com o auxílio de uma serra mármore utilizando-se disco comum. Os CPs foram lixados e polidos conforme as normas de metalografia (ROHDE, 2010).

As dimensões dos CPs e as especificações de execução dos ensaios seguiram as normas da ASTM D3039 e ASTM D790 para os ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos, respectivamente.

As propriedades mecânicas de resistência, módulo de Young (ou módulo de elasticidade) e deformação na fratura foram determinados em todos os ensaios.

Na realização dos ensaios foram tomados alguns cuidados, como ajustes dos CPs na garra da máquina, para evitar problemas de deslizamento no início do carregamento, como também uma garantia de dimensões do comprimento útil dos mesmos. Foram utilizadas seis amostras para cada tipo de ensaio realizado.

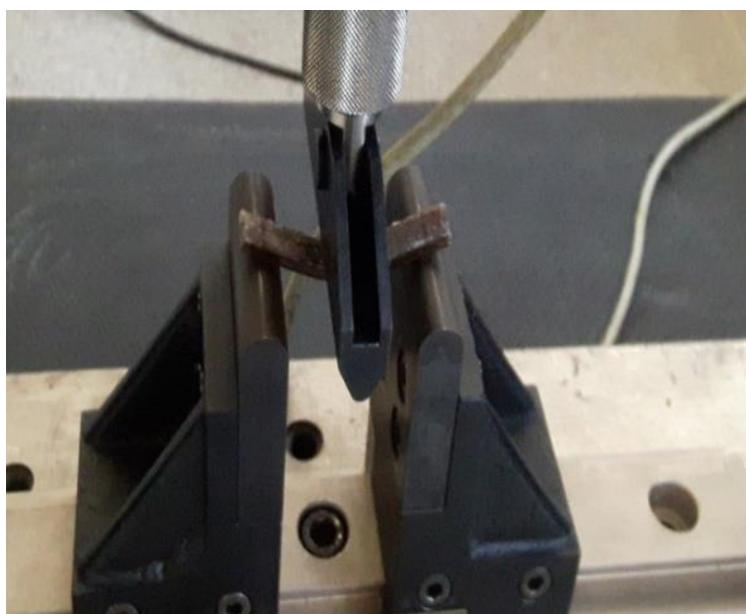
Os ensaios dos CPs CPIA de tração uniaxial e flexão em três pontos são mostrados na Figura 43 e 44, respectivamente.

Figura 43 - Tração no Compósito de Piaçava.



Fonte: O autor (2019)

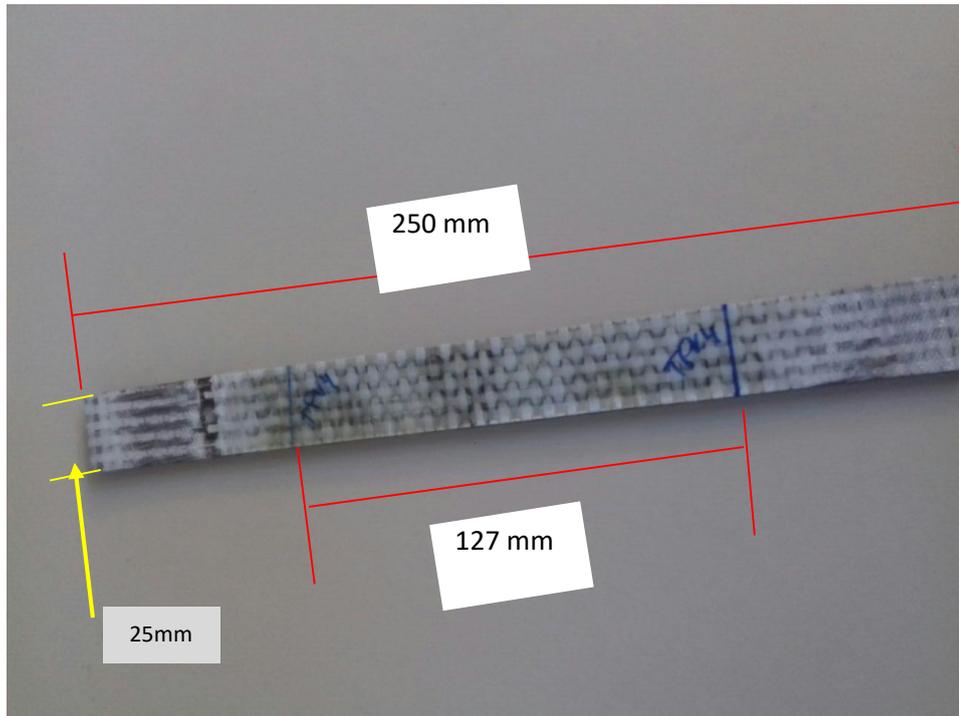
Figura 44 - Flexão em três pontos no Compósito de Piaçava.



Fonte: O autor (2019)

As dimensões das amostras de tração e flexão em três pontos dos laminados CPLP e CPLH são apresentadas nas próprias Figuras dos corpos de prova. O Corpo de prova do compósito híbrido para tração é mostrado na Figura 45.

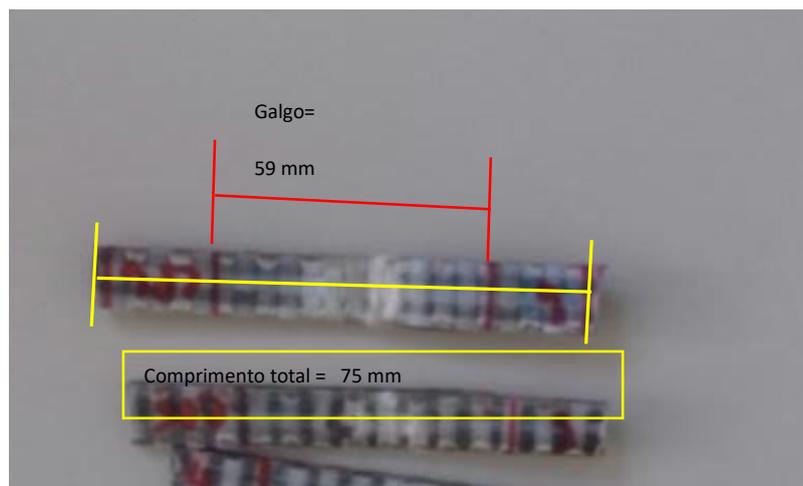
Figura 45 - Tração do compósito híbrido seguindo a ASTM D3039.



Fonte: O autor (2019)

O corpo de prova do compósito híbrido para flexão é mostrado na Figura 46.

Figura 46 - Corpo de prova de híbrido para flexão seguindo a ASTM d790.

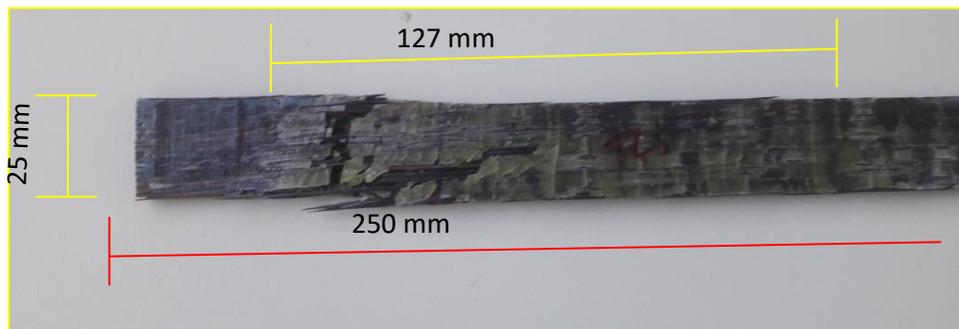


Fonte: O autor (2019)

As dimensões do galgo para flexão foram determinadas de acordo com a norma ASTM D790 para híbrido (piaçava com vidro) que foi de aproximadamente 75 mm de comprimento total, sendo o galgo de 59 mm.

O Corpo de Prova do Compósito reforçado por piaçava para tração é mostrado na Figura 47.

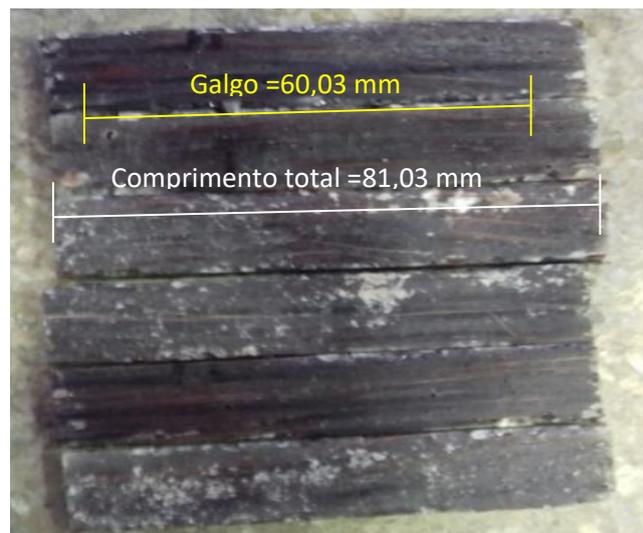
Figura 47 - Corpo de prova de tração CPIA



Fonte: O autor (2019)

O Corpo de prova do compósito reforçado por piaçava para flexão é mostrado na Figura 48.

Figura 48 - Corpo de prova de piaçava CPIA seguindo as normas de Flexão ASTM.



Fonte: O autor (2019)

3.1.2 Determinação de Densidade do compósito elaborado

A densidade volumétrica dos vários compósitos foi obtida, segundo norma ASTM D792, através do método de imersão dos corpos-de-prova, num total de 05 amostras de 25 mm de comprimento por 25 mm de largura de cada laminado.

As amostras foram pesadas individualmente em uma balança eletrônica digital Shimadzu com capacidade máxima de 220 g e mínima de 10 g e resolução de 0,1 mg como também o afundador, arame fino responsável pelo suporte das amostras. Em seguida um béquer contendo água destilada foi colocado na balança e a mesma zerada. Cada amostra foi mergulhada na água e novamente pesada conforme Figura 49.

Equação de Densidade do Compósito:

$$D_c = \frac{a \times 0,9975}{a + w - b} \quad (2)$$

Onde:

- D_c = Densidade do Compósito (g/cm³);
- a = massa da amostra seca (g);
- w = massa do pendurador da amostra imerso em água sem a amostra (g);
- b = massa do pendurador com a amostra imersa em água (g).

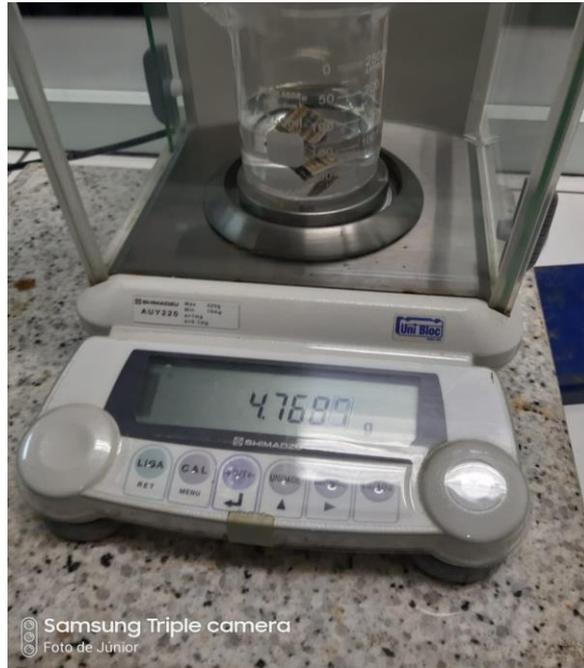
Equação da Densidade da Fibra:

$$D_F = \frac{a \times 0,9975}{a + w - b} \quad (3)$$

Onde:

- D_F = densidade do compósito (g/cm³);
- a = massa da amostra(tecido) seca (g);
- w = massa do pendurador da amostra imerso em água sem a amostra (g);
- b = massa do pendurador com a amostra imersa em água (g).

Figura 49 - Ensaio de Densidade Volumétrica



Fonte: O autor (2019)

Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente (25 °C), em um equipamento EMIC Modelo DL 30000 com célula de 20 KN e velocidade de 1,0 mm/min, conforme a Figura 50.

Figura 50 - EMIC DL 30000.



Fonte: O autor (2019)

3.1.3 Análise Microscópica das fraturas dos compósitos

Foi feita a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV – Figura 51) nas fraturas dos CPs para análise dos mecanismos de danos. O MEV utilizado foi o equipamento de Marca Tescan, modelo LMU - Vega 3. A tensão de trabalho adotada foi de 7 kV, detector do tipo SE, com distâncias variando entre 14 e 16 mm. A aproximação ficou entre 100X e 200X.

Figura 51 - MEV da Marca TESCAN Modelo VEJA 3 LMU.



Fonte: O autor (2019)

Por se tratar de um material não metálico e a fim de se avaliar as modificações na morfologia das fibras, precisamente na sua superfície, onde estas foram recobertas com ouro (de 20 a 25 nanômetros de espessura sobre a amostra) pelo processo de metalização dos mesmos através do equipamento metalizador de marca Quorum e modelo Q150R (Figura 52).

Figura 52 - Metalizador para banhar a fibra natural de ouro. Marca Quorum e Modelo Q150R.



Fonte: O autor (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui serão apresentados os resultados de todo o trabalho apresentado nessa pesquisa.

4.1 ENSAIOS MECÂNICOS DO LAMINADO COM TECIDO DE PIAÇAVA

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos. Os módulos de Elasticidade foram determinados levando-os em consideração os valores de tensão e deformação até 50% da carga de ruptura para impedir a influência do início dos danos nos mesmos.

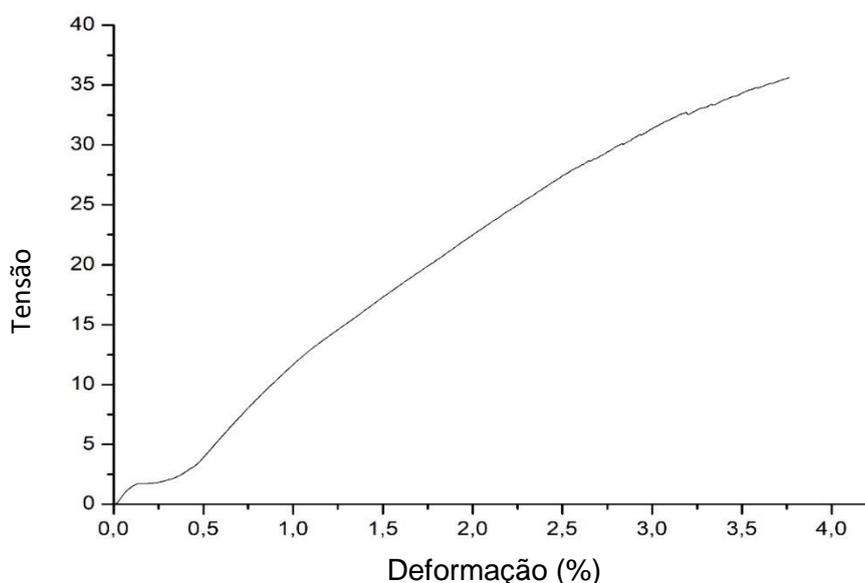
4.1.1 Densidade Volumétrica

A densidade volumétrica encontrada para o CPIA foi em média de 0,9958 g/cm³ e para CHYB foi em média de 0,9970 g/cm³.

4.1.2 Ensaio de Tração Uniaxial - CPIA

A média dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração uniaxial para o CPIA é mostrada na forma do gráfico da Tensão x Deformação, de acordo com a Figura 53. A Figura demonstrou um comportamento do tipo frágil até a fratura final do material ensaiado.

Figura 53 - Tensão x Deformação para o CPIA



Fonte: O autor (2019)

Os ensaios de tração uniaxial, de acordo com a Norma ASTM D3039, foram realizados com a carga aplicada no sentido paralelo às fibras (longitudinal) no tecido unidirecional elaborado. Esses mostraram que a dispersão dos valores referentes à tensão e a deformação (através do desvio padrão) encontrados nos resultados foi maior para a tensão última que para o módulo de elasticidade longitudinal, principalmente após a carga de início do dano (fissura na matriz). Ressalta-se aqui que o cálculo do módulo elástico longitudinal (medido na direção da carga) foi em um intervalo de tensão e deformação antes do início do dano no compósito.

Os valores médios para resistência última à tração, módulo de elasticidade longitudinal e deformação de ruptura são mostrados na Tabela 8, bem como os respectivos desvios padrões.

A tensão última do **CPIA** na tração uniaxial foi em média de 43,00 MPa, enquanto o módulo elástico foi de 4,07 GPa e, apesar de o **CPIA** mostrar uma resistência à tração superior à da resina poliéster e perde no módulo elástico. Em

média, a resistência à tração da resina de poliéster é de 30 MPa e o módulo elástico é de 7,0 GPa (HERAKOVICH, 1997).

Tabela 8 - Propriedades Mecânicas do CPIA – tração Uniaxial

Propriedades Mecânicas	Valores Médios	Desvio Padrão (±)
Tensão Última (MPa)	43,00	6,12
Modulo de Elasticidade (GPa)	4,07	0,99
Deformação Máxima (%)	6,00	2,58

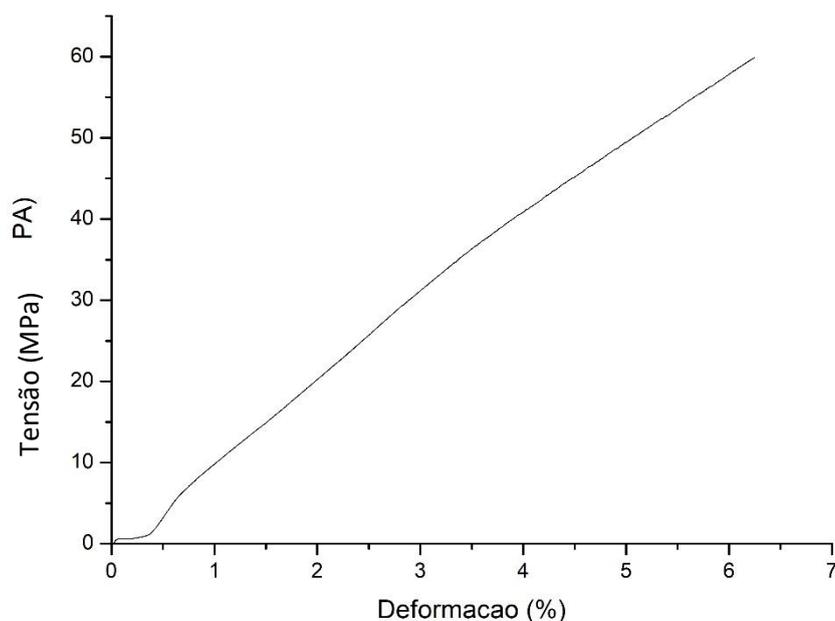
Fonte: O autor (2019)

4.1.3 Tração Uniaxial - CHYB

A média dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração uniaxial, desenvolvido durante o trabalho, para o CHYB é mostrada na forma do gráfico da Tensão x Deformação de acordo com a Figura 54. A Figura demonstrou um comportamento do tipo frágil até a fratura final do material ensaiado.

Os ensaios de tração uniaxial, de acordo com a Norma ASTM D3039, foram realizados com a carga aplicada no sentido paralelo às fibras (longitudinal) nos tecidos unidirecional da piaçava elaborado e no tecido bidirecional da fibra de vidro-E (industrial). Esses mostram que a dispersão dos valores referentes à tensão e a deformação (através do desvio padrão) encontrada nos resultados foi maior para a tensão última que para o módulo de elasticidade, principalmente após a carga de início do dano (fissura na matriz). Ressalta-se aqui que o cálculo do módulo elástico (medido na direção da carga) foi em um intervalo de tensão e deformação antes do início do dano no compósito.

Figura 54 - Tensão x Deformação para o CHYB



Fonte: O autor (2019)

Os valores médios para resistência última à tração, módulo de elasticidade e deformação de ruptura são mostrados na Tabela 9, bem como os respectivos desvios padrões.

Tabela 9 - Propriedades Mecânicas do CHYB – tração Uniaxial

Propriedades Mecânicas	Valores Médios	Desvio Padrão (±)
Tensão Última (MPa)	67,60	6,54
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,22	0,28
Deformação Máxima (%)	7,20	1,10

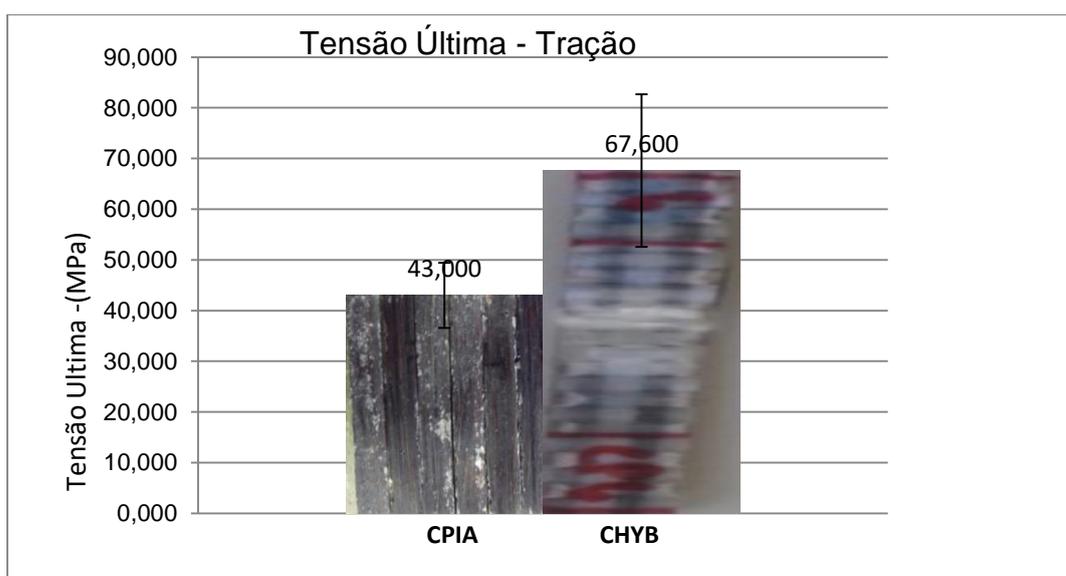
Fonte: O autor (2019)

A tensão última do **CHYB** na tração uniaxial foi em média de 67,60 Mpa, enquanto o módulo elástico foi de 2,22 GPa e, o compósito híbrido demonstrou ter um ganho para a resistência última e pouca contribuição de ganho no modulo de elasticidade comparado com a matriz polimérica. Em média, a resistência à tração da resina de poliéster é de 30 MPa e o módulo elástico é de 7,0 GPa (HERAKOVICH, 1997).

4.1.4 Influência da Hibridização – Estudo Comparativo

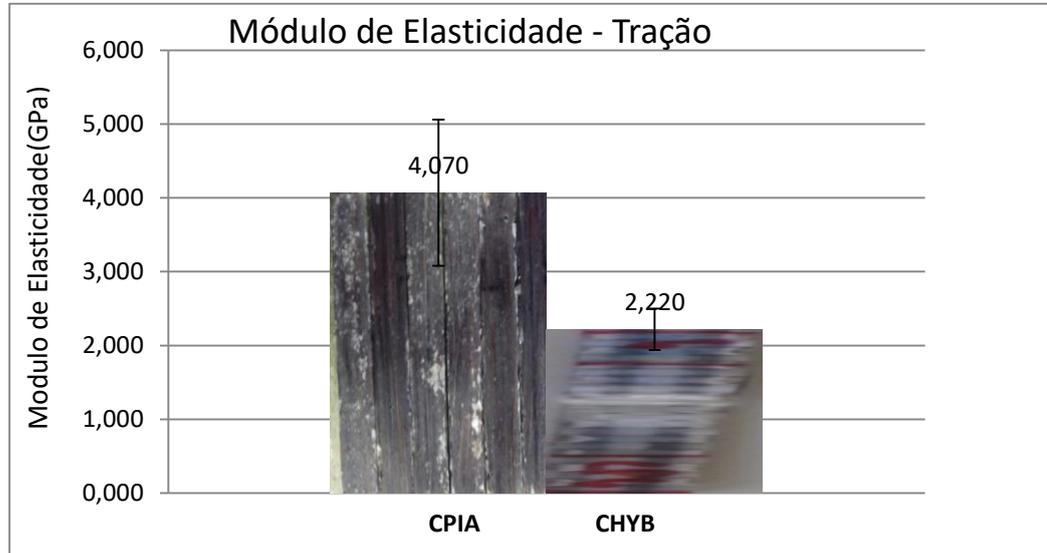
O gráfico comparativo das tensões última, modulos de elasticidade e deformações com os respectivos desvios padrões, dos compósitos laminados CPIA e CHYB são mostrados na Figura 55, Figura 56 e Figura 57.

Figura 55 – Desvio padrão dos ensaios de tração uniaxial do CPIA e CHYB



Fonte: O autor (2019)

Figura 56 - Módulo de Elasticidade para o ensaio de tração



Fonte: O autor (2019)

Figura 57 - Deformação para o ensaio de tração



Fonte: O autor (2019)

4.2 ANÁLISE DE FRATURA – ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL (CPIA)

Uma interface entre a matriz e o reforço sem a presença de defeitos de fabricação (bolhas, entre outros) é requerido nos compósitos laminados. Os

pesquisados apresentaram pequenos defeitos em relação ao todo. Não houve desvios (ondulações) na orientação das fibras que pudesse resultar em mecanismo de dano mais uniformemente distribuído e conseqüentemente essa característica final da fratura tornar-se-ia coerente com o comportamento à fratura dos materiais tidos como “quebradiços” sob a ação de tensões normais.

Todos os comentários feitos são pertinentes ao quadro do mecanismo de fratura observado nos ensaios de tração uniaxial no CPIA. De modo que, os desvios ocorridos na orientação das fibras inicialmente devido à forma artesanal na confecção do tecido e posteriormente agravados pelo tipo de processo de fabricação, resultaram em um comportamento da fratura final, previsto pela norma.

Os modos de falha para ensaio de tração uniaxial em laminados compósitos são caracterizados segundo norma ASTM D3039. O modo de fratura para o laminado compósito CPIA pode ser definido como LAT (Lateral / AT GRIP ou tab/ TOP), ou seja, Lateral, na garra e no topo, conforme Figura 58.

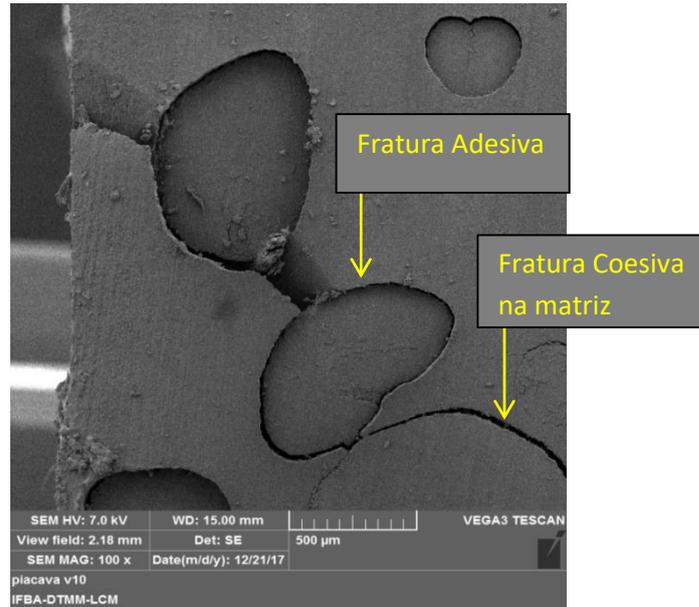
Figura 58 - Fratura do tipo LAT no CPIA pela ASTM



Fonte: O autor (2019)

Verificou-se também que a fratura começava originando uma seção plana (coerente com a fratura de materiais quebradiços), mas ao encontrar fibras com desvios em relação à direção da carga, a fratura era desviada devido ao bloqueio das fibras provocando percursos diferentes na resina. Esses fatos influem diretamente na resposta mecânica final do compósito, principalmente em sua dispersão. A micrografia, Figura 59, realizada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou fratura adesiva e fratura coesiva na matriz.

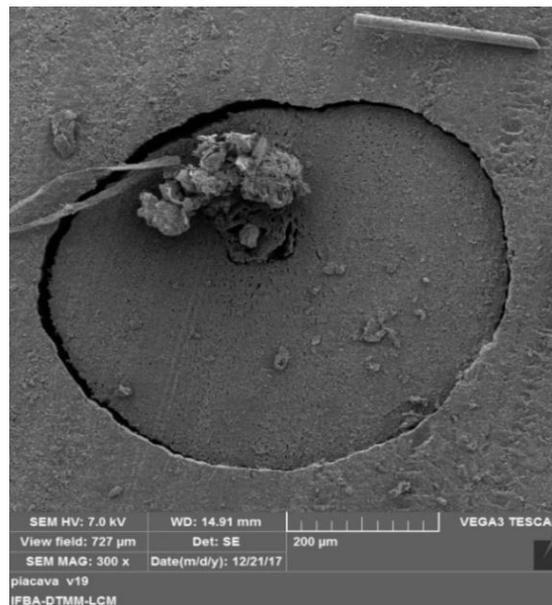
Figura 59 - MEV de CPIA mostrando fraturas adesiva e coesiva na matriz.



Fonte: O autor (2019)

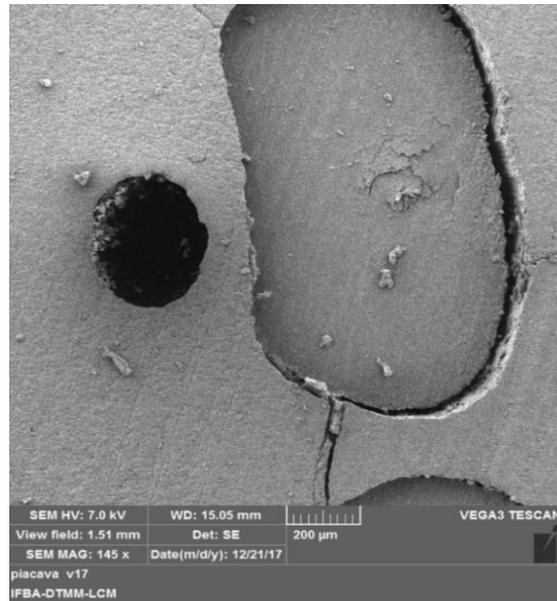
Na Micrografia da Figura 60 já é visto a bolha com a fratura adesiva da amostra do CPIA. Na Figura 61 já é visto a bolha com a fratura adesiva da amostra do CPIA. Importante perceber que a fratura é bloqueada, ou tem dificuldade em se propagar pela fibra natural de piaçava.

Figura 60 - Bolha e fratura adesiva.



Fonte: O autor (2019)

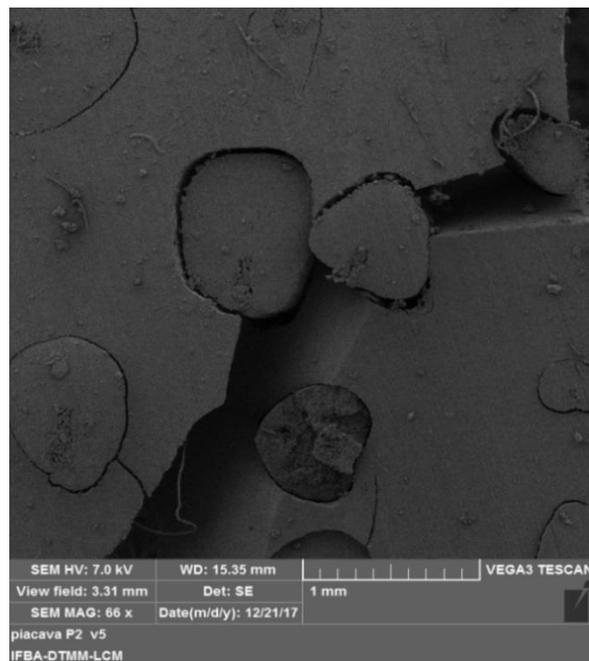
Figura 61 - Arrancamento onde se tem a fibra de piaçava aparente.



Fonte: O autor (2019)

Na Micrografia da Figura 62 é visto a fratura adesiva e coesiva no compósito CPIA.

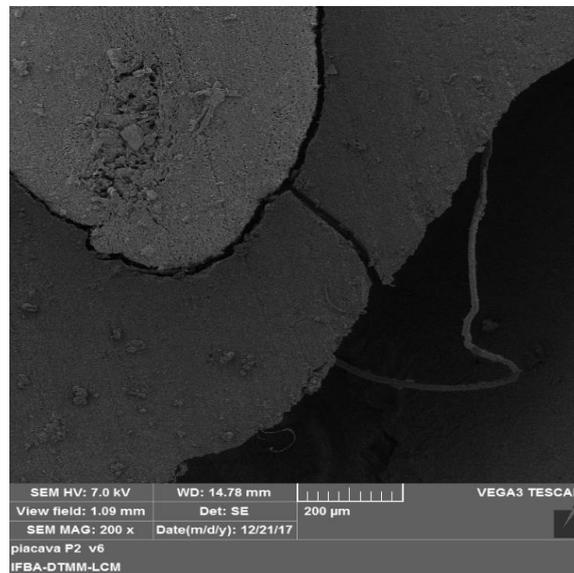
Figura 62 - Fratura adesiva e coesiva no compósito.



Fonte: próprio autor

Na Micrografia da Figura 63 é perceptível a fratura coesiva na matriz.

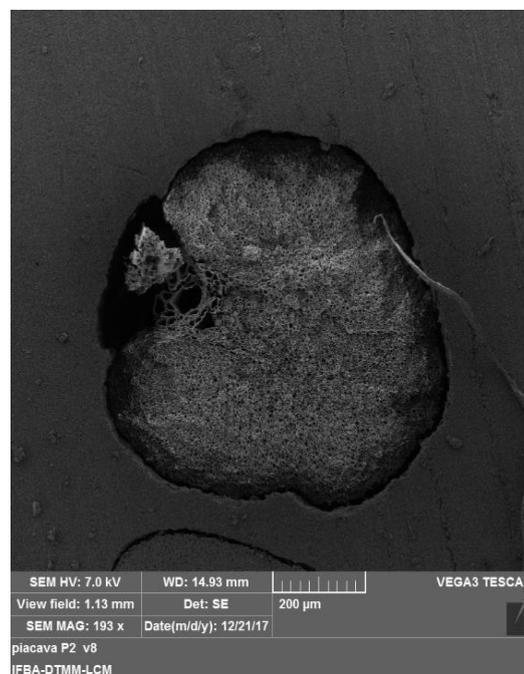
Figura 63 - Fratura coesiva na matriz.



Fonte: O autor (2019)

Na Micrografia da Figura 64 relata a fratura coesiva na fibra de piaçava.

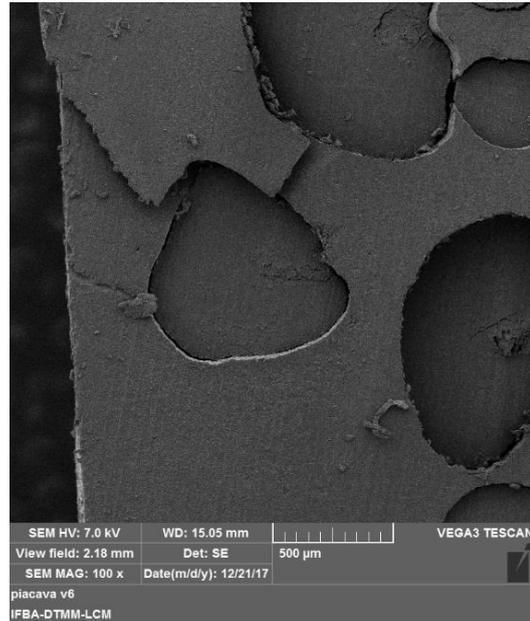
Figura 64 - Fratura coesiva na fibra de piaçava



Fonte: O autor (2019)

A Micrografia mostrada na Figura 65 mostra outras faturas coesivas na matriz.

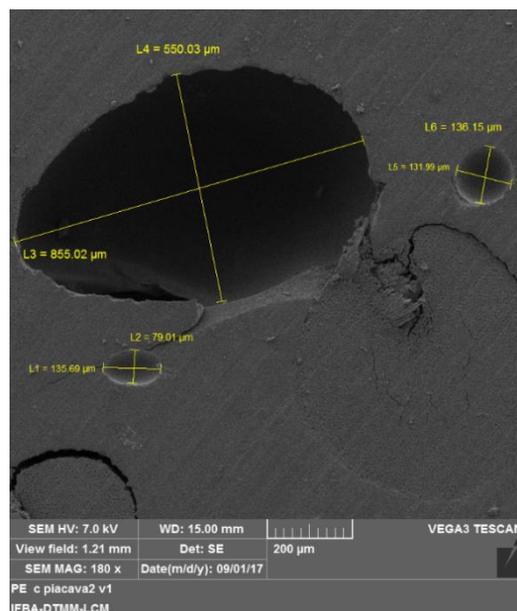
Figura 65 - Fraturas coesivas na matriz.



Fonte: O autor (2019)

Na Micrografia mostrada na Figura 66 pode-se observar as dimensões de algumas bolhas encontradas, em micrometros, tendo a maior as medidas $L4 = 550,03$ e $L3 = 855,02 \mu\text{m}$ e outra bolha menor com dimensões de $L5 = 131,99$ e $L6 = 136,15 \mu\text{m}$ onde percebemos que as bolhas são bem pequenas.

Figura 66 - Bolhas com dimensões.



Fonte: O autor (2019)

4.3 ANÁLISE DE FRATURA – ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL (CHYB)

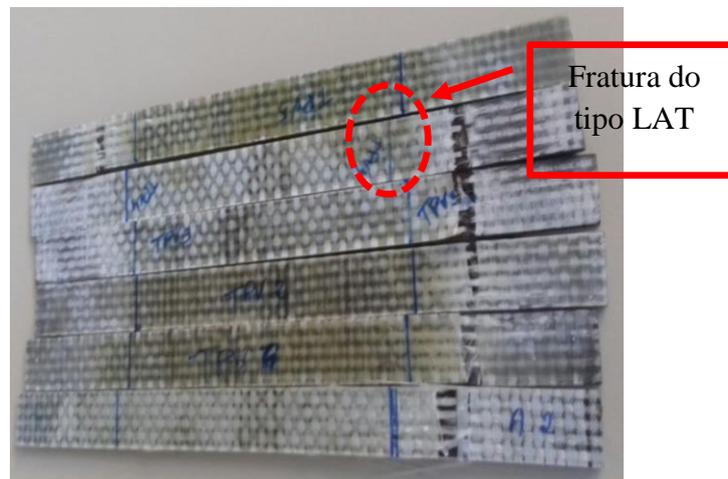
Uma interface entre a matriz e o reforço sem a presença de defeitos de fabricação (bolhas, entre outros) é requerido nos compósitos laminados. Os pesquisados apresentaram pequenos defeitos em relação ao todo. Não houve desvios (ondulações) na orientação das fibras que pudesse resultar em mecanismo de dano mais uniformemente distribuído e conseqüentemente essa característica final da fratura tornar-se-ia coerente com o comportamento à fratura dos materiais tidos como “quebradiços” sob a ação de tensões normais.

Todos os comentários feitos são pertinentes ao quadro do mecanismo de fratura observado nos ensaios de tração uniaxial no CHYB. De modo que, os desvios ocorridos na orientação das fibras inicialmente devido à forma artesanal na confecção do tecido e posteriormente agravados pelo tipo de processo de fabricação, resultaram em um comportamento da fratura final, previsto pela norma.

Verificou-se também que a fratura começava originando uma seção plana (coerente com a fratura de materiais quebradiços), mas ao encontrar fibras naturais e sintéticas com desvios com relação à direção da carga a fratura era desviada devido ao bloqueio das fibras provocando percursos diferentes na resina.

Esses fatos influem diretamente na resposta mecânica final do compósito, principalmente em sua dispersão. Os modos de falha para ensaio de tração uniaxial em laminados compósitos são caracterizados segundo norma ASTM D3039. O modo de fratura para o laminado compósito CHYB pode ser definido como LAT (Lateral / AT GRIP ou tab/ TOP), ou seja, Lateral, na garra e no topo, conforme Figura 67.

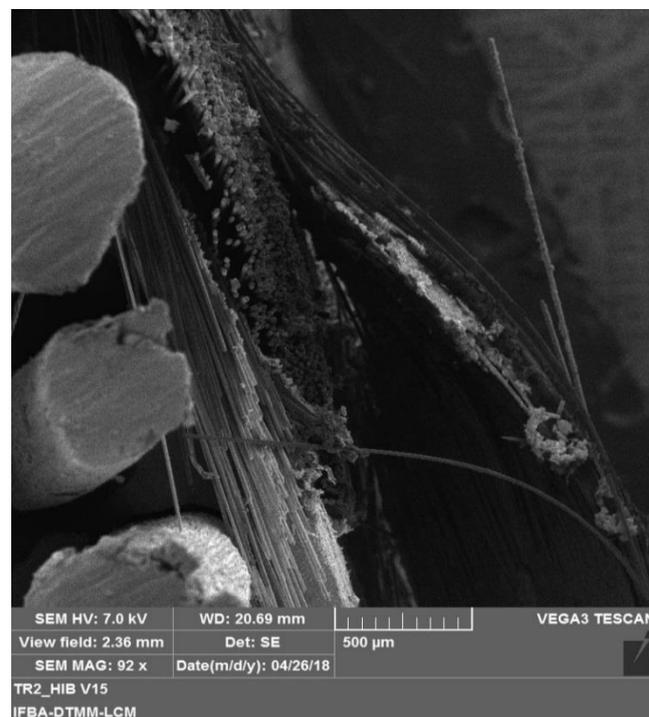
Figura 67 - Amostra de CHYB para o ensaio de tração do tipo LAT



Fonte: O autor (2019)

Na Micrografia observada na Figura 68 pode se identificar a fibra de vidro-E.

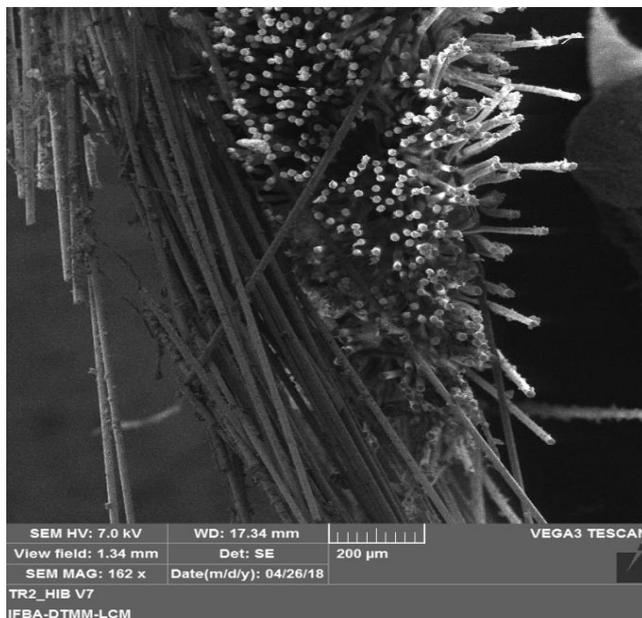
Figura 68 - Fibra de Vidro-E.



Fonte: O autor (2019)

Na Micrografia da Figura 69 se visualiza as fibras de piaçava e a de vidro-E.

Figura 69 - Compósito com a fibra de piaçava e a de vidro-E.

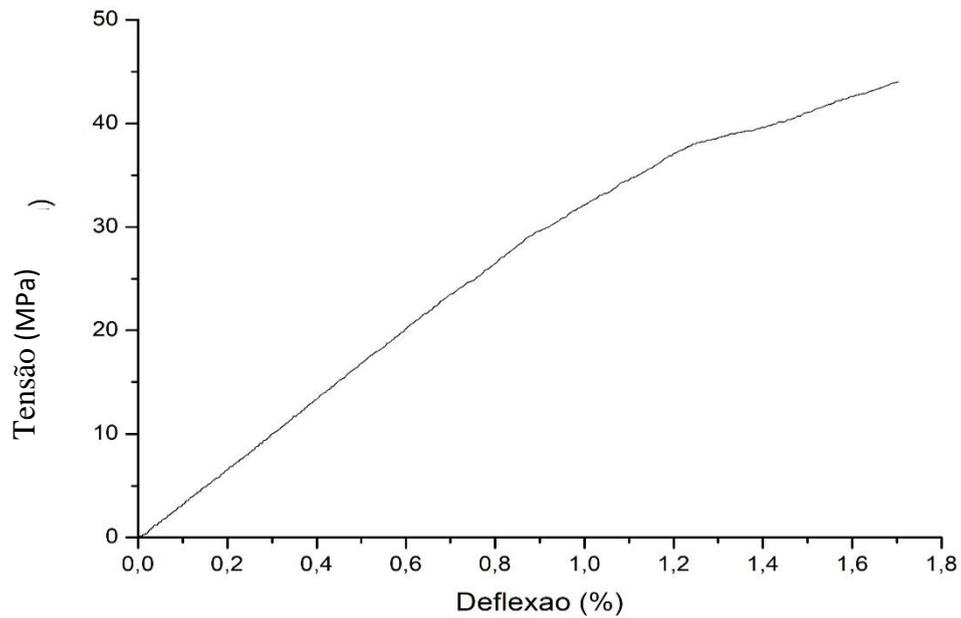


Fonte: O autor (2019)

4.4 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS – CPIA

No ensaio de flexão a carga aplicada é na forma de linha (cilindro aplicador) e dependendo se a região central do corpo de prova (seção de aplicação da carga) coincidir com uma região rica em resina ou em fibras, a carga de início do dano pode variar e assim influir na resistência à flexão do laminado. A Figura 70 mostra a média dos resultados do ensaio de flexão em três pontos na forma do gráfico do comportamento do material em termos da tensão x deflexão, para o laminado compósito CPIA (amostras da Figura 71). Todos os ensaios foram realizados considerando a face de aplicação da carga como sendo a face obtida em contato com o molde no processo de laminação.

Figura 70 - Tração x Deflexão para o ensaio CPIA de flexão em três pontos



Fonte: O autor (2019)

Figura 71 - Amostras de CPIA do ensaio de flexão em tres pontos.



Fonte: O autor (2019)

Algumas imagens microscópicas da CPIA ensaiada na flexão são mostradas. Na Figura 72, onde se ver a fibra natural de piaçava após o ensaio de flexão.

Figura 72 - CPIA após ensaio de flexão.



Fonte: O autor (2019)

O laminado CPIA apresentou um comportamento linearmente elástico até a fratura final. Os valores médios para resistência à flexão, módulo de elasticidade longitudinal e deflexão máxima são mostrados na Tabela 10, bem como os respectivos desvios padrões. Ressalta-se aqui que o módulo de elasticidade foi calculado para um intervalo de tensão x deflexão antes da carga de início do dano.

Observa-se que o processo de fabricação de laminação utilizado na obtenção do compósito produziu região rica em resina entre as camadas do tecido de piaçava, originando “ondulação” caracterizada pelo desvio na orientação das fibras. Isto significa que a resposta à flexão do compósito sofre uma descontinuidade durante a aplicação da carga.

Tabela 10 - Propriedades Mecânicas do CPIA - Flexão em Três pontos

Propriedades Mecânicas	Valores Médios	Desvio Padrão (\pm)
Tensão Última na Flexão (MPa)	43,95	6,41
Módulo de Elasticidade (GPa)	0,051	0,007
Deflexão Máxima (%)	1,65	0,06

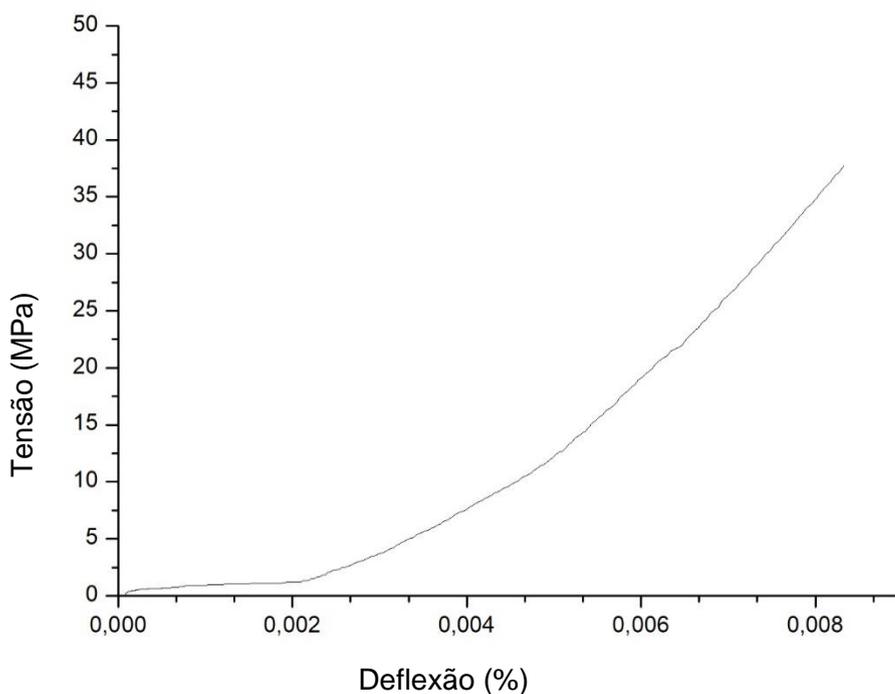
Fonte: O autor (2019)

4.5 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS – CHYB

A média dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração uniaxial, desenvolvido durante o trabalho, para o laminado CHYB é mostrada na forma do gráfico da Tensão x Deflexão de acordo com a Figura 73. Ele demonstrou um comportamento do tipo frágil até a fratura final do material estudado.

Os ensaios de flexão em três pontos, de acordo com a Norma ASTM D790, foram realizados pela máquina EMIC DL 30000. Os resultados contendo as propriedades mecânicas do CHYB estão na Tabela 11, com seus respectivos desvios padrões.

Figura 73 - Tensão x Deflexão de CHYB.



Fonte: O autor (2019)

Tabela 11 - Propriedades mecânicas do CHYB - Teste de flexão em três pontos

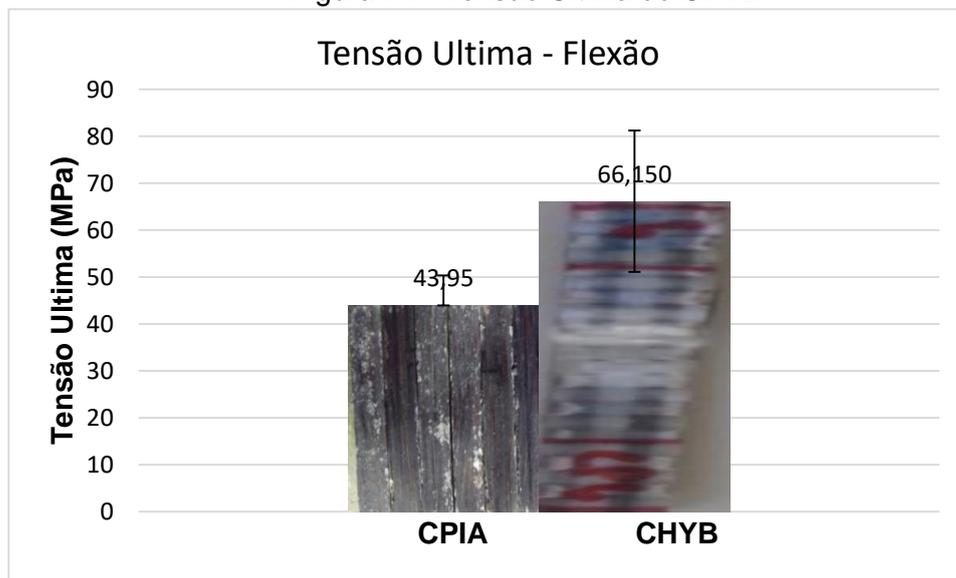
Propriedades Mecânicas	Valores Médios	Desvio Padrão (\pm)
Tensão Última (MPa)	66,15	15,06
Modulo de Elasticidade (GPa)	0,306	0,026
Deflexão Máxima (%)	1,64	0,12

Fonte: O autor (2019)

4.6 INFLUÊNCIA DA HIBRIDIZAÇÃO – ESTUDO COMPARATIVO

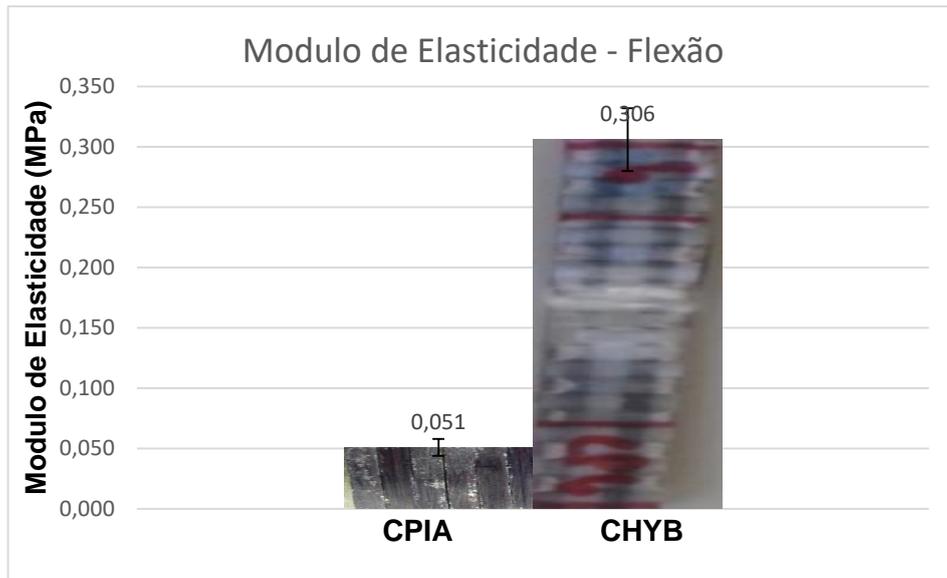
O gráfico comparativo das flexões em três pontos dos modulos de elasticidade e deflexões com os respectivos desvios padrões, dos compósitos laminados CPIA e CHYB são mostrados nas Figura 74, Figura 75 e Figura 76.

Figura 74 - Tensão Última do CHYB



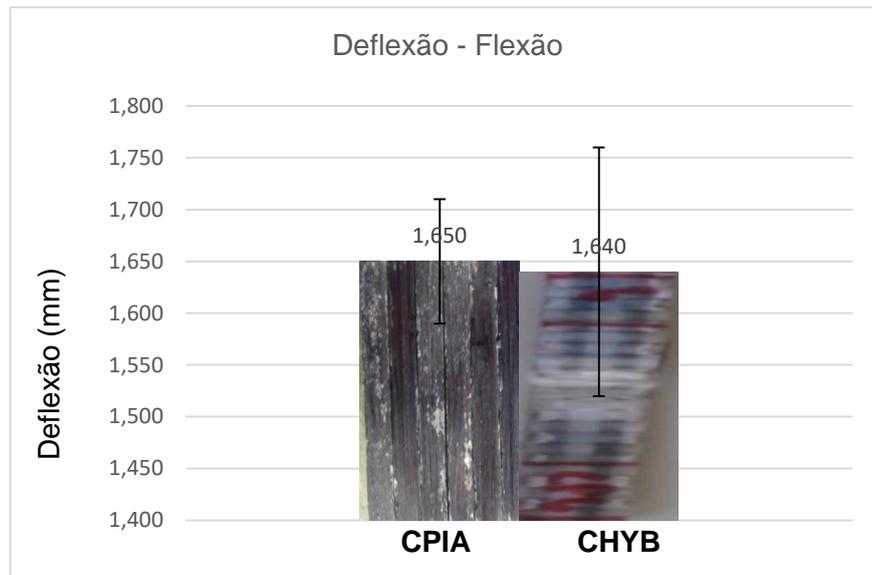
Fonte: O autor (2019)

Figura 75 - Gráfico do Modulo de Young para flexão em três pontos.



Fonte: O autor (2019)

Figura 76 - Deflexão para o ensaio de flexão em três pontos.

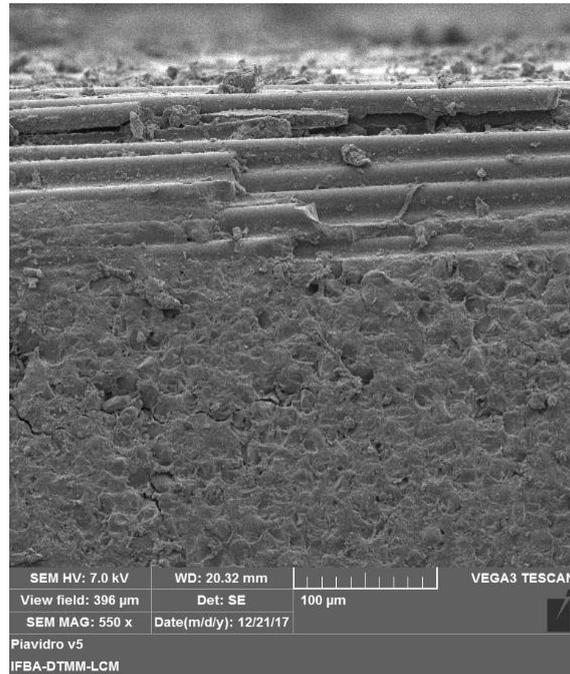


Fonte: O autor (2019)

4.7 MICROGRAFIA DA FLEXÃO EM TRÊS PONTOS - CHYB

A Micrografia da Figura 77 mostra uma imagem da fibra de vidro do compósito CHYB.

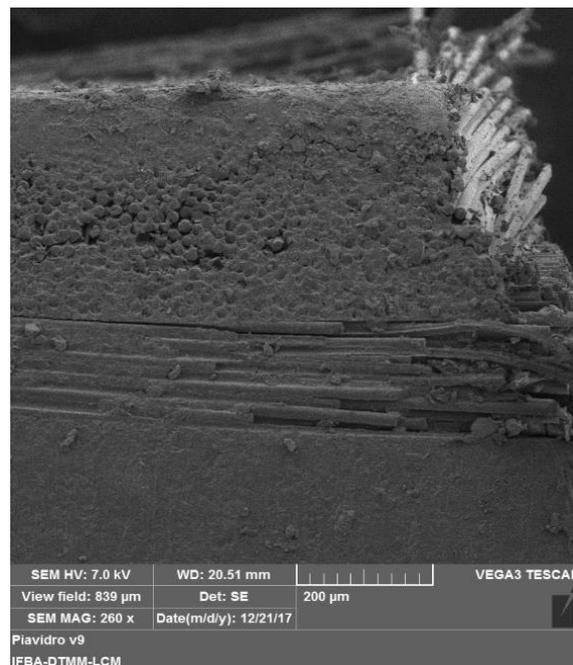
Figura 77 - Visibilidade da fibra de vidro-E no CHYB ensaiado.



Fonte: O autor (2019)

Nessa Micrografia mostrada na Figura 78 tem-se em uma outra perspectiva do tecido de fibra de vidro no compósito híbrido.

Figura 78 - Fibra de vidro-E em outra perspectiva.



Fonte: O autor (2019)

4.8 COMPARATIVO CHYB COM OUTROS COMPÓSITOS HIBRIDIZADOS

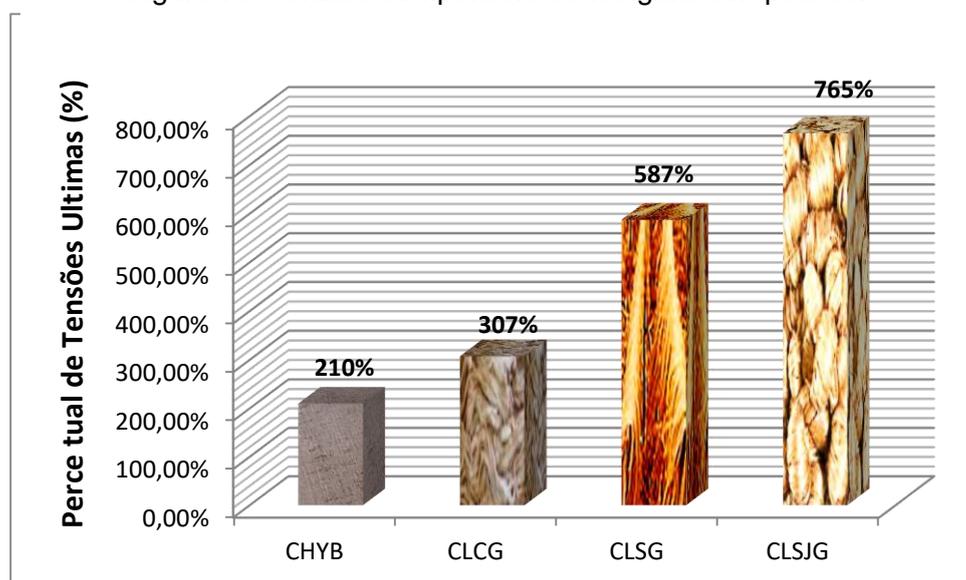
A Tabela 12 mostra os percentuais de aumento da tensão última do compósito de piaçava (CHYB), em relação a resistência da resina poliéster (30 MPa), juntamente com alguns compósitos que foram hibridizados com a fibra de vidro-E e utilizaram diferentes fibras naturais como reforço, enquanto a Figura 79 exemplifica melhor este comparativo.

Tabela 12 - Valores das tensões últimas dos compósitos utilizados.

Compósito/Fibra	Tensão Última (Mpa)	Percentual das Tensões Últimas em relação a resina de Poliester
CHYB/Piaçava	63,00	210%
CLCG/Curauá	92,20	307%
CLSG/Sisal	176,20	587%
CLSJG/Juta	229,54	765%
Resina de Poliester	30,00	-

Fonte: (LEAO, TINO e AQUINO, 2015); (RAMESH, PALANIKUMAR e REDDY, 2013);
(SILVA, R; AQUINO, E; RODRIGUES, L; BARROS, A, 2009)

Figura 79 - Gráfico comparativo com alguns compósitos.



Fonte: (RAMESH, PALANIKUMAR e REDDY, 2013 ; SILVA, R; AQUINO, E.;
RODRIGUES, L.; BARROS, A, 2009 ; LEAO, TINO e AQUINO, 2015)

Todos compósitos citados na Tabela 12 utilizaram o mesmo tipo de resina (poliéster) idêntica ao utilizado no laminado de piaçava. Também foram utilizados para

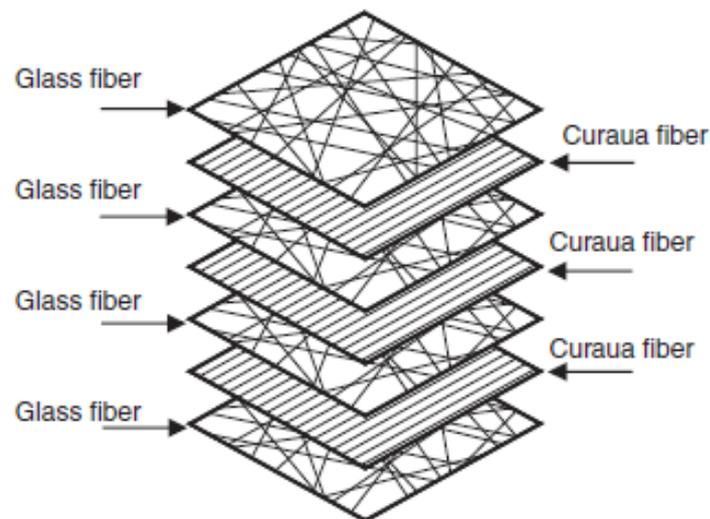
todos os compósitos tecido bidirecional de fibra de vidro-E (FV) na hidridização, além de tecido unidirecional de fibras vegetais como reforço.

O compósito híbrido de curauá foi confeccionado com 7 camadas de reforço conforme a Figura 80.

O compósito híbrido que possui a configuração da fibra natural unidirecional sisal(S) com o tecido bidirecional de fibra de vidro-E (FV) foi confeccionado por 5 camadas (FV/S/FV/S/FV).

O compósito híbrido que possui a configuração de duas fibras naturais unidirecionais juta (J) e sisal(S) com o tecido bidirecional de fibra de vidro-E (FV) foi confeccionado por 5 camadas (FV/S/FV/J/FV).

Figura 80 - Configuração do laminado híbrido de curauá.



Fonte: (SILVA, R; AQUINO, E; RODRIGUES, L; BARROS, A, 2009)

De acordo com essas informações se confirma que os métodos utilizados deram as condições que foram apresentadas nos resultados desses compósitos apresentados tendo o compósito híbrido de sisal e juta com a fibra de vidro-E como laminado de melhor desempenho apresentado.

5 CONCLUSÕES

Nesta seção serão apresentadas as conclusões dos resultados e discussões da pesquisa desenvolvida.

5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS LAMINADOS CPIA E CHYB

- A tensão última dos laminados compósitos **CPIA** e **CHYB** na tração uniaxial foi superior à da matriz (resina de poliéster), sendo inferior, contudo, para o módulo de Young;
- Os laminados **CPIA** e **CHYB** apresentaram um comportamento linearmente elástico até a fratura final nos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos, em ambos os estados: original e híbrido;
- Em relação ao ensaio dos **CPIA** e **CHYB**, quando comparado aos **ensaios de tração uniaxial**, o laminado **CHYB** apresentou um comportamento com melhores resultados nas propriedades da tensão última com 67,60 MPa. O **CPIA** mostrou um resultado mais favorável de 4,07 GPa para o Modulo de Young. Entretanto, para a deformação o **CHYB** teve 7,20 %;
- Em relação ao ensaio de **flexão em três pontos**, o laminado **CHYB** apresentou melhores resultados em todas as propriedades mecânicas a seguir: na tensão última com 66,15 MPa (**CHYB**), no modulo de Elasticidade (Young) com valor de 0,306 GPa e na deflexão no valor de 1,64 % (para os laminados analisados).

5.2 ANÁLISE DA FRATURA

- O modo de fratura para o laminado **CPIA** no ensaio de tração uniaxial foi, segundo a norma ASTM D3039/D3039 M – 08, LAT, ou seja, lateral, no tab ou grip e topo. Já o **CHYB** apresentou uma fratura do tipo **LAT**, lateral, no tab/grip e no topo;
- Nas análises microscópicas tanto do laminado **CPIA** quanto no laminado **CHYB**, no estado original e no estado híbrido, foram encontrados danos do tipo fratura adesiva, fratura coesiva na matriz e na fibra, microfissurações e fendas com várias intensidades.

De forma geral os laminados ou compósitos a base de fibras de piaçava, apresentaram algumas vantagens em suas respostas frente a tensão última e módulo de elasticidade. Comparando-se com alguns laminados com outras fibras o CPIA e o CHYB tiveram resultados inferiores com relação as propriedades mecânicas estudadas, contudo, demonstraram ter alcançado vantagens em relação a matriz polimérica (resina de poliéster). Essas vantagens são evidenciadas no comportamento relacionado à rigidez.

A integridade estrutural desses laminados foi mais afetada para o caso do laminado somente à base de tecido de fibras de piaçava (CPIA) sob a ação de cargas uniaxiais de tração onde foi verificada uma menor taxa de retenção de sua propriedade de resistência última. Já com o laminado híbrido (CHYB) obteve-se uma maior retenção de sua propriedade de resistência última.

Para a análise de fratura os danos encontrados demonstraram que no ensaio longitudinal houve-se uma fratura coesiva devida a carga que o compósito e as fibras envolvidas sofreram diante da carga suportada pelo ensaio submetido. Inclusive as fraturas adesivas que foram encontradas nessa análise mostraram que a aderência foi caracterizada por essa visualização da desaderência encontrada pelo ensaio submetido.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Usar outro produto para tratamento químico mais eficaz, como alternativa, para a retirada da cera e das impurezas das fibras avaliando a melhoria na adesão e a influência nas propriedades;
- Usar tecnologia nanocomposito para auxiliar no preenchimento de vazios que podem interferir na aderência da matriz com os tecidos de fibra – aderência e redução de porosidade;
- Utilizar o formato bidirecional para o tecido de piaçava;
- Fazer o ensaio de compressão para os compósitos com piaçava;
- Fazer o teste de envelhecimento dos compósitos reforçados por piaçava;

REFERÊNCIAS

- AQUINO, R. C. M. P. **Desenvolvimento de compósitos de Fibras de piaçava da espécie attlea funifera e matriz de resina**. 2003. Tese (Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais) Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goitacazes, 2003.
- ASHBY, M. F. **Materials selection in mechanical design.**, 2005. Disponível em: <<http://jpkc.fudan.edu.cn/picture/article/255/1c/8c/8a256ed84a98beafbd225ea6936e/43f6d2e4-9479-4872-9970-f70754fce954.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2018.
- ASTM D2344/D2344M. **Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates**. Disponível em: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D2344+16. Acesso em: 26 set. 2018
- ASTM D3039M. **Standard test methods for tensile properties of polymer matrix composites**. Disponível em: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D3039 Acesso: 20 mar. 2019
- ASTM D790-03. **Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials**. Disponível em: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D790 Acesso: 20 mar. 2019
- BAPTISTA, E. H. **A imagética rural na estrutura do design têxtil**. 2004. 107 f. Monografia (Especialização em Design de Estamparia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/1160/Elza%20Hirata%20Baptista.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 set. 2018.
- BARBOSA, A. D. P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de Buriti**. 2011. Tese (Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais) Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campo dos Goytacazes, 2011. Acesso em: 20 set. 2017.
- BATISTA, A. C. M. C.; OLIVEIRA, J. F. S.; AQUINO, E. M. F. Structural degradation and mechanical fracture of hybrid fabric reinforced composites. **Wiley Online Library**. v. 56 n.06 p.657-668 26 fevereiro 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pen.24292>. Acesso em: 10 fev. 2018
- BERNARDI, Stefania. Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**, Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Univerisade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3596/000402339.pdf?sequence=1> Acesso em: 20 out. 2017.

BISMARCK, A.; LAMPKE, T. Plant fibers as reinforcement for green composites. **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites**, Abril, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1201/9780203508206.ch2> Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284267130_Plant_Fibers_as_Reinforcement_for_Green_Composites/citation/download. Acesso em: 20 ago. 2017.

BLEDZKI, A. K.; REIHMANN, S.; GASSAN, J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 59, ed. 8, p. 1329-1336, 22 fevereiro 1996. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291097-4628%2819960222%2959%3A8%3C1329%3A%3AAID-APP17%3E3.0.CO%3B2-0> Acesso em: 20 ago. 2017.

CALLAPEZ, M. E. aniversário do primeiro plástico. **Química**. Lisboa, ano 2007, n. 106, p. 53-56. Disponível em: <http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/631/article/30001384/pdf>. Acesso em: 09 ago. 2017.

CANEVAROLO Jr., S. V. **Ciencia dos polimeros**. São Carlos: Artliber, 2006.

COLOMBI, B. L. Polimerização da poliamida 6,6: uma breve revisão. **REMAP FLORIANOPOLIS - SC**, v. 11, n. 3, 2016. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/download/580/402>. Acesso em: 20 ago. 2017.

D'ALMEIDA, A. L. F. S. et al. Efeito de tratamentos superficiais em fibras de piaçava sobre o comportamento dinâmico-mecânico de compósitos de matriz poliéster isoftálica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: CBECIMat, 2006.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford University Press, 2006.

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. 22., 2016, Natal. **Anais eletrônicos [...]**. Natal: UFERSA, 2016. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/22cbecimat/normas-para-trabalhos-completos.php>. Acesso em 10 out. 2017.

DUPONT. **Componentes automotivos**. 1802. Disponível em: <http://www.dupont.com.br/produtos-e-servicos/tecidos-fibras-e-nao-tecidos/fibras/usos-e-aplicacoes/componentes-automotivos.html>. Acesso em: 21 março 2019.

FELIPE, R. C. T. D. S. **Envelhecimento ambiental acelerado em PRF a base de tecidos híbridos kevlar/vidro**: propriedades e instabilidade estrutural. 2012. 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15592/1/RenataCTSF_TESE.pdf. Acesso em: 20 set. 2017.

FELIPE, R. N. B. **Efeitos da radiação UV, temperatura e vapor aquecido nos compósitos poliméricos: monitoramento, instabilidade estrutural e fratura.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15594>. Acesso em: 20 set. 2017

FELIPE, R. C. T. dos S.; FELIPE, R. N. B.; BATISTA, A. C. de M. C.; AQUINO, E. M. F. Polymer Composites Reinforced with Hybrid Fiber Fabrics. **Materials Research**, São Carlos-SP, v. 20, n. 2, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0587>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392017000200555. Acesso em: 21 mar. 2019.

FELTRAN, M. D. B. **Compósitos de PVC reforçados com fibra de vidro: uso de técnicas de processamento convencionais da indústria brasileira.** 2008. Dissertação (Mestre em Engenharia) Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-28032008-171828/publico/Dissertacao_Murilo_Feltran_2008_revisao.pdf. Acesso em: 20 set. 2017.

FERREIRA, A. S. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras longas de Curauá.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2009. Acesso em: 20 set. 2017.

GEORGE, J.; SREEKALA, M. S.; THOMAS, S. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. **Polymer Engineering & Science**, v. 41, n. 9, p. 1471-1485, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pen.10846>.

GOMES, A.; MATSUO, T. G. K. Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites. **Composite Part A**, v. 38, n. 8, p. 1811-1820, ago. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.04.010>

GONÇALVES, A.; ALMEIDA, S. F. M.; LEVY NETO, F. Comportamento de Cilindros de Carbono/Epoxi submetidos a Cargas Compressivas Axiais. **Polimeros**, v.11, n. 2, São Carlos-SP. abr/jun. 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282001000200012>.

GUERREIRO. **Amazonas importa de Bangladesh 80% da fibra de juta.** 2015. Disponível em: <https://amazonianarede.com.br/amazonas-importa-de-bangladesh-80-da-fibra-de-juta/>. Acesso em: 20 mar. 2017.

GUIMARAES, G. P. **Uma formulação de elementos finitos axissimétricos para análise de tubos laminados em materiais compósitos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006. Acesso em: 20 set. 2017.

HERAKOVICH, C. T. **Mechanics of fibrous composites.** ed. [S.I.]: WILEY, 480 p. ISBN: 978-0-471-10636-4. 1997.

IGTPAN. Mercado de fibras de carbono. **Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila**, 2016. Disponível em: <<http://www.igtpan.com/mercado-carbono.asp>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

JAWAID, M.; KHALIL, H. P. S. A. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, n. 1, p. 1-18. ago. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014486171100316X>. Acesso em: 16 set. 2017.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v. 71, n. 3 p. 343–364, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861707002974>. Acesso em: out. 2017.

JOSE, N. M.; PRADO, L. A. S. D. A. Hybrid organic-inorganic materials: preparation an some applications. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 281-288, São Paulo, mar/abr 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422005000200020>>. Acesso em: 08 out. 2017.

KABIR, M M; WANG, HAO; ARAVINTHAN, THIRU; CARDONA, FRANCISCO; LAU, K T. Effects of natural fibre surface on composite properties: A review. **eddbE2011 Proceedings**, p 94-99, 2011. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/11046989.pdf>>.

KALIA, S.; KAITH, B. S.; KAUR, I. Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review. **Polymer Engineering & Science**, v. 49, n. 7, p. 1253-1272. mar. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/pen.21328>>. Acesso: 16 nov. 2019.

KAW, A. K.. **Mechanics of composite materials**. [S.l.]: CRC Press Taylkor & Francis Group, v. 29, 2006. ISBN 0-8493-1343-0.

LEÃO, M. A. **Fibras de Licuri: um reforço alternativo de compósitos poliméricos**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Acesso em: 20 set. 2017.

LEÃO, M. A. **Compósitos poliméricos a base de fibras de Licuri: efeitos de hibridização e do envelhecimento ambiental acelerado**. 2013. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12822>. Acesso em: 20 set. 2017.

LEAO, M. A.; TINO, S.; AQUINO, E. Accelerated environmental aging effects in structural integrity of licuri fiber reinforced plastics. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 34 n. 5, p.351-363, 2015. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0731684415571433>. Acesso em: 20 nov. 2017.

LION FILHO, C. A. P. D. Q. **Desenvolvimento e caracterização de compósito a partir da borra de piaçava para construção da parábola de um fogão solar a concentração**. 2013. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Acesso em: 20 set. 2017.

MANUTENÇÃO_E_SUPRIMENTOS. **BRANIVA**, 2017. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

MARQUES, J. S. **Uso de pó da palha de carnaúba em compósitos de quitosana**. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/17655>. Acesso em: 20 set. 2017.

MAY-PAT, A.; VALADEZ-GONZAILEZ, A.; HERRERAFRANCO, P. J. Effect of fiber surface treatments on the essential work of fracture of HDPE-continuous henequen fiber-reinforced composites. **Polymer testing**, v. 32, n. 6, p. 1114-1122 set. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941813001256>. Acesso em: 12 set. 2017.

MEYERS, M.; CHAWLA, K. **Mechanical behavior of materials**. New York: Cambridge University Press, 2009.

MIRANDA, C S; FIUZA, R P; GUIMARAES, D H; CARVALHO, G G P; CARVALHO, R F; JOSÉ, N M. Tratamento químico do resíduo de piaçava para aplicação em compósitos polimericos, CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 19., 2010, Campos do Jordão. **Anais [...]**. Campos do Jordão: UFSCAR, 2010.

MIRANDA, CLEIDIENE S.; FIUZA, RAIGENIS P.; CARVALHO, RICARDO F; JOSÉ, NADIA M. Efeito dos tratamentos superficiais nas propriedades do bagaço da fibra de piaçava *Attalea funifera* Martins. **Química Nova**, v. 38, n. 2, p. 161-165, Salvador-BA, nov. 2014. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/v38n2a01.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2017.

MOHAMMED, LAYTH; ANSARI, M N M; PUA, GRACE; JAWAID, MOHAMMAD; ISLAM, M SIAFUL. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. **International Journal of Polymer Science**, article ID 243947, 15p. ago. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/243947>. Acesso em: 12. set. 2017.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P. Performance of curaua fibers in pullout tests. **Journal of Materials Science**, v. 43, n. 2, p. 489-493. jul. 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-007-1874-5>. Acesso em: 14 ago. 2017.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D.; CARVALHO, E. A. de.; D'ALMEIDA, J. R. M. Comportamento mecânico e características estruturais de

compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de Curauá. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, p. 197 – 203, Rio de Janeiro-RJ, jul./set. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762006000300005. Acesso em: 15 set. 2017.

MOURA, M. F. S. F. D.; MORAIS, A. B. D.; MAGALHÃES, A. G. D. **Materiais compósitos**: materiais, fabrico e comportamento mecânico. Porto: Publindustria, edições técnicas, 2005. ISBN 978-9728953003.

NASCIMENTO, D. C. D. O. **Análise das propriedades de compósitos de fibras de piaçava e matriz de resina epoxi**. 2009. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte do Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2009. Disponível em: <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-Completa.pdf>. Acesso em: 20 set. 2017.

NASCIMENTO, DENISE CRISTINA O; FERREIRA, AILTON S; MONTEIRO, SERGIO N; AQUINO, REGINA COELI M P; KESTUR, SATYANARAYANA G. Studies on the characterization of piassava fibers and their epoxy composites, **Composites Part A**, v. 43, n. 3, p. 353-362, mar. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.004>. Acesso em: 15 jun. 2017.

NOVAPOL. **Novapol**, 15 junho 2017. Disponível em: <http://www.novapol.com.br/resinas-novapol/>. Acesso em: 15 jun. 2017.

OLIVEIRA FILHO, G. C.; MIRTANIA ANTUNES LEAO, O. O. D. A. F. E. O. Data generated by the hybridization of mechanical properties of composite reinforced by piassava fiber fabric. **DATA IN BRIEF**, v. 21, p. 2330-2338, dez. 2018.. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235234091831477X>. Acesso em: 21 ago. 2017.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia**. Curitiba: Hemus Livraria e Distribuidora, 1997.

PAOLI, M. A. D. **Degradação e estabilização de polímeros**. Chemkeys. 2008. Disponível em: <http://www.chemkeys.com/blog/wp-content/uploads/2008/09/polimeros.pdf>. Acesso em: 26 set. 2017.

PAULA, P. G. D. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte do Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2011. Disponível em: <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/DISSERTA%C3%87%C3%83O-IMPRIMIR.pdf>. Acesso em: 20 set. 2017.

PEREIRA, G. D. S. **CURSO TÊXTIL EM MALHARIA E CONFECÇÃO** [2010]. Disponível em: https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/7/7d/Apostila_tecnologia.pdf. Acesso em: 23 ago. 2017.

PEREIRA, PAULO HENRIQUE F.; FREITAS, ROSA MORSYLEIDE DE; CIOFFI, MARIA ODILA HILARIO; BENINI, KELLY CRISTINA COELHO DE CARVALHO; MILANESE, ANDRESSA CECILIA; VOORWALD, HERMAN JACOBUS CORNELIS; MULINARI, DANIELA REGINA. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. **Polímeros**, v. 25, n. 1, p. 09-22, São Carlos, Janeiro/Fevereiro 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v25n1/0104-1428-po-25-1-9.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

PIRES, EDUARDO N.; MELINI, CLAUDIA; AL-QURESHI, HAZIM ALI; SALMORIA, GEAN V.; BARRA, GUILHERME M. O. Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Juta no Comportamento Mecânico de Compósitos de Matriz Epóxi. **Polímeros**, v. 22, n. 04, p. 339-344, ago. 2012. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/po/v22n4/aop_0974.pdf. Acesso em: 26 out. 2017.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. Mechanical property evaluation of sisal jute glass fiber reinforced polyester composites. **Composites Part B: engineering**, v. 48, p. 01-09, mai. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812007822>. Acesso em 12 fev. 2017.

RAMOS, J. C. **Polímeros quirias: polipirris e politiofenos modificados com R-(-) ou S-(+)-N-(3,5-Dinitrobenzoil)- α -fenilglicina**. 2007. 96 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. Disponível em: <http://policom.ufsc.br/files/2014/07/tese.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2017.

RECORD, R. **Culturamix.com** [2015]. Disponível em: <http://tecnologia.culturamix.com/tecnologias/o-que-e-kevlar>. Acesso em: 21 mar. 2019.

ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras**. [2010]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod_resource/content/1/APOSTILA_METALOGRAFIA.pdf. Acesso em: 05 fev. 2016.

SALEMO, G. Análise Numérica de Delaminação em Materiais Compósitos Carbono-Epoxi. **Tecnologia Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 153-161, abr/jun. 2013. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/tmm.2013.021>. Acesso em: 16 jul. 2017.

SANJAY, M R; MADHU, P; JAWAID, MOHAMMAD; SENTHAMARAIKANNAN, P; SENTHIL, S; PRADEEP, S. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: a comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, n. 20, p. 566-581, jan. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617323946>. Acesso em: 22 out. 2018.

SANTOS, P. S. P. D. **Resistência ao impacto de compósitos híbridos**. 2010. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2010. Disponível em: <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/3812/1/Resist%C3%Aancia%20ao%20Im>

pacto%20de%20Comp%C3%B3sitos%20H%C3%ADbridos.pdf. Acesso em: 22 out. 2018.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARAES, J. L. Studies on lig-nocellulosic fibers of brazil. part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites part A**, v. 38, n. 7, p. 1694-1709, jul. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X07000279>. Acesso em: 14 dez. 2018.

SCHUCHARDT, U; BIANCHI, ML; GONCALVES, AR; CURVELO, AAS; BISCOLLA, FC; PERES, LO. Piassava fibers. (*Attalea funifera*).1. Chemical analysis, extraction and reactivity of its lignin. **Cellulose Chemistry and Technology**. Editura Academiei Romane, v. 29, n. 6, n. 705, n. 712, 1995. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/59832>, 1995. Acesso em: 20 nov. 2017.

SHACKERLFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Pearson Education, 2008.

SHIINO, MARCOS Y; CIOFFI, MARIA O H; VOORWALD, HERMAN C J; REZENDE, MIRABEL C. Análise fractográfica de fratura em fadiga do compósitos NC2/RTM6. **CBPOL**. 2009. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/913.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2019.

SIDRA. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289#resultado>. **IBGE**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289#resultado>. Acesso em: 25 nov. 2017.

SILVA, C. D.; FREIRE JUNIOR, R. C. S.; AQUINO, E. M. F. Análise de mecanismo de dano em compósitos híbridos, tipo sanduiche utilizando fibras naturais. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 16., 2004, Porto Alegre. **Anais [...]**. UFSC: Porto Alegre, 2004. Disponível em: <http://docplayer.com.br/11783095-Analise-de-mecanismo-de-dano-em-compositos-hibridos-tipo-sanduiche-utilizando-fibras-naturais-resumo.html>. Acesso em: 13 mar. 2018.

SILVA, H. S. P. D. **Desenvolvimento de compósitos polimericos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25437/000752517.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 abr. 2018.

SILVA, L. J. D. **Estudo experimental e numerico das propriedades mecanicas de compósitos polimericos laminados com fibras vegetais**. 2011. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Univerisadade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2011. Disponível em: https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Leandro_da_Silva_1.pdf. 24 abr. 2018. Acesso em: 25 abr. 2018.

SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curaua fiber: A new alternative to polymeric composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 27 ,n 1, p. 103–112, jan. 2008. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/07316844080270010301>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SILVA, R; AQUINO, E; RODRIGUES, L; BARROS, A. Curaua/glass hybrid composite: the effects of water aging on the mechanical properties. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 28 , n. 15 , p. 1857-1868, ago. 2009. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0731684408090373>. Acesso em: 20 mar. 2018.

Oliveira, Erisan. **A chegada do sisal na Brasil**. Santa Luz, Conceição do coité. 2015. Disponível em: <http://erisanoliveiranoticias.blogspot.com/2016/11/conheca-historia-como-e-produzido-e.html>. Acesso em: 20 mar. 2018.

ESTT, 2., 2016. **Intituto Politecnico de Tomar**, Portugal, 2016. Disponível em: http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932Compósitos_MC1.pdf. Acesso em: 20 out. 2016.

AUTOENTUSIASTASCLASSIC. **Autoentusiastas Classic**, noticias de novembro 2013. Disponível em: <http://www.autoentusiastasclassic.com.br/2013/11/mclaren-pioneira-na-fibra-de-carbono.htm>. Acesso em: 15 novembro 2017.

TECMUNDO. **Fibra de carbono: como é feito e como funciona este material incrível**, março 2015. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/quimica/76017-fibra-carbono-feito-funciona-material-incrivel.htm>. Acesso em: 15 novembro 2017.

SURESH, S. **Fatigue of Material**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003.

TABATABAI, H.; JANBAZ, M.; NABIZADEH, A. Mechanical and thermo-gravimetric properties of unsaturated polyester resin blended with FGD gypsum. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 438-445, fev. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817324480>. Acesso em: 28 nov. 2018.

THWE, M. M.; LIAO, K. Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 3-4, p. 375-387, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353802002257>. Acesso em: 26 nov. 2018.

TINÔ, S. R. L. **Descontinuidade na seção transversal em laminados compósitos poliméricos**: efeitos e propriedades. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15606>. Acesso em: 20 set. 2017.

TROMBETA, F. **Uso de fibras aramidadas para melhoria de propriedades de compostos de borrachas nitrílicas**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Disponível em:

<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/79815/000899943.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 set. 2017.

VALADEZ-GONZALEZ, A; CERVANTES-UC, J M; OLAYO, R; HERRERA-FRANCO, P J. Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. **Composites Part B: engineering**, v.30, n. 03 , p. 309-320, abr. 1999. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836898000547>. Acesso em: 18 set. 2018.

YANG, B; KOZEY, V; ADANUR, S; KUMAR, S. Bending, compression, and shear behavior of woven glass fiber–epoxy composites. **Composites Part B: engineering**, v. 31 , n. 08 , p. 715-721, 2000. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836899000529>. Acesso em: 18 set. 2018.

YANG, H. H. **Kevlar Aramid Fiber**. New York: Wiley-Blackwell, 1993.