



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO BACHAREL EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GLÓRIA MARIA LEITE CARLOS

**ESTUDO DA DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA EM COMPÓSITO
POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRA DE JUTA.**

CARAÚBAS

2018

GLÓRIA MARIA LEITE CARLOS

**ESTUDO DA DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA EM COMPÓSITO
POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRA DE JUTA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Claudia de Melo Caldas Batista.

Coorientador: Prof. Dr. Raphael Siqueira Fontes.

CARAÚBAS

2018

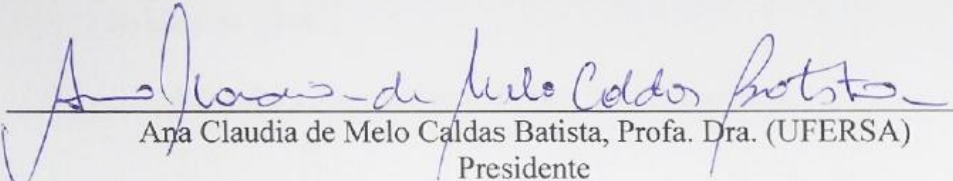
GLÓRIA MARIA LEITE CARLOS

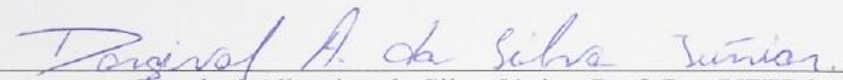
**ESTUDO DA DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA EM COMPÓSITO
POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRA DE JUTA.**

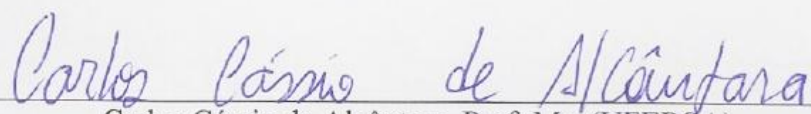
Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Campus Caraúbas para a obtenção
do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 11/04/2018.

BANCA EXAMINADORA


Ana Claudia de Melo Caldas Batista, Profa. Dra. (UFERSA)
Presidente


Dorgival Albertino da Silva Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador


Carlos Cássio de Alcântara, Prof. Ms. (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico este trabalho aos meus pais por acreditarem em mim mesmo quando eu pensei não ser capaz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, todos os dias, pelo despertar e permitir, em todas as possíveis interpretações.

À minha orientadora Prof. Dra. Ana Claudia de Melo Caldas Batista pela paciência, generosidade, pelos “puxões de orelha”, sobretudo, pela determinação, competência e capacidade de ser e entender, com maestria, papel do orientador. E, agradeço também ao Prof. Dr. Raphael Siqueira Fontes, coorientador, pela contribuição de grande valia para a realização desse trabalho.

Agradeço aos familiares e amigos, todos vocês têm grande valor para mim e para essa conquista.

Agradeço aos meus pais, Evilásio e Adailza pelo apoio, suporte, amor e paciência, sempre se esforçando para que eu pudesse ter boa educação e me tornasse uma pessoa melhor. E, pelos “nãos” que muitas vezes não entendi, a princípio, mas que foram fundamentais para o que sou hoje.

Obstáculos não podem te parar. Se você topar com uma parede, não vire e desista. Descubra como escalá-la, passe por ela, trabalhe nisso.

Michael Jordan

RESUMO

Os compósitos são materiais extremamente importantes pela capacidade de atribuir características que um material convencional, de maneira isolada, não seria capaz de fornecer. Tendo a possibilidade de ajustar propriedades, além de, estarem associados às novas exigências tecnológicas. O presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência causada pela presença de descontinuidade geométrica em compósitos poliméricos reforçados com fibras de juta, avaliando as propriedades mecânicas relacionadas à resistência última e ao módulo de elasticidade em um laminado de matriz polimérica, reforçado com tecidos bidirecionais de fibras de Juta (4 camadas), quando submetidos à tração uniaxial, nas condições: original (sem a descontinuidade geométrica) e com descontinuidades geométricas (furo central de 6 mm e 9 mm), podendo assim, determinar de que maneira a concentração de tensão no compósito polimérico reforçado com fibra de juta interfere nas propriedades mecânicas do material decorrente das descontinuidades. Os procedimentos metodológicos realizados neste trabalho atendem a normas relacionadas aos ensaios de tração uniaxial sem descontinuidade geométrica, norma (ASTM D3039), ensaios de tração uniaxial com descontinuidade geométrica, norma (ASTM D5766/D5766M), e ensaio de densidade, norma (ASTM D792). Como conclusões, tem-se que o laminado apresentou um comportamento de material frágil até a ruptura frente ao carregamento de tração uniaxial em todas as condições submetidas. A presença da descontinuidade (furo central), para as dimensões analisadas, alterou a resistência última à tração caracterizando perdas em ambas as condições com furo estudadas. Quanto ao comportamento da fratura dos corpos de prova, todos apresentaram fratura final bem localizada com característica LGM normatizada.

Palavras-chave: Compósitos polimérico. Fibra de Juta. Propriedades mecânicas. Descontinuidades geométricas.

ABSTRACT

Composites are extremely important materials because of the ability to assign characteristics that a conventional material, in an isolated way, would not be able to provide. With the possibility of adjusting properties, besides, they are associated to the new technological requirements. The present work shows a study about the influence caused by the presence of geometric discontinuity in polymer composites reinforced with jute fibers, evaluating the mechanical properties related to the ultimate strength and modulus of elasticity in a polymer matrix laminate reinforced with bidirectional jute fibers (4 layers), when subjected to uniaxial tensile, under the conditions: original (without the geometric discontinuity) and with geometric discontinuities (central hole of 6 mm and 9 mm), being able to determine how the stress concentration in the jute fiber reinforced with polymer composite interferes in the mechanical properties of the material resulting from the discontinuities. The methodological procedures performed in this work are in accordance with the standards related to uniaxial tensile tests (ASTM D3039), uniaxial tensile tests with geometric discontinuity (ASTM D5766 / D5766M) and density test (ASTM D792). In conclusion, we have presented the laminate that a fragile material behavior to rupture against the uniaxial tension test in all subjected conditions. Regarding the behavior of the fracture of the specimens, all had a final fracture characterized as LGM, according to the standards (ASTM D3039 and ASTM D5766/D5766M).

Keywords: Polymer composites. Jute fiber. Mechanical properties. Geometric discontinuities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de uma fibra vegetal.	17
Figura 2: Plantação de juta.	20
Figura 3: Extração da fibra de juta.	20
Figura 4: Fibras de juta prontas para secagem.	21
Figura 5: Processo de produção de fibras de juta.	22
Figura 6: Processo de laminação manual - <i>Hand lay up</i>	28
Figura 7: Esquema de laminação pistola - <i>spray up</i>	28
Figura 8: Processo de fabricação do tipo <i>Filament Winding</i>	29
Figura 9: Processo de moldagem por compressão.	29
Figura 10: Modos de falha dos compósitos submetidos à tração.	30
Figura 11: Modo de falhas aceitáveis para ensaios de tração uniaxial com furo central.	31
Figura 12: Manta de fibra de juta.	32
Figura 13: Dimensões dos CP's para ensaio de tração uniaxial sem furo (JSF).	33
Figura 14: Dimensões dos CP's para o ensaio de tração uniaxial com furo: a) JF6 e b) JF9...34	
Figura 15: Máquina utilizada para a realização do ensaio de tração uniaxial.	36
Figura 16: Ensaio de tração – gráfico: Tensão x Deformação – JSF.	39
Figura 17: Fratura macroscópica – JSF.	40
Figura 18: Ensaio de tração – gráfico tensão x deformação – JF6.	41
Figura 19: Fratura macroscópica – JF6.	42
Figura 20: Ensaio de tração – gráfico tensão x deformação – JF9.	43
Figura 21: Fratura macroscópica – JF9.	44
Figura 22: Ensaio de tração – gráfico tensão x deformação – Influência da relação w/D45	
Figura 23: Influência w/D na Resistência à tração.	46
Figura 24: Influência w/D no Módulo de elasticidade.	46
Figura 25: Influência w/D na deformação à ruptura.	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da utilização de fibras naturais em compósitos ..	16
Quadro 2 – Classificação das fibras naturais.....	18
Quadro 3 – Principais processos de fabricação para matriz termofixa.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos compósitos segundo a natureza dos constituintes.....	14
Tabela 2: Classificação de microcompósitos segundo forma, tamanho e distribuição.	15
Tabela 3: Valores de densidade e propriedades mecânicas das fibras.	19
Tabela 4: Composição da fibra de Juta.....	22
Tabela 5: Propriedades das fibras de Juta.....	22
Tabela 6: Código das características do modo da falha.	30
Tabela 7: Definição dos códigos de fraturas aceitáveis para o ensaio tração uniaxial com furo.	31
Tabela 8: Densidades volumétricas do laminado compósito proposto.....	38
Tabela 9: Propriedades mecânicas dos corpos de prova - JSF.	40
Tabela 10: Propriedades mecânicas dos corpos de prova – JF6.....	41
Tabela 11: Propriedades mecânicas dos corpos de prova - JF9.	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Matriz.....	15
2.2 Reforço	16
2.3 Fibras Naturais	17
2.4 Fibra de Juta	19
2.5 Pesquisa e validação da utilização da fibra de juta em compósitos	23
2.6 Efeitos das descontinuidades geométricas em compósitos poliméricos	25
2.6.1 Processo de fabricação dos compósitos	27
2.7 Caracterização da fratura macroscópica em compósitos poliméricos.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais utilizados na confecção de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra de juta	32
3.2 Confecção dos corpos de prova.....	33
3.3 Preparação dos corpos de prova.....	34
3.4 Ensaios Realizados.....	35
3.4.1 Ensaio de Densidade	35
3.4.2 Ensaio de Tração	35
3.4.3 Influência da variação w/D em laminados	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1 Ensaio de Densidade	38
4.2 Ensaio de tração uniaxial	38

4.2.1 Análise nos corpos de prova sem descontinuidade.....	39
4.2.2 Análise nos corpos de prova com descontinuidade de 6 mm	40
4.2.3 Análise nos corpos de prova com descontinuidade de 9 mm	43
4.3 Influência da variação w/D no laminado proposto	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
6 REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos são aqueles oriundos da combinação de dois ou mais materiais insolúveis entre si, que tem por característica a presença de uma fase contínua, constituída pela matriz, e uma fase descontínua, constituída pelo reforço (CALLISTER e RETHWISCH, 2013). Logo, a possibilidade de combinar materiais distintos para ajustar propriedades, favorece a utilização dos compósitos, o que está associado às novas exigências tecnológicas, ou seja, materiais mais eficientes e capazes de fornecer alto desempenho e baixo custo, substituindo os materiais ditos convencionais (SOUZA, 2017; FONTES, 2013).

Os compósitos podem ser reforçados por fibras ou por partículas embebidas na matriz, mantendo suas características individuais. Dentre os reforçados por fibras, destaca-se os reforçados com fibras naturais, principalmente as de origem vegetal, que têm sido cada vez mais utilizadas na concepção de novos materiais compósitos, pois as fibras atendem em parte a demanda por materiais oriundos de fontes renováveis e não prejudiciais ao meio ambiente.

As fibras nativas brasileiras são o sisal, coco, juta, rami, curauá, fibra de bagaço de cana-de-açúcar e soja. A fibra de juta terá atenção especial nesse estudo, posto que ela é parte constituinte no compósito aqui analisado. A fibra de juta é uma das fibras naturais mais usadas como reforço de matrizes poliméricas. Essa utilização está associada ao seu baixo custo e ao fato de apresentar adequadas propriedades mecânicas (PIRES, 2012).

Logo, o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis no Brasil, aliado às alternativas viáveis economicamente para o reforço de matrizes poliméricas, tornam as fibras naturais uma alternativa bastante atraente à engenharia. Foi observado um grande interesse na utilização de fibras de Juta como reforço em compósitos de matriz polimérica, alguns exemplos de trabalhos são: Marinelli *et al.* (2008); Lima (2009); Cavalcanti *et al.* (2010); Mohanty (2011); Mehmet Sarikanat (2012); Silva (2014).

Outro fator é a influência das descontinuidades geométricas podendo representar sérios problemas com relação à distribuição das tensões internas ao elemento estrutural e ter, como consequência, a diminuição da resistência do material (TINÔ, 2010).

O presente trabalho tem como objetivo estudar a influência da presença de descontinuidade geométrica na resposta mecânica de um laminado compósito constituído por matriz polimérica e fibras naturais de juta. Essa temática se justifica uma vez que diversas aplicações de elementos estruturais podem apresentar bruscas variações em sua seção transversal, tais como, furo, ranhuras e entalhes dos mais diversos tipos.

Portanto, para a realização do comparativo foram preparadas amostras do compósito polimérico reforçado com fibra de juta na condição sem furo (condição original) e com a presença da descontinuidade geométrica (furo normativo de 6 mm e furo de 9 mm). As normas utilizadas foram a ASTM D3039 (2014) e ASTM D5766/D5766M (2011), respectivamente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por finalidade realizar um estudo da influência que a presença da descontinuidade geométrica ocasiona em um compósito polimérico reforçado com fibra natural (quatro camadas de fibra de juta), no que diz respeito às propriedades mecânicas à tração (resistência à tração, módulo de elasticidades e deformação à ruptura).

1.1.2 Objetivos específicos

- Proporcionar conhecimento da normatização e da realização dos ensaios de densidade (caracterização de propriedade física) e de tração uniaxial (caracterização de propriedades mecânicas) em compósitos poliméricos.
- Avaliação das propriedades mecânicas relacionadas à resistência última à tração, módulo de elasticidade e deformação à ruptura em um laminado de matriz polimérica, reforçado com tecidos de fibras de Juta, quando submetidos ao ensaio de tração uniaxial, nas condições original e com a presença da descontinuidade geométrica;
- Determinar a influência do efeito da descontinuidade geométrica, no que diz respeito a propriedade mecânica residual relacionadas à resistência última à tração no compósito proposto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A norma ASTM D3878-98 trata da terminologia padrão para materiais compósitos e, segundo a mesma, um material compósito é uma substância combinada por dois ou mais materiais que permanecem insolúveis entre si. No entanto, uma vez combinados concedem propriedades aos materiais constituintes que, de maneira isolada eles não teriam.

A constituição de um compósito não é um processo simples, tão pouco um processo que pode ser generalizado. De acordo com Callister e Rethwisch (2013) sua constituição depende de vários fatores, tais como: funcionalidade, combinação dos materiais constituintes, finalidade do composto, entre outros fatores que o constituem e atribuem características particulares a cada compósito. Destaca-se ainda que as propriedades dos compósitos são determinadas em função das propriedades das fases, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (CALLISTER e RETHWISCH, 2013). A seguir serão detalhadas as principais características das fases presentes nos compósitos, que são a matriz e o reforço.

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com sua origem, natureza do material constituinte e de sua matriz, visibilidade natural dos componentes do material, das características de forma dos materiais constituintes do reforço. De acordo com a origem, os compósitos podem ser classificados como naturais e sintéticos. Os compósitos naturais são aqueles encontrados na natureza ou que apresentam constituintes naturais. Os compósitos sintéticos são aqueles projetados para apresentar características desejadas possibilitando alto desempenho do produto final (Hull e Clyne, 1986 *apud* Sousa, 2017). A Tabela 1 apresenta a classificação dos compósitos segundo a natureza do constituinte.

Tabela 1: Classificação dos compósitos segundo a natureza dos constituintes.

NATUREZA DOS MATERIAIS			EXEMPLOS
MATERIAIS COMPÓSITOS	Naturais		Madeiras; Ossos; Músculos;
	Sintéticos	Microcompósitos	Plástico reforçado
		Macrocompósitos	Concreto armado

Fonte: Hull, 1988 *apud* Tinô 2010.

Segundo Hull (1988) *apud* Tinô (2010) os compósitos sintéticos podem se apresentar em macro e microcompósitos. Os microcompósitos estão subdivididos nas categorias apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação de microcompósitos segundo forma, tamanho e distribuição.

FORMA	TAMANHO	DISTRIBUIÇÃO
Fibras imersas em matrizes	Contínua Curta	Alinhada ou aleatória Aleatória
Particulados imersos em matrizes	Indefinido	Aleatória
Estrutura laminar	Indefinido	Ordenada Aleatória
Multicomponentes (híbridos)	Indefinido	Ordenada Aleatória

Fonte: Hull, 1988 *apud* Tinô, 2010.

Normalmente os materiais compósitos podem ser divididos em três tipos: compósitos de fibras, compósitos de partículas e compósitos laminados. No entanto, também podem ser classificados de acordo com o tipo de material que constitui a matriz, podendo ser metálica, cerâmica ou polimérica (FURTADO, 2009).

2.1 Matriz

De acordo com Nobrega (2007), a matriz é o material que tem como função garantir o aspecto externo do compósito e proteger o reforço de ataques químicos e físicos. As matrizes podem ser classificadas de acordo com o material utilizado na sua constituição: matriz polimérica, matriz cerâmica, matriz metálica.

Responsável pelo agrupamento dos demais constituintes, a escolha da matriz depende da aplicação do material compósito. Desse modo, a interface entre esses dois materiais – matriz/reforço – é fundamental para determinar as propriedades do compósito, pois, é através de sua interface que os esforços atuantes na matriz são transmitidos para o reforço (LIMA, 2009).

Dentre as matrizes existentes, destacam-se as matrizes poliméricas que podem ser classificadas em termofixas ou termoplásticas, diferenciando-se pela estrutura molecular com que são constituídas. Os polímeros termoplásticos são, em sua maioria, lineares, e que possuem alguma estrutura ramificada e, quando aquecidos amolecem, podendo até se liquefazer, apresentando o endurecimento a partir do seu resfriamento, permitindo que sejam

recicláveis; já os termofixos não, uma vez expostos a altas temperaturas se desintegram não podendo ser reciclados, isso ocorre devido ao tipo de ligações que apresentam, ligações cruzadas e em rede (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Dentre os compósitos reforçados com matrizes termofixas, as mais utilizadas em trabalhos científicos são as resinas poliéster (CAVALCANTI *et al.*, 2010; MARGEM, 2013; MEHMET SARIKANAT, 2012; SILVA, 2014) e epóxi (MARGEM, 2013; SILVA, 2014).

2.2 Reforço

O reforço é o constituinte cuja função é melhorar algumas propriedades do compósito, tais como: o aumento de sua rigidez, a resistência mecânica e a resistência à fluência da matriz (LIMA, 2009). O comportamento do reforço depende de como o mesmo é empregado e, sobretudo, depende da finalidade da constituição do compósito (LIMA, 2009).

O reforço pode ser encontrado na forma natural ou sintética. O Quadro 1 mostra as principais vantagens e desvantagens da utilização das fibras naturais.

Quadro 1: vantagens e desvantagens da utilização de fibras naturais em compósitos.

MODO	DESCRIÇÃO
VANTAGENS	• Baixo custo se comparadas às fibras artificiais • Utilização completa da Fitomassa • Não fraturam quando processadas • Produzem resíduos de baixa toxicidade na incineração • Não-Abrasivas aos equipamentos de processo • Boas propriedades mecânicas: Peso x Resistência • Baixo consumo de energia • Produtos recicláveis e biodegradáveis • Atendem às pressões ambientais para o uso de recursos naturais renováveis • Contribuem com a criação de empregos rurais
DESVANTAGENS	• Produção depende do clima • Grande variação nas propriedades • Produção sazonal (coleta, armazenamento) • Higroscópicas – absorvem umidade • Biodegradáveis – baixa resistência a fungos e bactérias • Degradação da lignina em aproximadamente 200°C

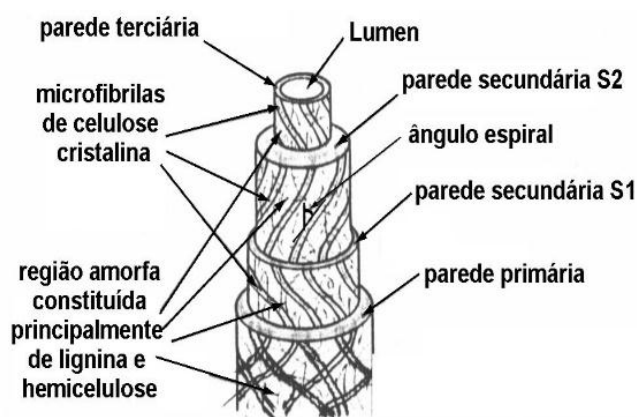
Fonte: Adaptada Texeira (2006) *apud* CAVALCANTI *et al.* (2010).

No que diz respeito as fibras naturais, as mesmas podem ser subdivididas a partir de sua origem: vegetal, animal ou mineral. Por sua vez, o reforço sintético pode ser obtido de origem orgânica ou inorgânica. Destaca-se que dentre as fibras naturais vem sendo bastante utilizada por diversos autores, em especial a fibra de Juta (CAMERINI *et al.*, 2008; CAVALCANTI *et al.*, 2010; MOHANTY, 2011; SILVA, 2014).

2.3 Fibras Naturais

As fibras naturais são compostas por várias camadas, com diferentes características e espessura, colocadas em torno de um núcleo oco, denominado de lúmen (BLEDZKI; GASSAN, 1999 *apud* SILVA *et al.*, 2014). Predominantemente há a presença de lignina, celulose e hemicelulose, além disso, pequenas quantidades de outros constituintes, tais como: sais inorgânicos, corantes naturais, pectinas e substâncias nitrogenadas (MARGEM, 2013). A estrutura de uma fibra vegetal pode ser vista na Figura 1 a seguir.

Figura 1: Estrutura de uma fibra vegetal.



Fonte: Rong *et al.*, 2001 *apud* LIMA, 2009.

Como mencionado anteriormente, os principais componentes estruturais de um vegetal são: Celulose, hemicelulose e lignina.

A celulose é o componente mais abundante da parede celular. É definida como um polímero de glicose, destacando-se por ser um carboidrato insolúvel e resistente a várias reações químicas. É o componente que garante a rigidez do vegetal, pois, apresenta um grande sistema de fibras entrelaçadas (PEREIRA, 2017).

A hemicelulose deriva principalmente da celulose, no entanto, essa classe de polímeros pode apresentar outros monossacarídeos em sua cadeia principal. Embora suas

cadeias sejam complexas, as cadeias principais são predominantes em relação as suas ramificações e, em alguns casos, apresentam certa organização. “A lignina é uma macromolécula formada oriunda de um sistema aromático, muito reticulado de elevado peso molecular, amorfo, composto de unidade fenilpropano” (SILVA, 2014).

As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com o local de extração, mas também, de acordo com sua origem. Segundo a última classificação, as fibras são dispostas em: sementes e frutos; relvas e gramíneas; folha; caule ou talo; madeira (MARGEM, 2013).

Fibras de talo são aquelas localizadas no floema que fica na entrecasca do talo, são exemplos desse tipo de fibra: algodão, rami, piaçava e juta. As fibras de folhas são retiradas das folhas dos vegetais, nesse caso, algumas fibras como as de abacaxi, banana, curauá e sisal. Já as fibras de lenho são extraídas do lenho do vegetal e são exemplos a cana-de-açúcar e bambu. As fibras do coco e açaí, por exemplo, são fibras de superfície formando uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas (SILVA, 2014). O Quadro 2 apresenta a classificação das fibras naturais.

Portanto, de acordo com a classificação e característica, as fibras naturais apresentam contribuições para a formação de compósitos com as mais diversas finalidades.

Quadro 2: Classificação das fibras naturais.

FIBRAS NATURAIS	MADEIRAS	Madeiras macias e duras (diversas espécies)	
	ANIMAIS	Lãs, Seda, Seda de Aranha, Penas, etc.	
	MINERAIS	Amianto, basalto, etc.	
	VEGETAIS	Caule	Algodão, Cânhamo, Juta , Kenaf, Ramí, etc.
		Folhas	Caroá, Sisal, Tucum
		Frutos e sementes	Algodão, Coco

Fonte: Fontes (2013).

A Tabela 3 mostra valores de densidades e algumas propriedades mecânicas de algumas das principais fibras naturais.

Tabela 3: Valores de densidade e propriedades mecânicas das fibras.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Alongamento (%)	Resistencia à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Rami	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Linho	1,5	2,7-3,2	245-1035	27,6
Sisal	1,5	2,0-2,5	5511-635	9,4-22
Fibra de côco	1,2	3,2	175	4,0-6,0
Vidro-E	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Vidro-S	2,5	2,8	4750	86,0
Aramida (comum)	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
Carbono (comum)	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0
Curauá	1,4	4,2	890-4.200	50,4

Fonte: Marinelli *et al.* (2008).

Dada a variedade de fibras naturais existentes no território nacional, pode-se afirmar que o cenário atual de pesquisa em compósitos em que um dos constituintes é uma fibra natural é um campo a ser explorado, uma vez que, as pesquisas nessa área ainda estão sendo desenvolvidas, e inclusive, apresentam determinações a serem consolidadas.

2.4 Fibra de Juta

A fibra de juta é uma das fibras de origem vegetal com menor custo, além de ser amplamente produzida em países como Brasil, Bangladesh, China e Tailândia. Pode-se obter a fibra de juta a partir de plantas denominadas *Corchorus capsularis* e *Corchorus olitorius*, essas plantas são anuais e herbáceas, e exigem um solo fértil e clima quente e úmido (FURTADO, 2009). Na Figura 2 é mostrada uma representação de uma plantação de juta.

Figura 2: Plantação de juta.



Fonte: <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,ERT183007-18283,00.html>

A planta de juta é cultivada em clima úmido e tropical na região norte do país. No que concerne à constituição física, sua planta tem alcance de 3 a 4 metros, seu talo apresenta circunferência de até 20 mm, sua parte útil está localizada entre a casca e o talo interno e sua extração ocorre pelo processo de maceração que ocorre de 8 a 10 dias após a fermentação (SILVA, 2014). Mediante a separação da casca, a fibra é retirada da parte lenhosa do talo sendo possível obter células elementares de juta de comprimento médio de 0,80 mm e diâmetro variando entre 0,01 mm a 0,03 mm (SILVA, 2014). A Figura 3 representa a fibra da juta sendo extraída.

Figura 3: Extração da fibra de juta.



Fonte: <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,ERT146775-18078,00.html>

A extração da fibra de juta requer condições específicas tais como o controle da temperatura para a proliferação de bacilos úteis à maceração que varia de 30 a 35°C. O estado de repouso da água é outro fator importante para a velocidade de maceração, pois a massa líquida nesse estado é facilmente aquecida e não há o arraste dos bacilos causando aumento em sua reprodução (NETO *et al.*, 2007 *apud* SILVA, 2014).

O preparo da fibra de juta pode ser feito de maneira artesanal, como podemos ver na Figura 4 a seguir.

Figura 4: Fibras de juta prontas para secagem.



Fonte: <https://pautasnaweb.wordpress.com/category/internacional/page/3/>

Embora o preparo manual seja predominante a fibra de juta também pode receber tratamento industrializado sendo submetida a um processo de produção com maior tecnologia envolvida, como mostra a Figura 5.

Figura 5: Processo de produção de fibras de juta.

Fonte: <https://pautasnaweb.files.wordpress.com/2012/05/juta3.jpg>

O principal componente presente na juta é a celulose, na forma de linho-celulose, propiciando boa resistência mecânica. A juta reúne características atraentes para a confecção de materiais compósitos, pois, possui baixo custo, elevado módulo de elasticidade e resistência específica, maleabilidade e é abundante na natureza (SILVA, 2014). As Tabelas 4 e 5 relacionam as propriedades características da fibra de juta com sua composição, veja:

Tabela 4: Composição da fibra de Juta.

COMPOSIÇÃO		
Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
72	14	14

Fonte: Adaptada de Matthews (1994).

Tabela 5: Propriedades das fibras de Juta.

PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS				
Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo elástico específico (GPa/(g/cm ³))	Resistência à tração específica (MPa/(g/cm ³))
1,3	55,5	442	43	340

Fonte: Adaptada de Matthews (1994)

Comercialmente, a fibra de juta tem um amplo mercado sendo uma das fibras mais utilizadas na atualidade. O uso diversificado dessa fibra como reforço de material compósito possibilita grande quantidade de pesquisas em diferentes vertentes. Além disso, essa fibra é higroscópica, ou seja, tem capacidade de regular a umidade em até 12°C, evitando ressecamento e fermentação do produto que será embalado, tornando uma matéria prima ideal para sacarias (ALVES *et al.*, 2008 *apud* SILVA, 2014).

A cultura do cultivo e produção da fibra de juta foi introduzida pelo japonês Ryota Oyama e mais tarde tornou-se uma das principais atividades econômicas das comunidades ribeirinhas da região amazônica (ALVES *et al.*, 2008 *apud* SILVA, 2014). Lima (2009) ressalta que sua cultura é de grande importância para a economia na região amazônica, devido sua capacidade de fixação da população no campo e da utilização das áreas de várzea situadas no Rio Amazonas, de forma produtiva.

2.5 Pesquisa e validação da utilização da fibra de juta em compósitos

No âmbito científico e acadêmico, pesquisas experimentais quanto às fibras naturais e suas aplicações na fabricação de compósitos tem se desenvolvido ao longo do tempo, nos dias atuais, estudos diversos buscam caracterizar as diferentes constituições dos compósitos de acordo com sua resposta à determinadas aplicações. Tais como:

O estudo realizado por Fátima e Mohandy (2011) utiliza fibras de juta indianas com a finalidade de analisar propriedades acústicas e de inflamabilidade de produtos biodegradáveis descartáveis empregados para a redução de ruídos em aparelhos domésticos, automotivos e aplicações arquitetônicas. De acordo com os autores, o compósito confeccionado com juta e matriz de látex de borracha natural proporciona melhor transmissão de som do que o de tecido de juta. Os resultados afirmam que a juta de baixa densidade é melhor absorvedor que a de alta densidade. Além disso, o valor do coeficiente de redução de ruído e a classificação da transmissão de som do látex da borracha natural são compatíveis com o valor da fibra de vidro comum.

Outro tema interessante foi o realizado por Camerini *et al.* (2008), os autores abordam o estudo da tenacidade ao impacto de compósitos matriz de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta. Os resultados desse estudo sugerem que um aumento significativo na energia de impacto Charpy ocorre quando a porcentagem de tecido varia de 20% a 30% passando de 138,5 para 272,0 J/m havendo um aumento na tenacidade ao entalhe,

para o autor, isso pode ser explicado devido à quantidade grande de energia despendida ao se dobrar as fibras que não são rompidas durante o ensaio Charpy. Para os valores de 30% a 40% não foi obtido aumento semelhante.

Mehmet Sarikanat (2012) aborda os efeitos do envelhecimento da água nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster insaturado reforçados com tecidos de fibras de juta que foram submetidos a testes de absorção de água. De acordo com os testes é possível afirmar que há uma diminuição de 53% das forças de cisalhamento de tração, flexão e interlaminar desses compósitos a partir de 2736h, tanto para a água destilada quanto para a salgada. Os resultados apontam uma redução da resistência à tração em água salgada e água destilada equivalente a 51,3% e 41,1%, respectivamente. Quanto à força física, os valores obtidos em água salgada e destilada foram 35,8% e 29,2%, respectivamente. Portanto, o autor conclui que para tempos mais longos de imersão as reduções das propriedades mecânicas continuam mesmo quando a absorção da água atinge o equilíbrio e a imersão em água salgada tem efeito prejudicial nas propriedades mecânicas do compósito.

Outro fator importante consiste em avaliar a influência do tratamento químico de fibras vegetais nas propriedades mecânicas e dinâmico-mecânicas em compósitos compostos por matriz de resina epóxi reforçada com fibras de juta. Pires (2012) utiliza fibras modificadas a partir de solução de hidróxido de sódio, sendo caracterizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), espectrometria no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e resistência à tração, onde as análises de MEV e FTIR concluíram que o tratamento alcalino promoveu a remoção parcial da hemicelulose e modificou a morfologia das fibras de juta. De acordo com a pesquisa, é possível afirmar que compósitos com fibras tratadas apresentam propriedades mecânicas e módulo de armazenamento maiores do que as da resina epóxi sem reforço e compósitos com fibras sem tratamento. Além disso, a MEV identificou ainda que compósitos com fibras tratadas possuem menor quantidade de vazios e menor quantidade de *pull-out* – ensaio que mede a resistência do compósito ao arranque de fibra. É uma forma de mensurar e quantificar a aderência fibra/matriz –, sugerindo maior adesão fibra-matriz.

Cavalcanti *et al.* (2010), assim como Mehmet Sarikanat (2012), também desenvolve um estudo relacionado à absorção de umidade em compósitos poliméricos. Nesse sentido, o desenvolvimento de estudos de compósitos com fibras naturais é fundamental, pois, mostra as dificuldades associadas as fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos. A autora afirma que a presença de umidade leva a impregnação e adesão fibra-matriz imperfeitas, gerando grandes tensões internas, porosidade e falha prematura do sistema. A autora trabalha com compósitos poliméricos reforçados com fibra de juta e obteve os seguintes resultados a

partir de modelagem matemática, simulação e experimentação dos mesmos. Os compósitos de poliéster insaturados moldados por compressão e reforçados com tecido de juta e tecido híbrido de juta-vidro têm composições em peso de: a) 26% de juta/74% poliéster insaturado; e b) 26% juta/32% vidro/42% poliéster insaturado (CAVALCANTI *et al.*, 2010). O conhecimento da distribuição de umidade permite verificar áreas mais favoráveis a problemas de laminação devido à fraqueza da interface fibra-matriz e, por conseguinte redução nas propriedades mecânicas (CAVALCANTI *et al.*, 2010).

Estudar de que maneira as principais variáveis do processo de infusão afetam as propriedades do compósito quando são utilizadas fibras naturais como reforço de uma matriz de poliéster insaturado foi o tema da pesquisa de Rodrigues *et al.* (2015). O autor produziu uma pesquisa baseada na utilização de fibras naturais, tais como: Juta, curauá e palha da costa. Expostas na forma de fios alinhados ou tecido em estilo planos submetidas a diferentes níveis de vácuo. Os resultados mostram que o processo de infusão permitiu a confecção de compósitos com até 45% de fração volumétrica de fibra, com porosidade de aproximadamente 2% e excelente estabilidade dimensional. Além disso, verificou-se que a elevação do nível de vácuo altera a condição de compactação dos reforços modificando, de acordo com a estrutura da fibra utilizada, sua porosidade, interface fibra/matriz e por consequência as propriedades do compósito (RODRIGUES *et al.*, 2015).

2.6 Efeitos das descontinuidades geométricas em compósitos poliméricos

Um dos fatores de grande influência na resistência final de um material compósito é a presença de descontinuidades geométricas (ranhuras, entalhes, furos e outras). Do mesmo modo que em materiais convencionais, nos materiais compósitos as descontinuidades ocorrem devido à brusca redução da seção de área transversal de um elemento estrutural que gera uma concentração de tensão no local (SOUZA, 2017; TINÔ, 2010).

Em outras palavras, a descontinuidade é um fenômeno que altera as distribuições das tensões na vizinhança onde está localizada provocando tensões que não são capazes de descrever as equações elementares de tensão, pois, não são próprias do elemento estrutural. Assim, uma descontinuidade pode ser conhecida por concentrador de tensão e as regiões que o mesmo está situado podem ser conhecidas por áreas de concentradores de tensão (FONTES, 2013).

A concentração de tensão ocorre porque há um acúmulo de energia no elemento fazendo com que o fluxo de tensão da região mais próxima da descontinuidade geométrica passe a ter um valor de tensão média muito mais alto em relação às regiões mais afastadas ocasionando, nessa região, a propagação de trincas até a ruptura final do material (FONTES, 2013; SOUZA, 2017; TINÔ, 2010)

Vale ressaltar que a concentração de tensão é um evento localizado e que age imediatamente na região próxima ao furo, pois, as linhas de tensão dispostas na seção longitudinal são aproximadas pela descontinuidade exercida no elemento causando a diminuição das propriedades mecânicas, sobretudo, a resistência mecânica no material.

Souza (2017) afirma que a concentração de tensão influencia na redução do limite de resistência do material essa redução também pode ser chamada de resistência residual (RS - *Residual Strength*), determinada pela equação 1, onde σ_{CD} está associada a resistência última do material com descontinuidade e σ_{SD} está associada à resistência última do material sem descontinuidade.

$$RS = \frac{\sigma_{CD}}{\sigma_{SD}} \quad (\text{Eq. 1})$$

O fator de RS determina o grau de influência da descontinuidade geométrica na resistência do compósito, ou seja, através desse fator pode-se quantificar o grau de novidade da descontinuidade para o elemento estrutural (TINÔ, 2010). Desse modo, quanto mais próximo esse valor estiver de 1 (um) maior será a conservação de resistência apresentada pelo corpo de prova. Vale salientar que a σ_{CD} é a tensão média calculada na área da seção transversal maior do material, onde não há presença de descontinuidade (TINÔ, 2010).

Existem maneiras diferentes de estudar as descontinuidades nos materiais. Diferentemente de materiais metálicos que são homogêneos e isotrópicos, a concentração de tensão em materiais compósitos não pode ser mensurada de maneira simples através de tabelas e/ou gráficos. Em compósitos, a análise experimental é a mais utilizável e também a mais viável. (FONTES, 2013; SOUZA, 2017; TINÔ, 2010).

Aliando o efeito da descontinuidade geométrica com compósitos utilizando fibra de Juta, pode-se destacar o trabalho de Fontes (2013) que estuda o comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual em compósito polimérico híbrido.

2.6.1 Processo de fabricação dos compósitos

Nos dias atuais a fabricação de compósitos conta com considerável quantidade de processos que variam de acordo com a necessidade do projeto e a finalidade do material compósito a ser fabricado. No geral os processos se dão em duas frentes: Molde aberto e molde fechado. Na confecção do compósito estudado foram utilizados a matriz polimérica resina de poliéster insaturada (matriz termofixa) e o reforço na forma de tecido bidirecional de fibra de juta. No Quadro 3 é possível observar os principais processos de fabricação para matrizes termofixas.

Quadro 3: Principais processos de fabricação para matriz termofixa.

TIPO DE MOLDE	
ABERTO	FECHADO
• Laminação manual/<i>Hand lay up</i>; • Laminação a pistola (<i>Spray up</i>); • <i>Filament winding</i>	• Moldagem por compressão; • Injeção; • Pultrusão

Dentre os processos de modo aberto mais utilizados estão a laminação manual (*hand lay up*); a laminação a pistola (*spray up*) e *filament winding*.

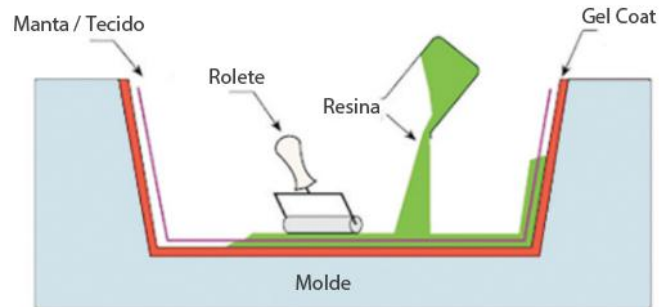
O processo de laminação manual ou *Hand lay up*, foi o processo de fabricação utilizado nesse trabalho. O mesmo pode ser feito manualmente de maneira mais simples do que a maioria dos processos existentes de fabricação de compósitos. É um procedimento bastante antigo empregado pela indústria eliminando a necessidade de investir em um maquinário específico (NETO, 2007).

Este processo característico de fabricação de materiais compósitos à base de resina termofixa, consiste num processo com tipo de molde aberto onde ocorrem quatro etapas bem definidas, sendo elas: adaptação do material compósito ao molde; processo de impregnação; cura do material compósito; desmolde da peça final.

Para a laminação manual é necessário inicialmente aplicação um agente desmoldante, posteriormente, aplicação da resina seguida de uma camada de reforço – a repetição dessa etapa ocorre até que se obtenha a espessura desejada – com o auxílio de um rolete ou pincel para melhor fixação do material e minimização de defeitos de fabricação

como bolhas de ar, após essa etapa há a cura da resina, a realização do desmolde e, por fim, o acabamento final da peça. Veja o esquema de laminação manual representado na Figura 6.

Figura 6: Processo de laminação manual - *Hand lay up*.

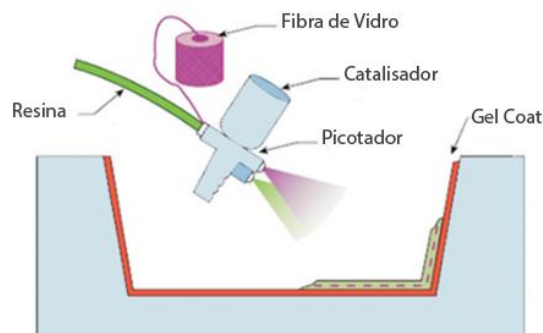


Fonte: Adaptado de <http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=1&cat=Processos>

Esse processo apresenta algumas desvantagens, pois, requer maior quantidade de mão de obra para pouca produção, além disso, há uma maior possibilidade de presença de defeitos de fabricação, pois a qualidade da peça depende da habilidade do laminador e apenas um dos lados da peça apresentará um bom acabamento.

O processo de laminação a pistola (*spray up*) é um procedimento que realiza a moldagem através da utilização de uma pistola. Nesse processo, a aplicação dos componentes do compósito – resina e fibra – ocorre de maneira simultânea. Diferentemente do processo anterior, nesse processo o trabalho manual é reduzido, pois, a pistola realiza o trabalho de mistura parcial dos componentes, no entanto, ainda é necessário o trabalho manual nesse procedimento mediante o roletamento para um melhor acabamento da peça (VOGEL, 2002). Esta técnica pode ser representada na Figura 7.

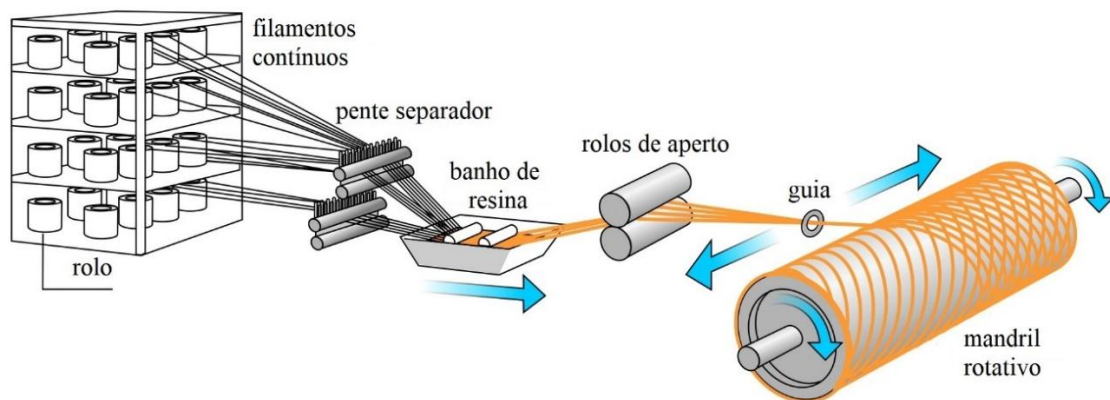
Figura 7: Esquema de laminação pistola - *spray up*.



Fonte: Adaptado de <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/spray-lay-up/>

O processo de *filament winding* é usado principalmente para a confecção de peças cilíndricas e consiste no enrolamento de um filamento que também pode ser denominado “roving” de fios contínuos num mandril rotativo após ser realizada a impregnação do fio com a resina, nesse local há um dispositivo que controla a absorção da resina durante o banho. Veja na Figura 8:

Figura 8: Processo de fabricação do tipo *Filament Winding*.

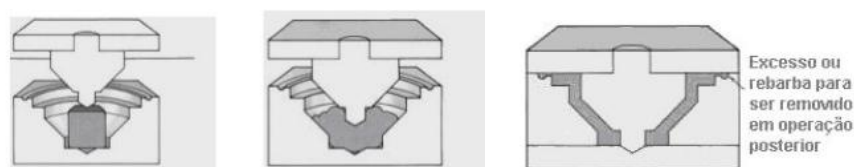


Fonte: Adaptado de <http://www.nuplex.com/composites/processes/filament-winding>

Dentre os processos de fabricação de molde fechado a moldagem por compressão é um dos processos mais utilizados.

A Figura 9 representa um processo simples de moldagem por compressão. A **Moldagem por Compressão** pode ser descrita a partir de duas condições: **moldagem a frio** e **moldagem a quente**. O processo a frio consiste na compressão de reforços em fibra de vidro onde, em seguida, será depositada uma camada de resina líquida. Nesse procedimento há pouca precisão devido ao resfriamento da resina. Para o processo a quente, os moldes devem ser pré-aquecidos para temperatura variando entre 80°C a 170°C e pressões que variam de 0,5 a 15 MPa. Em relação as propriedades mecânicas e ciclo de produção das peças, esse processo tem melhores resultados do que o anterior.

Figura 9: Processo de moldagem por compressão.



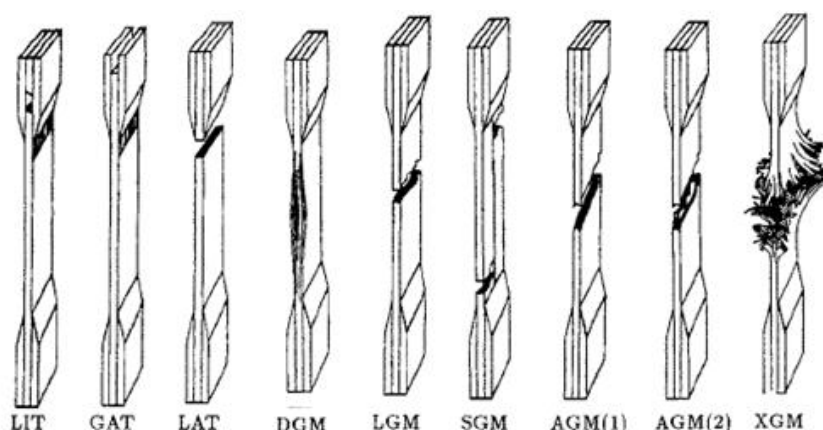
Fonte: Adaptado de <https://pt.slideshare.net/ltormento/rebarbao-de-borrachas-o-que-e-porque-aplicada-63788351>

2.7 Caracterização da fratura macroscópica em compósitos poliméricos

A análise macroscópica em um compósito consiste na caracterização da fratura/dano ao longo do comprimento do corpo de prova. Em ensaios de tração a fratura pode ser dos tipos apresentados nas Figuras 10 e 11, quando não há a presença da descontinuidade e quando a descontinuidade está presente no material tracionado, respectivamente. As Tabelas 6 e 7 descrevem os tipos de fraturas que podem ocorrer durante os ensaios.

Para os corpos de provas sem descontinuidade a ocorrência dos modos de falhas do tipo LIT e GAT torna não válido o ensaio. Para o corpo de prova com descontinuidade, o ensaio somente será válido se a fratura ocorrer na seção onde a descontinuidade está localizada.

Figura 10: Modos de falha dos compósitos submetidos à tração.



Fonte: Adaptado de ASTM D3039 (2013).

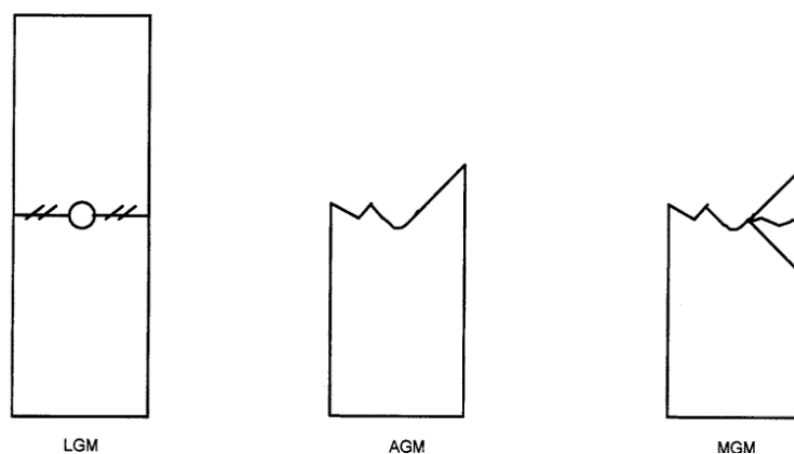
Tabela 6: Código das características do modo da falha.

CÓDIGO	DEFINIÇÃO DO CÓDIGO (normativo)	DEFINIÇÃO DO CÓDIGO
LIT	<i>Lateral – inside – top</i>	Lateral dentro da lingueta da garra superior.
GAT	<i>Grip/Tab - at grip/tab - top</i>	Desaderência da lingueta na garra superior.
LAT	<i>Lateral - at grip – top</i>	Lateral na base da lingueta da garra superior
DGM	<i>Edge delamination – gage – middle</i>	Delaminação na borda do corpo de prova e no meio do galgo
LGM	<i>Lateral - gage – middle</i>	Lateral e no meio do galgo
SGM	<i>Longitudinal splitting - gage – middle</i>	No meio do galgo com fendas longitudinais
AGM	<i>Angled - gage – middle</i>	Angular e no meio do galgo

XGM	<i>Explosive - gage – middle</i>	Explosiva e no meio do galgo
------------	----------------------------------	------------------------------

Fonte: Adaptado de ASTM D3039 (2014).

Figura 11: Modo de falhas aceitáveis para ensaios de tração uniaxial com furo central.



Fonte: D5766/D5766M (2011).

Tabela 7: Definição dos códigos de fraturas aceitáveis para o ensaio tração uniaxial com furo.

CÓDIGO	DEFINIÇÃO DO CÓDIGO
LGM	Falha de tração lateralmente ao longo do centro do furo. Fissuras “ <i>splits</i> ” e delaminações podem estar presentes
AGM	O corpo de prova geralmente fratura na seção do furo, mas restos de ângulo cruzam a linha central do furo lateral. Fissuras “ <i>splits</i> ” e delaminações podem estar presentes
MGM	Laminado falha na tensão do furo e apresenta vários modos de falha. Grandes fissuras “ <i>splits</i> ” e delaminações estão presentes

Fonte: Adaptada de D5766/D5766M (2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

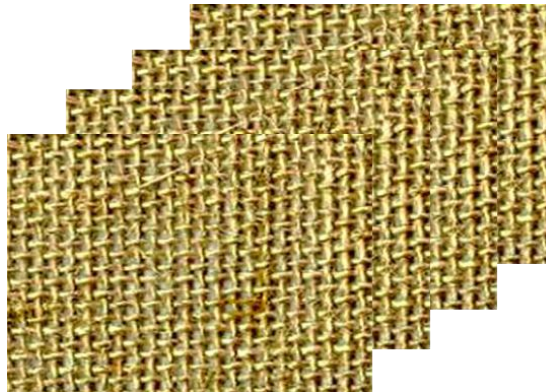
Neste capítulo constam os materiais e a metodologia aplicada na execução do trabalho.

3.1 Materiais utilizados na confecção de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra de juta

O laminado foi fabricado pelo processo *Hand lay-up*. Para a confecção dos compósitos foram necessários:

- **Reforço:** Tecido têxtil bidirecional de fibras de juta, orientado a 0° e a 90° em relação a aplicação da carga, encontrado no comércio local e muito utilizado em sacarias. Foi utilizado no laminado 4 camadas de tecido de fibra de juta, ver Figura 12.

Figura 12: Manta de fibra de juta.



- **Matriz:** Foi utilizada a resina de poliéster insaturada com Neo Pentil Glicol (**NPG**), também conhecida por resina náutica, comercialmente denominada por RESAPOL LP 8847 e fabricada pela Reichhold, tendo por base a resina poliéster insaturada isofitálica. Da sua utilização: tempo de gel foi de 15 minutos adequando-se ao processo; atendendo as condições de função para temperatura ambiente, foram utilizadas as concentrações de acelerador a 1% de Octoato de Cobalto a 6% de Metal e 1% de Peróxido de Metil Etil Cetona como catalisador, conforme boletim técnico fornecido pelo fabricante.

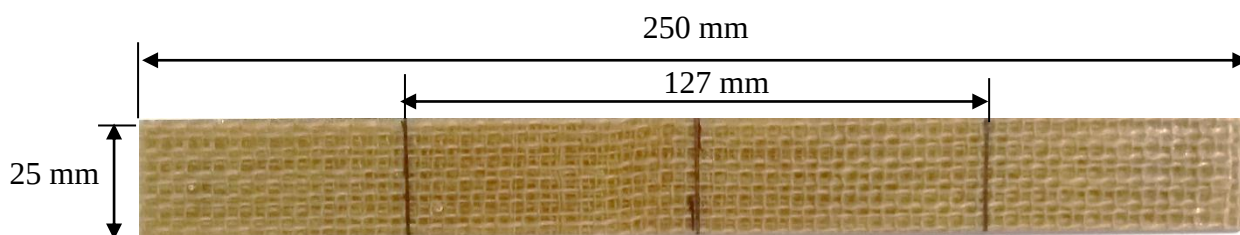
3.2 Confeção dos corpos de prova

Como dito previamente, o presente estudo pretende analisar de que modo se comporta o material compósito fabricado quando submetido a ação de forças de tensão oriundas dos ensaios de tração uniaxial a serem realizados. O objetivo dos ensaios é determinar as propriedades mecânicas relacionadas ao material. Desse modo, os mesmos obedecem às normas: ASTM D3039 e ASTM D5766/D5766M, para o ensaio de tração uniaxial, sem descontinuidade geométrica e com descontinuidade geométrica, respectivamente.

O material compósito consiste em um produto final que apresenta quatro camadas de tecido bidirecional de fibra de juta orientado na posição $0^\circ/90^\circ$ e resina de poliéster insaturado, detalhado no tópico anterior.

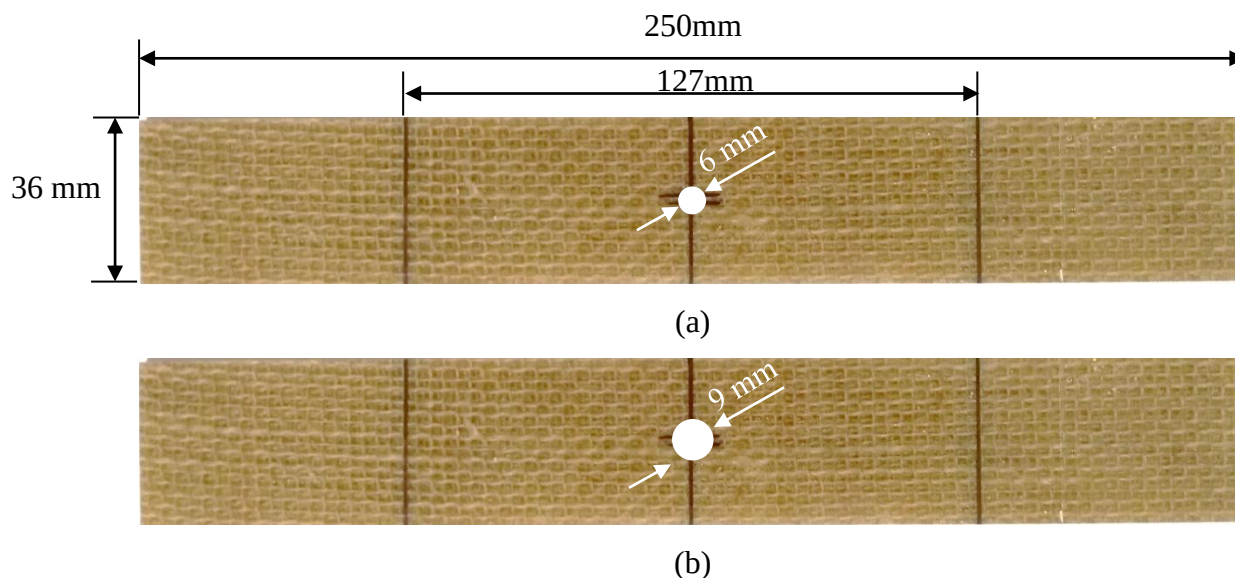
Para a confecção dos corpos de prova foram necessárias algumas condições, tais como, padronização de dimensões e tolerâncias, além disso, a obtenção de 5 corpos de prova válidos para cada condição. Para os ensaios de tração sem descontinuidade geométrica, segundo a norma ASTM D3039, os corpos de prova sem furo (nomeados por **JSF**) devem conter um comprimento total de 250 mm e um comprimento útil de 127 mm e largura de 25 mm, com tolerância de $\pm 1\%$. As dimensões desses corpos são mostradas em mm (milímetros) nas Figuras 13 e 14.

Figura 13: Dimensões dos CP's para ensaio de tração uniaxial sem furo (**JSF**).



E, para os ensaios de tração com descontinuidade geométrica, a norma adotada foi a ASTM D5766/D5766M. De acordo com a mesma o corpo de prova deve apresentar dimensões padrão de comprimento total de 250 mm, comprimento útil de 127 mm e largura de 36 mm, com tolerância de $\pm 1\%$. A Figura 13 mostra as dimensões para os corpos de prova com o furo esquemático de 6 mm (nomeados por **JF6**) e o furo esquemático de 9 mm (nomeados por **JF9**).

Figura 14: Dimensões dos CP's para o ensaio de tração uniaxial com furo: a) JF6 e b) JF9.



3.3 Preparação dos corpos de prova

Nessa seção foram realizados procedimentos de lixamento onde foram utilizadas folhas (230 x 280 mm) de lixa d'água para lixamento úmido em geral T 277 Nortclass do fabricante Norton cujas granas são de 100, 220, 320, 400, 500, 600 e a lixa d'água SIC T 420 com grana de 1200, para melhor acabamento (<https://fabras.com.br/norton-lixas/>). Foram realizadas cinco medidas no galgo (tanto para largura, quanto para espessura) para a obtenção das medidas da área da seção transversal do corpo de prova, tendo como objetivo a obtenção das dimensões normatizadas para os corpos de prova sem descontinuidade geométrica e com descontinuidade geométrica de 6 mm e 9 mm.

As medições foram feitas com o auxílio dos instrumentos de medição metrológicos – paquímetro manual e micrômetro digital resolução 0,02 mm e 0,001 mm, respectivamente. A média da espessura e da largura dos corpos de prova sem descontinuidade geométrica é de 25,14 mm e 5,0198 mm, respectivamente. Para os corpos de prova com descontinuidade geométrica 6 mm as dimensões de largura e espessura são 36,22 e 5,2176, para os corpos de prova de 9 mm a média é de 36,24 e 5,0105, respectivamente.

3.4 Ensaios Realizados

3.4.1 Ensaio de Densidade

O ensaio de densidade pode ser utilizado no controle de qualidade de materiais, verificação da uniformidade de conjuntos de materiais e na avaliação de mudanças físicas em uma amostra. A densidade do compósito pode ser obtida a partir da densidade da fibra e da densidade da resina de acordo com a norma ASTM D792 (2008).

Uma das principais causas da mudança de densidade em um material é diferença localizada de cristalinidade, absorção de solvente, entre outras causas. O teste de densidade deve ser realizado em um laboratório com a temperatura em 23°C e uma variação 2°C. O material utilizado para realização do teste consiste de uma balança com precisão de 0,1mg, um suporte para amostra resistente a corrosão, um vaso de boca larga para segurar a água e a amostra imersa. A água utilizada para o processo deve ser livre de ar e destilada.

O teste é feito através das medições da massa do compósito ao ar e em seguida é verificado a sua massa aparente após a imersão em líquido, a partir dos valores de massa molhada e seca do material é possível calcular a sua densidade específica ou relativa. A densidade do compósito é calculada pela seguinte Equação 2:

$$\rho = \frac{a\eta}{a + b - w} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde ρ é a densidade volumétrica do compósito (g/cm^3), a é o peso da amostra seca (g), η é a densidade da água na temperatura de ensaio a 23°C ($0,9975 \text{ g/cm}^3$), w é o peso do afundador parcialmente imerso em água (g), e b é o peso da amostra imersa com o afundador em água (g).

3.4.2 Ensaio de Tração

Como dito anteriormente, serão realizados ensaios em dois segmentos: O ensaio de tração uniaxial sem descontinuidade geométrica que atende à norma ASTM D3039 (2014), e

o ensaio de tração uniaxial com descontinuidade geométrica que obedece à norma ASTM D5766/D5766M (2011).

O ensaio de tração uniaxial é realizado para fins de obtenção das propriedades mecânicas resistência última à tração (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e deformação à ruptura (%) do material para as condições: original (**JSF**), presença de descontinuidade geométrica de 6 mm (**JF6**) e de 9 mm (**JF9**). Para tal, foram confeccionados (07) sete corpos de prova para cada tipo citado. Os ensaios foram realizados na máquina Universal de ensaios mecânicos da EMIC, com célula de carga de 100kN, localizada no laboratório de ensaios mecânicos do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA – Campus Mossoró.

Figura 15: Máquina utilizada para a realização do ensaio de tração uniaxial.



Para os cálculos dos valores de resistência última à tração, deformação à ruptura e módulo de elasticidade foram utilizadas as seguintes equações:

$$\sigma_f = \left(\frac{P}{A} \right)$$

(Eq. 3)

Onde: σ_f é a Tensão última de tração, (MPa); P é a Carga aplicada, (N) e A Área da seção transversal do corpo de prova, (mm²).

$$\epsilon = \left(\frac{\Delta L}{L_o} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde: ϵ é a Deformação, (%); L_o é o Comprimento útil do corpo de prova, (mm) e ΔL é a Variação do comprimento ($L - L_o$), (mm).

$$E = \left(\frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde: E é o Módulo de elasticidade longitudinal, (MPa); $\Delta \sigma$ é a Variação da tensão na região linear, (MPa) e $\Delta \epsilon$ é a Variação da deformação linear, (%).

3.4.3 Influência da variação w/D em laminados

A influência da variação w/D (relação entre a largura do corpo de prova/diâmetro do furo) é um fenômeno que pode modificar as propriedades mecânicas do compósito, fazendo com que o material apresente uma redução da resistência quando mediante determinada descontinuidade.

Fontes (2013) considera que uma vez que o w/D é mantido constante a diferença com relação a resistência residual não é capaz de representar dispersão experimental maior do que a tolerável para os ensaios. Assim, embora a mudança de furo de 6 mm para 9 mm possa apresentar reduções de resistência última à tração e módulo de elasticidade longitudinal significativas, em resultados percentuais essa dispersão pode ser desconsiderada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de Densidade

Os valores de densidades volumétricas do laminado proposto podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8: Densidades volumétricas do laminado compósito proposto.

	Média	Desvio Padrão
Densidade Volumétrica (g/cm ³)	1,170	0,002

Paiva (2011) realizou um estudo em compósito de fibra de juta e resina vegetal de mamona em substituição dos laminados de fibra de vidro na fabricação da carroceria de veículo de Rali e observou que a variação das densidades apresentou maior escala de grandeza nos compósitos de fibra de juta devido a presença de bolhas de ar durante a realização da mistura, assim como o tempo de cura, representando fatores determinantes para a dada variação.

Fontes (2013) realizou um estudo baseado no comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual para compósito polimérico híbrido utilizando matriz polimérica e mesclando fibras naturais com fibras de vidro e obteve baixa densidade volumétrica com valor médio de 1,26 e uma dispersão de 0,88. Destaca-se que no compósito fabricado por Fontes (2013) é utilizada a fibra de vidro (na camada central) mesclada à fibra de juta (duas camadas) nas extremidades em ambos os lados. Já no laminado proposto é utilizada somente a fibra de juta em quatro camadas. Tais condições, assim como o processo de fabricação, por exemplo, – sobretudo, o processo de laminação manual – podem ser responsáveis pelos valores de densidade obtidos.

4.2 Ensaio de tração uniaxial

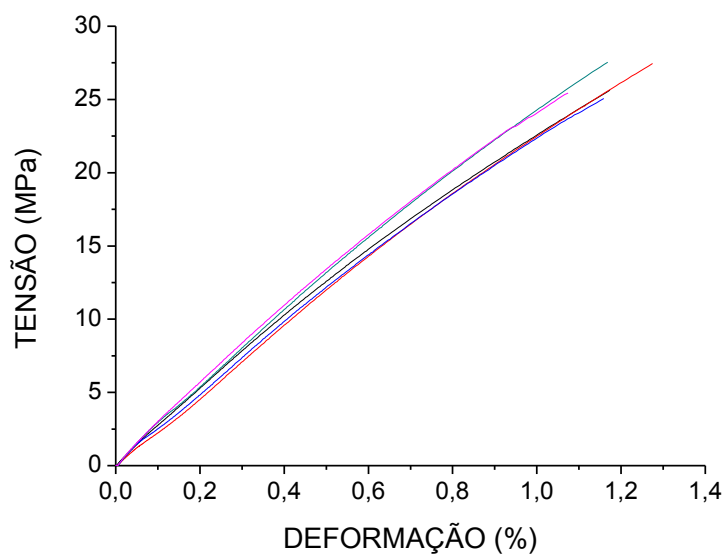
As propriedades mecânicas de resistência última à tração (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e deformação à ruptura (%) do material para as condições original (**JSF**), com presença de descontinuidade geométrica de 6 mm (**JF6**) e de 9 mm (**JF9**) foram obtidas a partir da realização de ensaios de tração uniaxial.

4.2.1 Análise nos corpos de prova sem descontinuidade – JSF

Ensaio de tração

Com relação aos ensaios de tração uniaxial para os corpos de prova sem descontinuidade (JSF) apresentaram um valor médio de resistência à tração de 26,23 MPa. É possível perceber pelo gráfico (Figura 16) que o material proporciona um comportamento frágil até a fratura diferentemente de materiais com comportamento dúctil onde há o fenômeno do escoamento.

Figura 16: Ensaio de tração – gráfico: Tensão x Deformação – JSF.



No gráfico da Figura 16 percebe-se que as curvas estão relativamente próximas indicando baixo desvio padrão, o que é confirmado na Tabela 9. Observa-se que o mesmo apresenta comportamento considerado linear entre a tensão e a deformação ao longo da faixa da tensão de ruptura. Para a resistência última à tração, deformação à ruptura e para o módulo de elasticidade longitudinal (medido na direção da aplicação da carga) pode-se observar na Tabela 9 seus valores médios e desvios padrão.

Tabela 9: Propriedades mecânicas dos corpos de prova - JSF.

	Deformação de ruptura total (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Valor médio	1,17	26,23	2,57
Desvios Padrão	0,07	1,18	0,14

Análise da fratura macroscópica

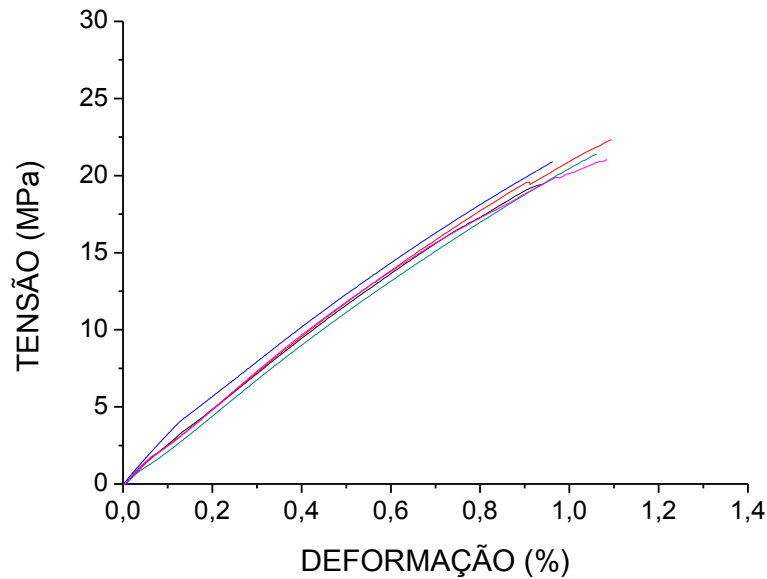
Os corpos de prova fraturados apresentaram comportamento condizente com o padrão de ensaios fraturando dentro do limite de comprimento útil de 127 mm e, como pode ser visto na figura 17, a fratura mecânica obtida no **JSF** correspondeu ao modo de falha LGM (*Lateral - gage – middle*) de acordo com a norma ASTM D 3039 (2014), como visto na Tabela 6 e Figura 10.

Figura 17: Fratura macroscópica – JSF.

4.2.2 Análise nos corpos de prova com descontinuidade de 6 mm - JF6

Ensaio de tração

Conforme o gráfico da Figura 18, o ensaio de tração para os corpos de prova com furo de 6 mm apresentou curvas cujo comportamento condiz com o estudado. A presença da descontinuidade nos CP's implica no aumento de concentração de tensão na área imediatamente ao seu redor fazendo com que o corpo de prova tenha sua resistência à tração diminuída e, por consequência, frature a uma menor resistência.

Figura 18: Ensaio de tração – gráfico tensão x deformação – JF6.

Como pode ser visto no gráfico (Figura 18), a resistência à tração é menor em comparação aos CP's sem descontinuidade geométrica devido a presença de concentradores de tensão na região de descontinuidade. No entanto, as curvas no gráfico apresentam comportamento semelhante podendo ser classificadas como lineares ao longo da faixa de tensão até a fratura do material. Os valores médios e desvios padrão para a deformação de ruptura total, resistência à tração e módulo de elasticidade podem ser vistos na Tabela 10.

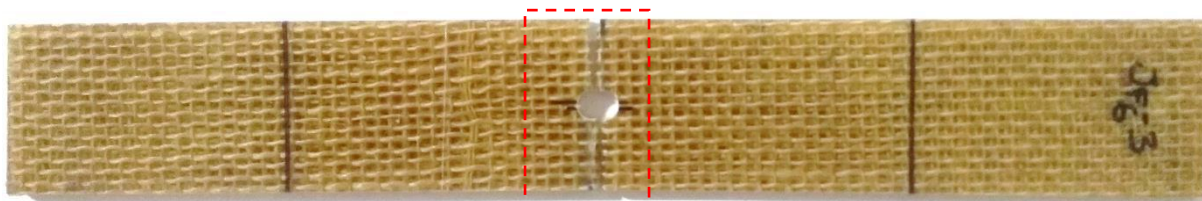
Tabela 10: Propriedades mecânicas dos corpos de prova – JF6.

	Deformação de ruptura total (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Valor médio	1,03	21,02	2,42
Desvios Padrão	0,07	1,05	0,13

Análise da fratura macroscópica

A Figura 19 mostra a região fraturada um corpo de prova JF6. Observa-se que a fratura ocorre na região onde há a descontinuidade geométrica (caracterizando um ensaio válido), nessa região o corpo de prova apresenta maior fragilidade e, quando submetido a esforços, seu valor de resistência à tração diminui.

Figura 19: Fratura macroscópica – JF6.



A presença do furo ocasionou pouca fissuração na matriz e fratura final bem localizada, evidenciando o modo de fratura do tipo LGM (*Lateral - gage – middle*) e também a ruptura completa das fibras de juta, como exposto na figura 10 e Tabela 6 no referencial teórico.

Resistencia Residual

A resistência residual é dada pela razão entre a resistência última do material com a presença da descontinuidade e a resistência última do material sem descontinuidade. Esse fator é responsável pela quantificação do grau de danos que a descontinuidade pode oferecer ao elemento estrutural.

Utilizando a equação 2.1, tem-se que:

$$RS = \frac{21,02}{26,23} = 0,801$$

Com esse resultado, pode-se afirmar que os CP's **JF6** retiveram 80,1% da resistência à tração apresentada pelos CP's **JSF**. Fontes (2013) e Tinô (2010) também realizaram ensaios em laminados de matriz polimérica reforçados por tecidos de fibra de vidro.

Fontes (2013) estudou o comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual de um compósito polimérico híbrido composto por matriz poliéster e reforçado por tecidos bidirecionais de fibras de vidro-E e tecidos bidirecionais de fibras de Juta. O laminado foi confeccionado na forma de placa e constituído por matriz poliéster ortotereftálica com cinco camadas de reforço sendo uma camada central de tecido bidirecional de fibras de vidro-E e quatro camadas de tecido bidirecional de fibras de Juta distribuídas nas extremidades. O autor observou que, de modo geral, o laminado apresenta característica de material frágil até a fratura, em todas as condições estudadas. O autor constatou que a presença do furo central alterou a resistência última à tração, assim também, a resistência

residual dada a redução na capacidade de suporte de carga, obtendo um valor de 0,810 com a presença do furo de 6 mm. Sobre o comportamento da fratura, foi constatado que todos os CP's apresentaram modo de fratura LGM normatizado. E modulo de elasticidade dentro da faixa de dispersão dos ensaios.

4.2.3 Análise nos corpos de prova com descontinuidade de 9 mm – **JF9**

Ensaio de tração

Para o ensaio de tração com descontinuidade de 9 mm o corpo de prova também foi submetido a esforços apresentando comportamento semelhante aos demais. No entanto, considerando que o tamanho da descontinuidade é um dos fatores que influenciam o comportamento mecânico dos compósitos, como esperado, os CP's com descontinuidade de 9 mm apresentaram maior redução na resistência que o **JF6**.

Como pode ser observado na Figura 20, as curvas apresentam comportamento semelhante, isso significa que o ensaio transcorreu adequadamente.

Figura 20: Ensaio de tração – gráfico tensão x deformação – **JF9**.

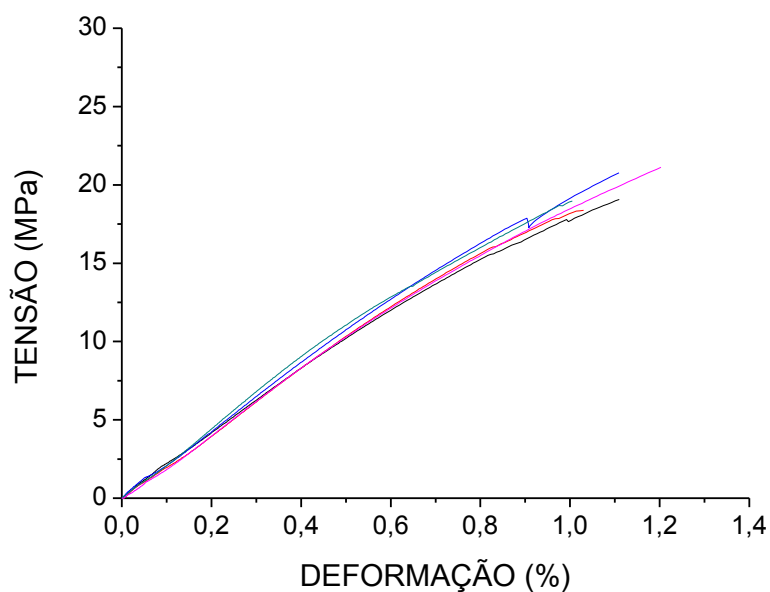
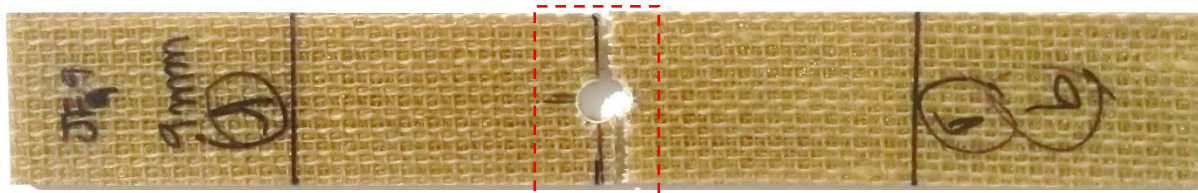


Tabela 11: Propriedades mecânicas dos corpos de prova - **JF9**.

	Deformação de ruptura total (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	1,09	19,67	2,13
Desvios Padrão	0,08	1,21	0,08

Análise da fratura macroscópica

A Figura 21 mostra a região do **JF9** fraturada. Observa-se que na região onde há a fratura está localizada a descontinuidade geométrica, ocorrendo de maneira semelhante ao **JF6** apresenta o tipo de fratura normatizada LGM (*Lateral - gage – middle*) e a ruptura total das fibras de juta, como exposto na figura 10 e tabela 6. Se comparado ao **JF6** pode-se afirmar que os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade do **JF9** são menores. Isso significa que a resistência do material está diretamente relacionada ao tamanho da descontinuidade.

Figura 21: Fratura macroscópica – **JF9**.

Resistencia Residual

Os valores de tensão na Tabela 11 mostram que a resistência residual do elemento diminui à medida em que a descontinuidade aumenta, se comparado aos CP's com descontinuidade de 6 mm. Como pode ser observado pelo cálculo da resistência residual.

Utilizando a equação 2.1, tem-se:

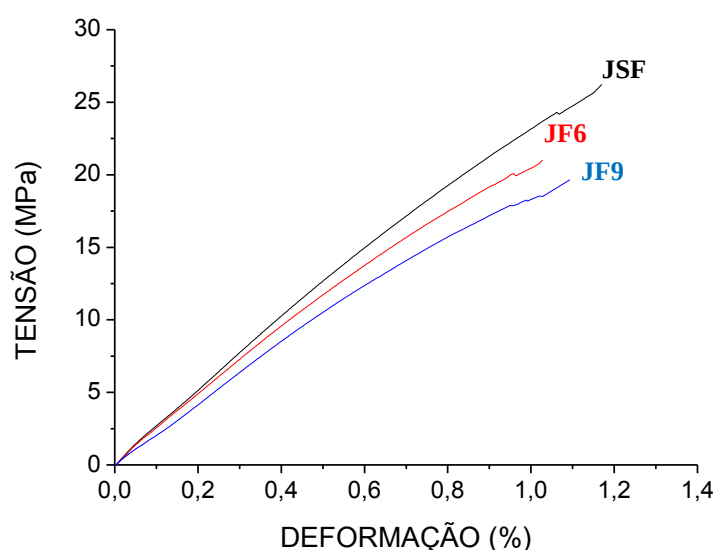
$$RS = \frac{19,67}{26,23} = 0,749$$

Esse valor resulta na afirmativa de que os **JF9** retiveram 74,9% da resistência mecânica apresentada pelo **JSF**. Comparado ao **JF6**, o **JF9** apresentou uma redução de 5,2% da resistência residual.

4.3 Influência da variação w/D no laminado proposto

A avaliação do fenômeno da concentração de tensão a partir dos critérios de falhas pode ser entendida pela influência da relação w/D (largura do CP/diâmetro do furo). Essa relação pode ser observada na Figura 22 onde o gráfico apresenta um comparativo das propriedades residuais do compósito e evidencia a redução da resistência do material à medida do aumento da descontinuidade relacionada à curva média em cada caso.

Figura 22: Ensaio de tração – gráfico tensão x deformação – Influência da relação w/D



Pelo gráfico na Figura 22 pode-se afirmar que o **JSF** apresenta maior resistência, maior rigidez e maior linearidade dentre todos os CP's analisados. Pode-se atribuir a essa constatação a influência da relação w/D (largura do corpo de prova/diâmetro do furo) a mudança no diâmetro do furo de 6 mm para 9 mm, significando, sobretudo, a perda de resistência mecânica em comparação aos CP's na condição original. Realizando uma análise mais detalhada, de acordo com cada uma das propriedades mecânicas, foram construídas as Figuras 23, 24 e 25.

Em relação à resistência à tração representada na Figura 24, o **JSF** obteve o maior valor médio. Em termos de diferença percentual o **JSF** apresentou uma superioridade de 19,86% em relação ao **JF6** e de 25,01% em relação ao **JF9**. Uma explicação pode ser atribuída à influência da relação w/D.

Figura 23: Influência w/D na Resistência à tração.

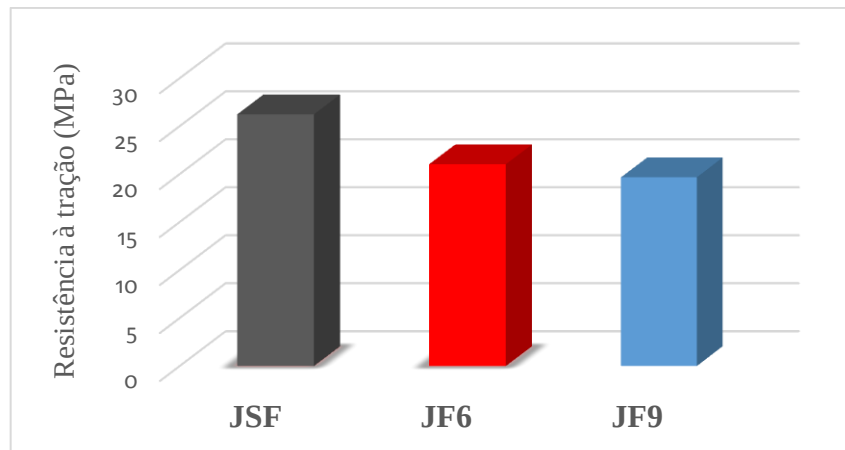
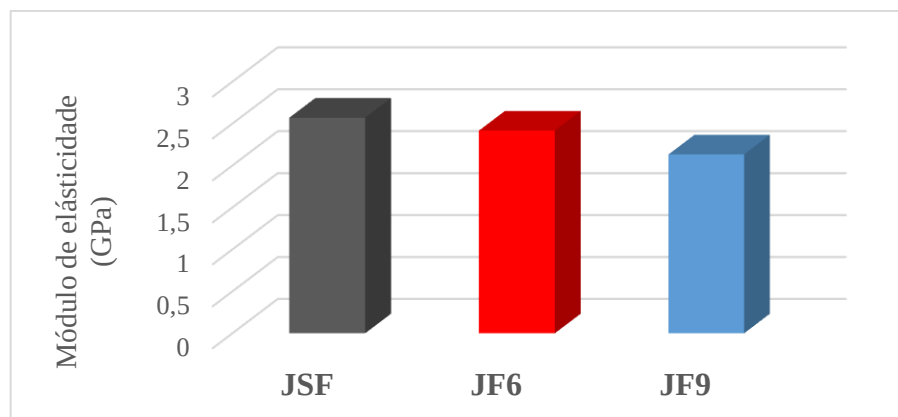
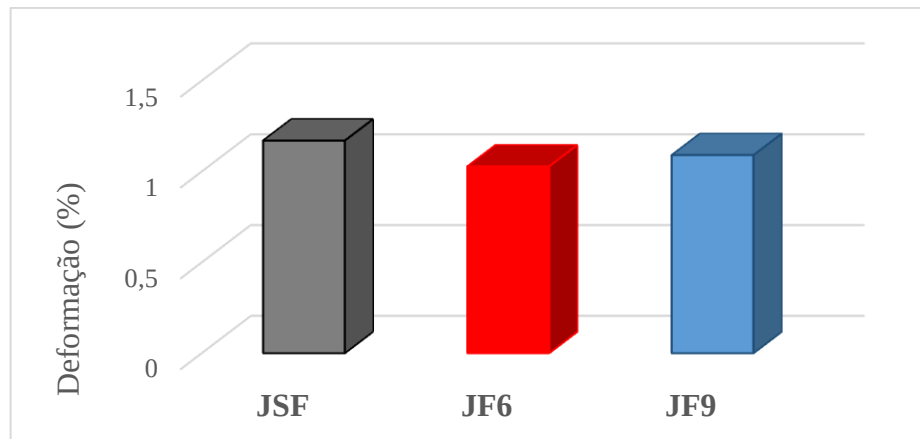


Figura 24: Influência w/D no Módulo de elasticidade.



Quanto ao módulo de elasticidade, pode-se observar pelo gráfico da Figura 25 que não há grande alteração de um grupo de CP's para outro. Os valores médios obtidos foram: 2,57 GPa para o **JSF**, 2,42 GPa para o **JF6** e 2,13 GPa para o **JF9**, com os respectivos desvios padrões de 0,14 GPa, 0,13 GPa e 0,08 GPa. Podendo destacar uma leve tendência a redução do módulo de elasticidade com o aumento da descontinuidade geométrica.

Figura 25: Influência w/D na deformação à ruptura.



A Figura 25 possibilita a análise quanto a deformação nos CP's. Para essa situação é correto afirmar que o **JSF** apresentou maior deformação de 1,17%, enquanto que o **JF6** apresentou o menor valor médio de deformação de ruptura final, 1,03%. Destaca-se que o **JF9** apresentou maior deformação que o **JF6**, o que está relacionado com o menor módulo de elasticidade obtido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de todo o estudo realizado, pode-se concluir que:

- O laminado de matriz polimérica reforçado com fibra de juta apresentou densidade volumétrica igual a $1,170 \text{ g/cm}^3$ e desvio padrão de 0,002.
- De maneira geral, o laminado apresentou um comportamento de material frágil até a ruptura frente ao carregamento de tração uniaxial em todas as condições original, com descontinuidade de 6 mm e com descontinuidade de 9 mm.
- A presença da descontinuidade (furo central), para as dimensões analisadas, alterou a resistência última à tração caracterizando uma perda de 19,86% e 25,01% para o **JF6** e **JF9**, respectivamente.
- Para o módulo de elasticidade foi encontrada uma pequena diferença com valores próximos dos limites de desvio padrão dos ensaios.
- O cálculo da Resistência Residual comprovou a influência do furo quanto a redução da capacidade de suporte de carga. No entanto, entre o **JF6** e **JF9** essa redução foi baixa correspondendo a 5,2 % devido a variação da relação w/D , onde para as duas condições a largura do corpo de prova foi a mesma, no entanto, os ensaios apresentaram baixa intensidade.
- Quanto ao comportamento da fratura dos corpos de prova, todos apresentaram fratura final bem localizada com característica LGM normatizada. Apresentando, ainda, fissura total da matriz e ruptura do tecido de fibra de juta.
- Para os corpos de prova com descontinuidade foi observado que as microfissuras foram localizadas e desviadas em direção a vizinhança do furo. Sendo melhor evidenciado de acordo com o aumento do furo.

6 REFERÊNCIAS

- ASTM D 5766/D5766M – 11. **Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- ASTM D 792 – 08. **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
- ASTM D3039-14, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- CALLISTER, William. D. e RETHWISCH, David. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução** / William D. Callister Jr., David G. Rethwish. 8º Ed. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Morais d’Almeida. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CAMERINI, A. L.; TERRONES, L. A. H.; MONTEIRO, S. N. **Tenacidade ao Impacto de Compósitos e tecido de juta reforçado por matriz de polietileno reciclado**. Revista Matéria, V. 13, n. 1, pp. 180-185, 2008. <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10961>
- CAVALCANTI, Wilma S. LIMA, Antônio G. B. da. CARVALHO, Laura H. de. **Sorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados com tecido de Juta e Juta/vidro: Modelagem, Simulação e experimentação**. Centro de Ciências e Tecnologia. Unidade Acadêmica de Engenharia dos Materiais, Campina Grande – PB, Brasil. 2010.
- FÁTIMA, S., MOHANTY, A. R. **Acoustical and fire-retardant properteis of jute composite materials**. Departament of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur, West Bengal 721 302, Índia. 2011. journal homepage: www.elsevier.com/locate/apacoust
- FONTES, Raphael Siqueira. **Compósito polimérico híbrido: comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Natal-RN, 2013.
- FURTADO, Samuel Cezinando Ribeiro. **Cálculo estrutural e experimental da carenagem de um veículo**. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa – Portugal. 2009.
- LIMA, Amanda Camerini. **Caracterização e propriedades de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado**. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UEFN. Campos dos Goytacazes – RJ. 2009.
- MARGEM, Jean Igor. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibra de malta**. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UEFN. Campos dos Goytacazes – RJ. 2013.
- MARINELLI, Alessandra L.; MONTEIRO, Marcos R. e AMBRÓSIO, José. D. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de vegetais naturais da**

biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº2, p. 92-99, 2008.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. - **Composite Materials: Engineering and Science.** NW Boca Raton: CRC, 1994.

MEHMET SARIKANAT. **Variations of mechanical properties of jute/polyester composite aged in various media.** Journal of Composite Materials 46(18). 2012.

NETO, José R. A. **Influência da adição de uma carga nanoparticulada no desempenho de compósitos poliuretano/fibra de juta.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº1, p. 10-15, 2007.

NÓBREGA, Múcio Marcos Silva. **Compósitos de matriz poliéster com fibras de Caroá *Neoglaziovia variegata*: Caracterização mecânica e sorção de água.** Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Centro de Ciências e Tecnologia. Doutorado em Engenharia de Processos. Campina Grande – PB. 2007.

PAIVA, Acir Fortunato. **Estudo de compósito de fibra de juta e resina vegetal como substituto dos laminados de fibra de vidro na fabricação da carroceria de veículo de Rali.** Universidade Federal de Ouro Preto. Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais (Mestrado). Ouro Preto/MG. 2011.

PEREIRA, Fabiano. **Alternativas de uma fibra vegetal.** Pesquisa FAPESP 253, p. 70-73. Universidade Federal de Minas Gerais – MG. 2017.

PIRES, Eduardo N. **Efeito do tratamento alcalino de fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi.** Polímeros, v.22, n. 4, p. 339-344, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis, SC – 2012.

RODRIGUES, Jean. FUGIYAMA, Roberto. SOUZA, José Antônio. **Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão.** Revista Matéria, v. 20, nº 4. P. 946-960. 2015.

SILVA, Isabela Leão Amaral da. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibra contínua de juta.** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF – Campos dos Goytacazes – RJ, 2014.

SOUZA, Filipi Marques de. **Estudo da descontinuidade geométrica em lâmina de tecido híbrido bidimensional vidro/carbono.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Natal-RN, 2017.

TINÔ, Sérgio Renan Lopes. **Descontinuidade na seção transversal em laminados compósitos poliméricos: Efeitos e propriedades.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Natal-RN, 2010.

VOGEL, Gilmar Fernando. **Projeto e desenvolvimento de uma máquina para cortes de fios de fibra de vidro (roving), utilizada para a laminação de peças em plástico reforçado com fibras de vidro (fiberglass).** Centro de Tecnologia. Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Maria – RS. 2002.