UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

AMANDA CHAVES DE AZEVEDO

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE ARGILA E TECIDOS DE FIBRA DE JUTA (*Corchorus capsularis*) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FLAMABILIDADE DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Ananindeua - PA

2019

AMANDA CHAVES DE AZEVEDO

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE ARGILA E TECIDOS DE FIBRA DE JUTA (*Corchorus capsularis*) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FLAMABILIDADE DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, campus universitário de Ananindeua, para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará.

Orientador: Profº. Drº. Eng. Deibson Silva da Costa.

Ananindeua – PA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A994i Azevedo, Amanda Chaves de
Influência da incorporação de argila e tecidos de fibra de juta (Corchorus capsularis) nas propriedades mecânicas e de flamabilidade de compósitos poliméricos / Amanda Chaves de Azevedo. — 2019.
xv, 64 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

1. Materiais. 2. Compósitos. 3. Argila. 4. Juta. 5. Caracterização. I. Título.

CDD 620.11

AMANDA CHAVES DE AZEVEDO

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE ARGILA E TECIDOS DE FIBRA DE JUTA (*Corchorus capsularis*) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FLAMABILIDADE DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 03 / 12 / 2019

Conceito: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA

Deibson Silva da Costa

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Orientador)

Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha

(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno)

Prof. Me. Alessandro José Gomes dos Santos

(FEM/UNAMA - Examinador Externo)

Ananindeua – PA

2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que, de maneira incansável, me ajudaram com tudo o que eu precisei. Desde o início da minha formação, pessoal e escolar, estavam presentes nos momentos, me apoiando e me dando suporte, principalmente psicológico, para enfrentar a vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus que me guiou ao longo de 5 anos de curso da melhor maneira possível.

Aos meus pais, Maria Vandira e Jose Luiz, irmãos, Luiz Eduardo e Ciléia Silva, e familiares que forneceram o apoio necessário para alcançar meus objetivos.

Ao meu namorado, Victor Mendonça, que teve paciência e compreensão para lidar com todos os momentos.

Ao meu primo, Matheus Chaves, que acreditou no meu potencial e me forneceu diversas ajudas durante o curso.

A minha avó Raimunda Chaves que, com sabedoria, me mostrou os caminhos para chegar até aqui.

Ao Prof. Dr. Deibson Silva o qual mostrou-se muito mais que um orientador, conduzindo de forma segura o andamento deste trabalho.

A minha amiga, Hellen Coelho, a qual trabalhou comigo na fabricação dos compósitos em diversas etapas, nós aprendemos juntas.

Ao meu amigo de sala, Luis Felipe, por me ajudar e orientar em diversas etapas desta pesquisa.

Ao meu grupo FACTH por todos os momentos vividos tanto em sala de aula quanto fora dela.

Ao Laboratório de Engenharia Química, em especial ao LAMPS e a USIMat, por me fornecerem os equipamentos necessários para a realização da pesquisa.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, por me dar o suporte necessário para a realização da pesquisa.

Aos professores por todos os ensinamentos transmitidos no decorrer do curso.

Àqueles que já se foram, mas que mesmo assim, contribuíram para minha formação pessoal.

"O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo."

Winston Churchill

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente, na sociedade, gera diversos estudos com o objetivo de substituir materiais que já existem por outros que causem menor impacto ao ambiente. Diante disso, as fibras naturais são boas substitutas no que se refere a reforços em materiais compósitos de matriz polimérica. Já a argila possui como características principais o fato de ser um material natural que é facilmente encontrado e que possui granulometria interessante para estudo. O objetivo do trabalho baseia-se na confecção de materiais compósitos de matriz polimérica com incorporação de tecido de fibra de juta e argila para verificação de propriedades físicas, mecânicas e de retardo à chama. Foram produzidos materiais compósitos de matriz poliéster isoftálica, com tecido de fibra de juta e argila (100 *mesh*). O método utilizado para fabricação das placas de compósitos foi o *hand lay up*. A resina poliéster isoftálica foi utilizada com 1,5 % (v/v) de acelerador de cobalto e 1,0 % (v/v) de catalisador. As proporções de argila utilizadas foram de 0 %, 5 %, 15 % e 25 % em massa. A fibra de juta foi utilizada em forma de tecido. Realizou-se a Difração de Raios-X para avaliação das composições mineralógica da argila. Para os compósitos foram realizados ensaios físicos de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água, utilizando a NBR 12766. Executou-se, também, ensaios de resistência à tração (norma ASTM D3039) e resistência à flexão (norma ASTM D790) dos corpos de prova, além de análises da superfície de fratura por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foi realizado o ensaio de retardo à chama (norma ASTM D635). Os testes físicos mostraram aumento na massa específica aparente. Houve aumento das resistências de compósitos com argila e, também, com os que se empregou a juta, em relação a matriz plena. O melhor resultado de resistência à tração encontrado foi de 23,05 MPa, relacionado a compósitos apenas com argila. Para o ensaio de flexão o maior resultado foi de 75,86 MPa que, também, foi para compósitos apenas com argila. Nas análises de superfícies das fraturas (por meio do MEV) observou-se boa dispersão do particulado em compósitos com argila e alguns vazios, nos compósitos com tecido de fibra de juta foi observado vazios, fibras dispostas em sentido transversal ao carregamento e dificuldade de molhabilidade da resina na fibra. O ensaio de flamabilidade demonstrou que a menor taxa de queima registrada foi de 16,79 mm/min. Os resultados demonstraram boas características mecânicas e de retardo à chama dos compósitos.

Palavras-chave: Materiais. Compósitos. Argila. Juta. Caracterização.

ABSTRACT

Concern for the environment in society generates several studies aiming to replace materials that already exist with others that have less impact on the environment. In view of this, natural fibers are good substitutes for reinforcements in polymeric matrix composite materials. Clay has as its main characteristics the fact that it is a natural material that is easily found and that has interesting granulometry to study. The objective of this work is based on the manufacture of polymeric matrix composite materials with the incorporation of jute fiber and clay fabric for verification of physical, mechanical and flame retardant properties. Isophthalic polyester matrix composite materials were produced with jute fiber and clay fabric (100 mesh). The method used to do the composite plates was the hand lay up. The isophthalic polyester resin was used with 1.5 % (v/v) cobalt accelerator and 1.0 % (v/v) catalyst. Clay was used in proportions of 0 %, 5 %, 15 % and 25 % by mass. A layer of jute tissue was used. X-ray diffraction was performed to evaluation of clay mineralogical compositions. For the composites physical tests of apparent specific mass, apparent porosity and water absorption were performed using NBR 12766. Tests were also performed to verify tensile strength (ASTM D3039 standart) and flexural strength (ASTM D790 standard) of the specimens, as well as analysis of the fracture surface by Scanning Electron Microscopy (SEM). Was performed the flame retardation (ASTM D635 standard). Physical tests showed an increase in apparent specific mass. There was an increase in the composites resistance with clay and also with the jute, in relation to the full matrix. The best tensile strength result found was 23.05 MPa, related to clay-only composites. For the flexure test the highest result was 75.86 MPa, which was also for clay-only composites. In the fracture surface analysis (by SEM) it was observed good dispersion of the particulate in clay composites and some voids, in the jute fiber fabric composites it was observed voids, fibers arranged transversely to loading and difficulty of wettability of resin in fiber. The flammability test showed that the lowest burn rate recorded was 16.79 mm / min. The results demonstrated good mechanical and flame retardant characteristics for the composites.

Keywords: Materials. Composites. Clay. Jute. Description.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de classificação dos materiais compósitos. 20
Figura 2 – Estrutura molecular da resina poliéster isoftálica. 26
Figura 3 – Fibras aleatória (a) e fibras direcionadas (b). 28
Figura 4 – Fibra natural em roving. 28
Figura 5 – Fibra natural em manta. 29
Figura 6 – Tecido entrelaçado. 29
Figura 7 – Tecido de juta. 29
Figura 8 – Gráfico da curva de tensão-deformação para fibra, matriz e compósito. 32
Figura 9 – Esquema do ensaio de flexão em três pontos. 34
Figura 10 – Ensaio usual de resistência à chama segundo norma UL94. 34
Figura 11 – Resina poliéster isoftálica (a), acelerador de cobalto (b), catalisador MEK-P. (c) e desmoldante Desmojet (d). 36
Figura 12 – Argila proveniente do distrito de Icoaraci após peneiramento (100 *mesh*). 37
Figura 13 –Tecido de juta proveniente do comércio de Belém. 37
Figura 14 – Equipamentos utilizados na fabricação dos compósitos. 38
Figura 15 – Fibra de juta disposta em molde metálico. 39
Figura 16 – Preparação da amostra para realização da análise por difração de raios-x (DRX). 40
Figura 17 – Fluxograma do processo de fabricação dos compósitos. 41
Figura 18 – Homogeneização de acelerador e argila. 42
Figura 19 – Mistura de acelerador, argila e catalisador em molde metálico. 43
Figura 20 – Fabricação do compósito híbrido. 43
Figura 21 – Esquema do corpo de prova para ensaio de tração. 44
Figura 22 – Esquema do corpo de prova para ensaio de flexão e flamabilidade. 44
Figura 23 – Corpos de prova para ensaios físicos. 44
Figura 24 – Aparato para medição da massa imersa do material. 45
Figura 25 – Máquina para ensaio de tração. 46
Figura 26 – Máquina para ensaio de flexão. 47
Figura 27 – Corpos de prova para análise por microscopia eletrônica de varredura. 47
Figura 28 – Equipamento para microscopia eletrônica de varredura. 48

Figura 29 – Representação da marcação dos corpos de prova de flamabilidade. ...48
Figura 30 – Etapas de queima do ensaio de flamabilidade (início (a), meio(b) e fim da queima(c)). 49
Figura 31 – Resultado da Difração de Raios-X para a argila utilizada. 50
Figura 32 – Gráfico do comportamento da resistência à tração de materiais compósitos com inserção de argila. 54
Figura 33 – Gráfico de força x deslocamento de compósitos com argila. 55
Figura 34 – Gráfico de tensão de resistência à tração de compósitos com argila em comparação a matriz plena, e respectivos grupos Tukey. 56
Figura 35 – Gráfico comparativo dos resultados de tensão de ruptura de compósitos com tecido de juta e matriz plena. 58
Figura 36 – Gráfico força x deslocamento de compósitos com argila e tecido de juta. 59
Figura 37 – Gráfico de tensão de resistência à tração de compósitos com argila e juta em comparação a matriz plena, com respectivos grupos Tukey. 60
Figura 38 – Gráfico de comparação dos resultados de resistência à flexão de compósitos com argila e matriz plena. 62
Figura 39 – Gráfico de tensão de resistência à flexão de compósitos com argila em comparação a matriz plena, com análise do teste de Tukey. 63
Figura 40 – Gráfico dos resultados de resistência à flexão de compósitos com argila e tecido de juta comparados a matriz plena. 64
Figura 41 – Gráfico de tensão de resistência à flexão de compósitos com argila e juta em comparação a matriz plena, com análise do teste de Tukey. 65
Figura 42 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura da fibra de juta, com aumento de 28 x. 65
Figura 43 – Micrografia da região de fratura de compósitos com inserção de argila nas proporções de 15 % de argila (a) e 25 % de argila (b). 66
Figura 44 – Micrografia da região de fratura de compósitos com matriz e tecido de juta com aumento de 19 x (a) e 21 x (b). 67
Figura 45 – Gráfico da taxa de queima para os compósitos estudados. 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Determinação das quantidades para a confecção das placas. 41
Tabela 2 – Resultado de ensaios físicos para compósitos com argila. 51
Tabela 3 – Resultados de ensaios físicos para compósitos com argila e tecido de juta. 52
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de tração de compósitos com inserção de argila. 53
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração de compósitos com argila e tecido de juta. 56
Tabela 6 – Resultados do ensaio de flexão em compósitos com argila. 61
Tabela 7 – Resultados do ensaio de flexão em compósitos com argila e tecido de juta. 63
Tabela 8 – Taxa de queima (em mm/min) para os compósitos estudados. 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CAT MET UMEDECIDO	Octoato de cobalto
Co	Cobalto
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DRX	Difração de Raios-X
EVA	Etileno Acetato de Vinila
GPa	Gigapascal
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
MEA	Massa específica aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Megapascal
Ms, Mu e Mi	Massa seca, massa úmida e massa imersa
N	Newton
NBR	Normas técnicas
nm	Nanômetro
PA	Porosidade aparente
Pa	Pascal
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Cloreto de polivinila
Q, M e L	Quartzo, muscovita e caulinita
USIMat	Usina de materiais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Justificativa e motivação 16
1.2 Objetivos 16
1.2.1 Objetivo geral 16
1.2.2 Objetivos específicos 17
1.3 Composição do trabalho 17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 Materiais compósitos 19
2.2 Compósitos reforçados com fibras 20
2.3 Compósitos reforçados com partículas 21
2.4 Métodos de fabricação dos compósitos 22
2.5 Matriz polimérica 23
2.5.1 Polímeros 23
2.5.2 Resina poliéster 25
2.6 Fibras 26
2.6.1 Tipos de fibras 26
2.6.2 Disposição das fibras 27
2.6.3 Fibra de juta 29
2.7 Particulados 30
2.7.1 Argila 30
2.8 Ensaios mecânicos 31
2.8.1 Tração 31
2.8.2 Flexão 33
2.9 Ensaio de flamabilidade 34
2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 35
3 MATERIAIS E MÉTODOS 36
3.1 Materiais utilizados 36
3.1.1 Matriz polimérica 36
3.1.2 Argila 37
3.1.3 Fibra de juta 37
3.2 Equipamentos utilizados 38
3.3 Procedimento experimental 39
3.3.1 Preparação das matérias-primas 39

3.3.2 Análise por Difração de Raios-X (DRX) da argila 39
3.3.3 Fabricação das placas de compósitos 40
3.3.3.1 Cortes dos corpos de prova 43
3.3.4 Caracterização dos corpos de prova 45
3.3.4.1 Determinação das propriedades físicas 45
3.3.4.2 Ensaios mecânicos (tração e flexão) 46
3.3.4.3 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 47
3.3.4.4 Resistência à chama 48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 50
4.1 Difração de Raios-X (DRX) 50
4.2 Caracterização física 51
4.3 Ensaios mecânicos 52
4.3.1 Tração 53
4.3.1.1 Material compósito com inserção de argila 53
4.3.1.2 Material compósito com inserção de argila e tecido de juta 56
4.3.2 Flexão 60
4.3.2.1 Material compósito com inserção de argila 60
4.3.2.2 Material compósito com inserção de argila e tecido de juta 63
4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 65
4.5 Retardo à chama 68
5 CONCLUSÕES 70
5.1 Propostas para futuros trabalhos 71
REFERÊNCIAS 72

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais a crescente preocupação com o meio ambiente trouxe diversos estudos sobre materiais que causem menor impacto e que possam substituir, também, de maneira eficiente outros. Diante disso os compósitos abrangem uma ampla área de conhecimento, que envolve, por exemplo, polímeros reforçados com fibras, materiais híbridos com metal e compósitos e até concretos estruturais. Os compósitos, assim, incorporam no mínimo duas fases distintas – matriz e reforço - em nível macroscópico (LEVY NETO e PARDINI, 2016).

Hull e Clyne, em 1996, diziam que o termo compósito estava ligado a tecnologias de ponta (peças de satélites, aeronaves e helicópteros, por exemplo). E a origem dessa classe de materiais está em vários anos atrás, em compósitos chamados naturais, como ossos e tecidos musculares.

As matrizes dos compósitos podem ser poliméricas – termoplásticas, termoendurecíveis ou elastomérica. A matriz, nesses casos, tem o objetivo de absorver as deformações, dar suporte as fibras, partículas ou folhas. A fase reforço é responsável por melhorar algumas das propriedades desejadas, como propriedades mecânicas e térmicas (SIMÊNCIO, 2016).

A resina poliéster é de uma família de polímeros formados por meio da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis, que, ao reagirem, originam moléculas de cadeias longas lineares. A reação de síntese da resina poliéster uma polimerização por condensação em etapas, reação de um álcool (base orgânica) com um ácido – reação de esterificação - formando éster e água. As resinas poliéster possuem boas características térmicas, químicas e mecânicas (LEVY NETO e PARDINI, 2016).

Usar fibras naturais de origem vegetal em compósitos envolve, muito mais do que qualquer motivo, aspectos ambientais, sociais e econômicos. Em vista disso, a busca por matérias-primas renováveis e de baixo custo tem sido um fator muito importante para pesquisas relacionadas a novos materiais (ROWELL, 1997; KURUVILLA e MATTOSO, 2000). A fibra de juta é extraída do caule da planta por meio do corte. Uma das principais aplicações das fibras de juta é no artesanato (MÜSSIG, 2010).

A argila é um material natural e com características plásticas. As finalidades das argilas provêm dos argilominerais presentes em sua composição (GOMES, 1986). As argilas são resultado do intemperismo, da ação hidrotérmica ou que se depositaram como sedimentos fluviais, marinhos, dentre outros (SANTOS, 1989).

O presente trabalho tem como linha de pesquisa a avaliação de compósitos poliméricos com argila e tecido de juta. No decorrer da pesquisa foram evidenciadas composições mineralógicas da argila, além de características físicas, mecânicas e de retardo à chama dos materiais que foram fabricados por laminação manual, comparando os resultados tanto de compósitos apenas com argila quanto de compósitos com argila e tecido de juta.

1.1 Justificativa e motivação

A busca de novos materiais por diversos estudiosos levou a um aumento das pesquisas envolvendo compósitos utilizando fibras naturais como carga de reforço. As fibras naturais lignocelulósicas se caracterizam como ambientalmente corretas se comparadas as fibras sintéticas.

A justificativa principal para o trabalho está em produzir compósitos com matriz polimérica termofixa carregada com argila e tecido de fibra de juta para uso em construção civil. Visando o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis na região.

A motivação para a realização do presente trabalho baseia-se na necessidade de utilização de tecido de fibras lignocelulósicas, ecologicamente corretas. A incorporação de materiais menos poluentes e impactantes propicia melhoras na qualidade de vida tanto das atuais gerações como das gerações futuras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Fabricar e caracterizar compósitos com argila e compósitos com argila e tecido de juta – por meio do método de fabricação *hand lay up*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Viabilidade técnica de produção de compósitos poliméricos com adição argila caulinítica e tecidos de fibras de juta;
- Fabricar compósitos de matriz polimérica com argilas nas proporções em massa pré-determinadas de 0 %, 5 %, 15 % e 25 %, compósitos laminados com tecido de fibras de juta e compósitos com argila e tecido de juta, com o objetivo de avaliar os melhores resultados obtidos para cada composição;
- Realizar análises físicas de massa específica aparente (MEA), porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA) dos compósitos fabricados, com o propósito de analisar a influência dos constituintes;
- Avaliar o comportamento mecânico – resistência à tração e flexão – dos compósitos fabricados, com o objetivo de se obter o quanto o material suporta quando solicitado em força de tração e flexão até rompimento;
- Avaliar o retardo à chama de compósitos de matriz polimérica das séries fabricadas;
- Estudar, na fractografia, os mecanismos de falha dominantes para cada série de compósitos produzida e correlacionar as propriedades dos compósitos.

1.3 Composição do trabalho

A primeira seção apresenta, de maneira introdutória, sobre o que se trata o trabalho, as justificativas e motivações para a fabricação dos compósitos tanto só com argila como com argila e tecido de juta. Além de apresentar os objetivos gerais e específicos.

A segunda seção fornece ao trabalho embasamento teórico sobre os assuntos que a pesquisa irá tratar. Demonstrando o que outros estudiosos da área podem acrescentar como suporte.

A terceira seção traz os materiais e o métodos experimentais utilizados para a fabricação dos materiais compósitos. Mostra-se, ao máximo, tudo o que foi aplicado na confecção e caracterização.

A quarta seção apresenta os resultados e as discussões obtidas com a fabricação e caracterização dos materiais. Mostrando com auxílio de gráficos e tabelas da melhor maneira possível.

A quinta seção faz uma ligação de todos os resultados obtidos para a conclusão do trabalho. Mostra, de maneira sintetizada, se os objetivos do trabalho puderam ser alcançados e apresenta propostas para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais compósitos

Atualmente, o intenso desenvolvimento tecnológico que o mundo está passando, gera, por consequência, um consumo exagerado dos recursos naturais e, além disso, gera um descarte inadequado e intenso nos grandes centros urbanos de materiais que contaminam o ambiente. Afim de minimizar esse problema, diversos setores buscam materiais alternativos e/ou reaproveitamento de materiais naturais junto a outros para potencializar a criação de materiais que não prejudiquem o meio ambiente (RODRIGUES *et al*, 2015).

Um material é considerado como um compósito quando neste há a junção de dois ou mais materiais de diferentes naturezas. No próprio meio ambiente há materiais compósitos, assim como pode-se produzir o mesmo. Este material possui duas fases, uma chamada de matriz e outra é a fase dispersa. A matriz pode ser de natureza cerâmica, polimérica ou até mesmo metálica e a fase dispersa pode incluir as fibras ou particulados que são cargas (SILVA, 2014).

Em se tratando dos reforços, é notável que em sua maioria é utilizado em forma de fibras, por darem ao material maior rigidez e uma densidade mais baixa. Apesar da já existência e aplicação das fibras sintéticas a compósitos, a descoberta de fibras naturais vem crescendo ao longo dos anos por meio de diversos estudos. Algumas das quais podem ser citadas as fibras de algodão, juta, sisal, linho, dentre outras (CHAWLA, 2012).

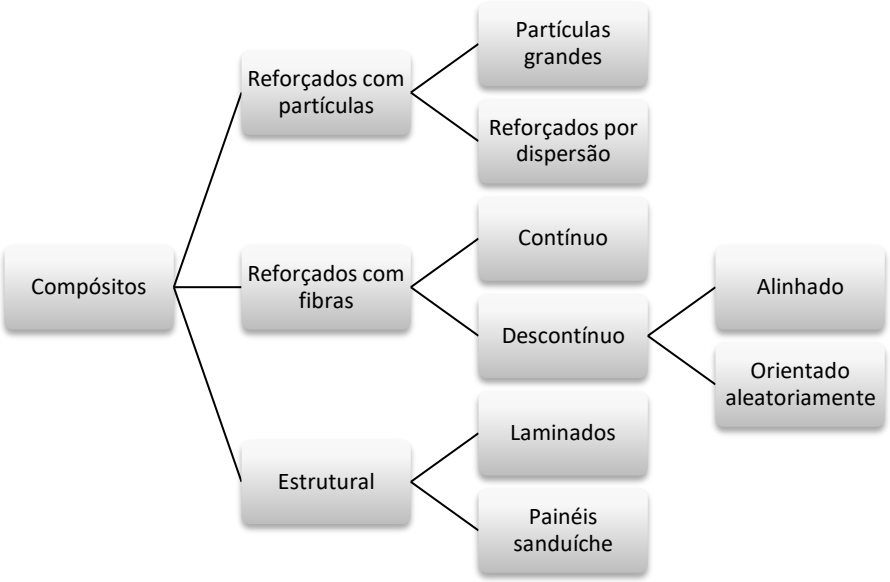
Com relação as suas características, os materiais compósitos possuem alta rigidez, boa resistência mecânica e uma de suas maiores vantagens é a baixa densidade se comparado a materiais metálicos e cerâmicos, por exemplo. A fase considerada reforço no compósito proporciona a rigidez necessária ao material. Em, praticamente, a maioria dos casos o reforço é mais rígido que a matriz. Em comparação aos compósitos em forma de fibras, os particulados são geralmente mais fracos, porém mais acessíveis quanto a valores (CAMPBELL, 2010).

Muitas aplicações que não exigem uma alta resistência na indústria de automóveis começaram a ser desenvolvidas utilizando os materiais naturais. E esses

estudos não são muito recentes, iniciou com Henry Ford e, nos dias atuais algumas empresas já usam na fabricação desses automóveis (BAILLIE, 2005).

Os compósitos possuem como características o fato de a resistência mecânica e as propriedades serem superiores aos materiais que o compõe separadamente. Essas mesmas propriedades dos materiais compósitos iram depender das características dos constituintes, geometria e arranjo de fases. A disposição do reforço no compósito irá determinar a conformidade do sistema. As fases do material possuem diferentes papeis que irá depender do tipo e dos componentes do composto (DANIEL e ISHAI, 2006). O esquema da Figura 1 mostra como os materiais compósitos podem ser classificados.

Figura 1 – Esquema de classificação dos materiais compósitos.



Fonte: Simêncio, 2016.

2.2 Compósitos reforçados com fibras

Ao longo dos anos o interesse pela utilização de materiais que empregam fibras em sua composição aumentou. Isso se deve a pesquisas realizadas e aplicadas em diferentes áreas. As fibras mais empregadas são as sintéticas, por possuírem uma boa resistência e baixa densidade. Contudo, as fibras naturais estão ganhando cada vez mais espaço por serem facilmente encontradas, possuírem propriedades semelhantes as sintéticas e, principalmente, não prejudicarem o meio ambiente, sendo assim degradadas com mais facilidade (MARINELLI *et al*, 2008).

Os estudos com materiais que possuam elevada resistência, baixa densidade para aplicações em várias áreas e boa rigidez envolvem sempre os compósitos reforçados com fibras. Algumas das aplicações que podem ser citadas são em aviões, navios, automóveis e estruturas na engenharia civil. Para que as fibras possuam elevada resistência mecânica sendo assim utilizadas como reforço é necessário que as fibras alinhem-se com a carga para que a carga seja transferida para as fibras. Outro ponto considerado importante é a necessidade das fibras estarem dispostas de maneira que seja fácil manipular e usá-las como reforço (CAMPILHO, 2005).

As características de polímeros reforçados com fibras dependem diretamente das proporções utilizadas na confecção dos mesmos e da geometria da fase dispersa. Além disso, é dependente também da orientação, distribuição, comprimento e da aderência da interface entre a matriz e a fibra (DIBENEDETTO e JONES, 2001).

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais possuem um grande potencial para aplicações em situações que exijam um esforço de leve a moderado. Porém, alguns empecilhos devem ser considerados, como a alta absorção de água por parte dessas fibras. Uma boa solução para esse problema seria a união das fibras sintéticas as naturais. A fibra de vidro pode ser considerada um adequado meio de resolução para essa hibridização (DA SILVA *et al*, 2008).

2.3 Compósitos reforçados com partículas

A adição de cargas em polímeros está sujeita a mudanças que possam vir a ocorrer em suas propriedades. Essa mudança está relacionada com o tamanho das partículas, da forma e da dureza que as mesmas apresentam. A concentração e a interação da matriz polimérica com o particulado (BALBINO *et al*, 2017).

Existe uma certa dificuldade em se produzir compósitos reforçados com fibras e partículas, pois não há como saber as propriedades finais do produto. Muito desse impasse se deve a escassez de pesquisas desenvolvidas nesse sentido, principalmente de estudos sobre a resistência mecânica desses materiais (CASARIL *et al*, 2006).

Apesar disso, algumas pesquisas puderam ser realizadas utilizando partículas nanométricas como carga, buscando com isso a aplicação dessas como reforço.

Nanocompósitos poliméricos são uma realidade de recentes pesquisas, esse modelo de compósito acontece quando as partículas em tamanhos nanométricos interagem com a matriz também em escala nanométrica. As argilas bentoníticas são as mais utilizadas como reforço em nanocompósitos poliméricos. Reforços utilizados de forma híbrida – fibra/particulado – é uma saída para melhorar as propriedades do material (JOSÉ NETO *et al*, 2007).

2.4 Métodos de fabricação dos compósitos

Alguns processos são mais usuais quando se trata da fabricação dos compósitos. Os processos que utilizam o molde aberto são de certa forma mais simples e mais usuais. Na laminação manual (*hand lay up*) a fibra, tecido ou manta é disposta sobre o molde e é impregnada com a resina, são feitas as camadas necessárias e a cura é feita a temperatura ambiente (KELLY e MILEIKO, 1983).

Algumas das vantagens do método *hand lay up* envolvem a capacidade de poder produzir materiais grandes e de boa complexidade, é de baixo custo no que diz respeito a equipamentos e ferramentas. Além disso, há uma flexibilidade na fabricação do material e é possível haver alterações estruturais (AGARWAL, BROUTMAN e CHADRASHEKHARA, 2015).

Apesar de haver muitas vantagens no processo de laminação manual, é importante citar as desvantagens do mesmo. Por ser um método demorado em sua realização, necessita de tempo considerável na produção. Além disso, o resultado final do material vai depender da prática e competência de quem o estar produzindo. O tempo de cura do material é longo por ser em temperatura ambiente, além de ser mais difícil manter a uniformidade do produto em uma única peça e poder ter alto desperdício. Das aplicações para esse modelo de fabricação, pode-se citar a produção de barcos (MARINUCCI, 2011; AGARWAL, BROUTMAN e CHADRASHEKHARA, 2015).

Kelly e Mileiko (1983) ainda citam o processo por injeção que é utilizado quando há a necessidade de rápida produção e de peças com formatos variados. A injeção de resina é realizada em molde fechado onde há o reforço. Existe também a laminação feita com pistola (*spray up*) em que a mistura no compósito é posta diretamente sobre o molde.

2.5 Matriz polimérica

As matrizes poliméricas podem ser de dois tipos: termoplásticas e termorrígidas. As primeiras são formadas por macromoléculas individuais lineares sem reticulação. Na maioria dos casos, os termoplásticos se caracterizam por apresentarem maior resistência ao impacto e maior tenacidade. Com relação ao seu processamento, podem ser obtidos por injeção ou termoformação, além de poderem ser reciclados (MOURA *et al*, 2010).

Os materiais compósitos poliméricos termorrígidos são os mais utilizados no fábrico dos compostos, isso porque apresentam maior facilidade de impregnação do reforço. Para que seja possível produzi-lo é necessária a utilização de uma resina, acelerador e catalisador, que ao reagir iram endurecer. Isso pode acontecer tanto em temperatura ambiente quanto aquecido (CUPERTINO, 2009). Moura *et al* (2010) ainda menciona que esses três elementos quando misturados promovem a polimerização em um procedimento que se conhece como “cura” do material, além disso em alguns compósitos que utilizam o polímero termorrígido é necessária a aplicação de pressão para a “cura”.

Dentre os termoplásticos mais usuais estão o polietileno (PE), o poliestireno (PS), o polipropileno (PP) e cloreto de polivinila (PVC). E das matrizes poliméricas termorrígidas as mais conhecidas e utilizadas são o poliéster, epóxi e o fenol-formaldeído (CUPERTINO, 2009).

2.5.1 Polímeros

O polímero é uma macromolécula que possui a unidade de repetição chamada de meros, a ligação entre essas moléculas é do tipo covalente. O polímero é constituído de monômero e pode ser dividido em plásticos, borrachas e fibras. Algumas de suas propriedades físicas podem depender da massa molar. Os materiais poliméricos podem ser obtidos de diferentes formas, existem algumas fontes de matérias-primas (que iram fornecer os monômeros para, assim, obter os polímeros). Essas fontes podem ser naturais, que são obtidas pelo homem na natureza em forma de macromoléculas, para depois sofrer algumas modificações e transformar-se em um polímero mercantil. Existem, também, as obtenções por meio do carvão mineral,

onde utiliza-se uma destilação seca. E, por fim, a aquisição do polímero utilizando o petróleo, que utiliza a destilação fracionada do óleo cru (CANEVAROLO JR, 2002).

De acordo com Paoli (2009), os materiais poliméricos são de extrema importância no que se refere as aplicações no cotidiano das pessoas. Ele está presente em artefatos plásticos, em vestimentas, embalagens, meios de transportes, dentre outros. Existem os homopolímeros e os copolímeros, os primeiros ocorrem quando provenientes de uma única unidade repetitiva monomérica e o segundo quando existem duas ou mais unidades repetitivas monoméricas que se diferem.

A estrutura macromolecular dos polímeros é outro fator de extrema importância. Pois esses materiais poliméricos precisam ter uma boa resistência mecânica e essa resistência está ligada a compactação das moléculas, ou seja, depende do grau de compactação. As propriedades físicas dos polímeros envolvem as ligações covalentes, a firmeza dos segmentos na cadeia polimérica e a constância das forças intermoleculares (MANO e MENDES, 2004).

Mano e Mendes (2004) ainda afirmam que as propriedades tecnológicas, observadas a partir de composições moldáveis de plásticos ou fibras, irão depender de formulações e do processamento do material fabricado. Os mesmos irão ser submetidos a ensaios e é muito importante observar as condições de processamento utilizadas para conformação das peças. A elasticidade do polímero é uma característica bem presente e isso pode ser observado em materiais que sejam submetidos a deformação, tanto por tração quanto por compressão. Apesar disso, sua elasticidade irá depender da natureza química, da velocidade e da temperatura no momento da deformação. É possível classificar a deformação em elástica e plástica, a primeira é reversível, já a segunda é uma deformação permanente e irrecuperável. A deformação plástica em produtos acabados causa um impacto negativo e é prejudicial, dificultando a aplicação em situações que exijam uma elevada força, principalmente durante períodos muito longos e de elevada temperatura. Em materiais compósitos a matriz (geralmente polimérica) e o reforço irão atuar em conjunto buscando melhorar as propriedades do material, essencialmente no que se refere a resistência.

2.5.2 Resina poliéster

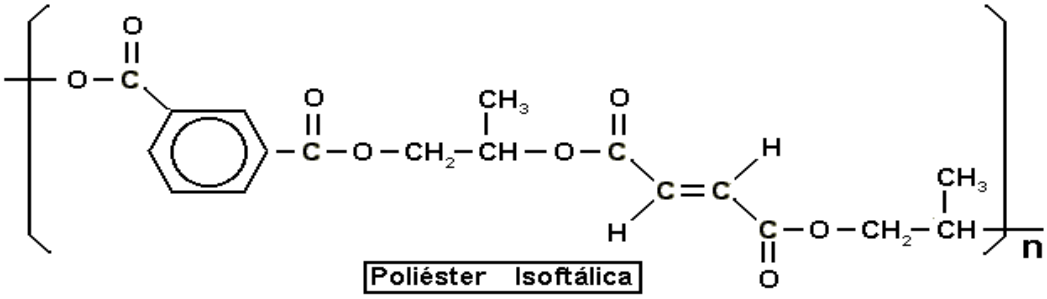
O poliéster está presente na classe de polímeros insaturados. Eles normalmente são encontrados reforçados, geralmente, com algum tipo de fibra. A fibra mais comum de ser empregada como reforço na resina poliéster é a fibra de vidro. Dentre as aplicações desse compósito, de resina e fibra de vidro, destaca-se a produção de cascos de barco, em pranchas de *surf*, estrutura externa de caminhões, dentre outros. A resina poliéster tem como características a alta resistência mecânica e boa tenacidade (CANEVAROLO JR, 2002).

Além disso, Sanchez *et al* (2010) afirma que o uso das resinas termofixas ganham destaque em pesquisas atuais. Isso porque possuem algumas vantagens importantes como o baixo custo, estabilidade térmica e dimensional quando se trata de sua estrutura molecular, boa resistência química quando submetida a altas temperaturas e uma certa facilidade em moldar o modelo que se deseja.

Aquino (2003) afirma que as características mais importantes na resina poliéster são o baixo custo, a cura em temperatura ambiente, ótimas propriedades quando funciona como matriz em compósitos e boa resistência química. Ademais, a resina é amplamente utilizada e possui boas propriedades elétricas. Suas limitações, no entanto, são a emissão de estireno, contração durante a cura do material e é inflamável.

As resinas poliéster mais utilizadas são as ortoftálicas e as isoftálicas. As primeiras originam-se de ácidos ftálicos e anidrido, são utilizadas em telhas, *gel coat* e botões. Já as segundas (Figura 2) são obtidas de poliésteres com alta massa molecular, assim possuem uma estrutura com maior resistência química e mecânica, além de absorver melhor os impactos. São mais utilizadas em peças com contato direto em ambientes agressivos (MOREIRA, 2008).

Figura 2 – Estrutura molecular da resina poliéster isoftálica.



Fonte: Silaex, 2019.

2.6 Fibras

As fibras são reforços dos compósitos que, de fato suportam carregamento mecânico. Fibras comerciais são produzidas por três processos, que são fiação por fusão, a úmido e a seco. A fibra atua como um bom meio de reforço pois apresenta um menor número de defeitos. Isso explica-se por meio da espessura das fibras, quanto mais fino é o material, os mesmos tendem a apresentar um menor número de defeitos, diminuindo o número de falhas e melhorando a resistência do material (LEVY NETO e PARDINI, 2016).

Diversos tipos de fibras são utilizados em compósitos poliméricos, como o vidro, aramida e fibra de carbono. Um material que não se apresenta em fibra, ou seja, um material que está em sua forma original tem mais chances de falhas e, por tanto, sua resistência é menor. Quanto menor o diâmetro e comprimento da fibra, maior é a força máxima que irá suportar o material (CAMPBELL, 2010).

2.6.1 Tipos de fibras

As fibras, primeiramente, se dividem em naturais e sintéticas. A fibras naturais são fornecidas pela própria natureza e as sintéticas são produzidas pelo homem, utilizando insumos da natureza. Dentre as fibras sintéticas a fibra de vidro é uma das mais conhecidas e utilizadas. São obtidas, primordialmente, por estiramento de vidro fundido com o auxílio de uma fieira, onde a temperatura de fusão é por volta de 1260°C e está sujeita a tratamentos superficiais (MOURA *et al*, 2010).

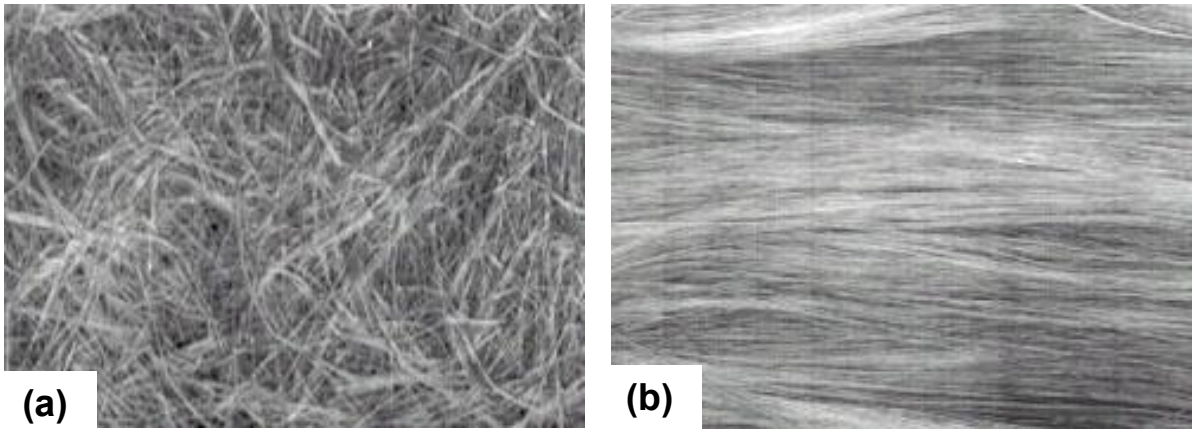
As fibras naturais como o sisal, a juta, o algodão e fibra de coco são fibras abundantes em países com grande potencial agrícola como o Brasil, porém existe certa preocupação quanto a exploração desses recursos, pois os mesmos são, ainda, explorados de maneira inadequada. A incorporação de fibras lignocelulósicas em matriz polimérica já é algo relativamente conhecido dos pesquisadores brasileiros, essas pesquisas geram novos materiais que apresentam propriedades, principalmente mecânicas, interessantes (NASCIMENTO, DIAS e DOMINGOS, 2018).

Existem as fibras de carbono e grafite, que possuem o mais alto desempenho para um compósito, possuem grandes propriedades. A resistência a tração e compressão dessas fibras são bem altas, apresentam boa resistência a fadiga e a corrosão. As fibras de carbono possuem grafite e material carbonáceo não-grafítico. As fibras poliméricas possuem significativa importância em reforços para compósitos. Dentre elas destaca-se a fibra de aramida que possui uma alta resistência mecânica e estabilidade térmica. Além do uso em reforços para compósitos, também estão presentes em agasalhos resistente ao fogo, filtros de ar quente e cabos (CAMPBELL, 2010; LEVY NETO e PARDINI, 2016).

2.6.2 Disposição das fibras

As fibras podem estar dispostas aleatoriamente ou direcionadas (Figura 3). Compósitos com fibras longas são chamados de compósitos reforçados com fibras contínuas e os com fibras curtas são chamados de compósitos reforçados com fibras descontínuas. Nos com fibras descontinuas, o comprimento da fibra pode afetar as propriedades dos compósitos, já nas contínuas presume-se que a carga é aplicada diretamente nas fibras (AGARWAL, BROUTMAN e CHADRASHEKHARA, 2015).

Figura 3 – Fibras aleatória (a) e fibras direcionadas (b).



Fonte: Joseph, Medeiros e Carvalho, 1999.

A fibras podem apresentar-se de algumas formas. Em *roving* (Figura 4) a fibra está em filamentos contínuos, todos enrolados helicoidalmente em bobinas. Pode ser usada na produção de fibras curtas, tecidos ou serem processadas para virarem mantas. Outro jeito de apresentar-se é como manta (Figura 5), onde as fibras distribuem-se aleatoriamente e são aglomeradas por um ligante especial, tem bom acabamento superficial e possuem maior resistência química. Existem também os tecidos entrelaçados (*woven fabrics*), onde há o entrelaçamento de fibras (Figura 6) em direções perpendiculares (MOURA *et al*,2010).

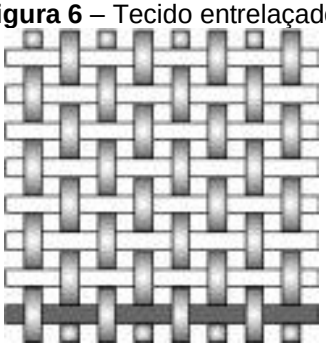
Figura 4 – Fibra natural em roving.

Fonte: Revista têxtil, 2017.

Figura 5 – Fibra natural em manta.

Fonte: MateriaMundi, 2019.

Figura 6 – Tecido entrelaçado.



Fonte: Net composites, 2019.

2.6.3 Fibra de juta

A fibra de juta (Figura 7) é uma fibra têxtil vegetal, alcança uma altura de 3 a 4 metros e o talo possui 20 mm de espessura. Cresce em climas úmidos e tropicais. A fibra que interessa se encontra entre a casca e o talo interno, a extração é feita por meio do processo de maceração (SOUZA *et al*, 2018).

Figura 7 – Tecido de juta.

Fonte: BrasilJuta, 2016.

A juta é produzida de maneira artesanal, por meio de processos manuais e onde há mão-de-obra barata. O ciclo de produção da juta envolve primeiramente o

semeio e tratamento, após vem a maceração e a extração das fibras. E por fim a lavagem e secagem das fibras (ALMEIDA, 2012).

A fibra de juta é uma das mais baratas fibras naturais. Apenas o algodão supera a juta em quantidade produzida e número de aplicações no mundo. É plantada em calhas de rios, com isso, não provoca desmatamento. Sua época de plantio geralmente é entre os meses de agosto e janeiro. A produção de juta mundial anual (2009) superou três milhões de toneladas, com a maior produção pertencente a Índia. A juta em materiais compósitos é utilizada em revestimentos laterais de automóveis (PIRES, 2009).

2.7 Particulados

É comum dizer que um compósito que possui partículas como carga é um compósito particulado (CHUNG, 2010). E esse tipo de compósito consiste em partículas de um ou mais materiais dispostos em uma matriz de outro material (JONES, 1999).

As partículas podem apresentar variedade de geometrias, mas suas dimensões devem ser próximas em todas as direções. O reforço se torna efetivo quando as partículas são bem pequenas e estão distribuídas de maneira homogênea na matriz. Propriedades mecânicas aumentam a medida que aumenta o teor de partículas. Elastômeros e plásticos são rotineiramente reforçados com materiais particulados (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2016).

2.7.1 Argila

Santos (1989) afirma que a argila é um material natural, terroso e de granulação fina que, quando misturado a água, obtém certa plasticidade. Como características químicas, as argilas possuem silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. As argilas possuem em sua constituição partículas cristalinas bem pequenas, que são os chamados argilominerais. Além dos argilominerais, as argilas também possuem outros materiais e minerais, como a matéria orgânica, sais solúveis, assim como também partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dentre outros minerais residuais.

No Brasil, existem indústria que utilizam argilas de diversos tipos, como a indústria cerâmica que utiliza argilas na fabricação de cerâmica vermelha, cerâmica branca e de material refratário. As indústrias de borrachas e plásticos que utilizam como cargas ativas e inertes (SANTOS, 1989).

Uma das razões para a popularidade das argilas é a facilidade de conformação dos produtos que são à base de argila. Os produtos provenientes das argila podem ser divididos em duas classificações, a primeira são os produtos estruturais à base de argila – onde enquadram-se os tijolos de construção, os azulejos e tubulações de esgoto – e a segunda são as louças brancas, como as porcelanas, vasos de argila e louças como as de mesa (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2016).

2.8 Ensaios mecânicos

De acordo com Garcia, Spim e Santos (2000), projetos na engenharia necessitam de um estudo aprofundado das características, propriedades e comportamento dos materiais que estão a disposição. A escolha dos materiais para diversas finalidades implica na realização de ensaios, métodos normalizados que tem o objetivo de demonstrar as propriedades mecânicas e como é o comportamento quando submetidos a situações de esforço.

Diante disso, os ensaios mecânicos irão determinar as propriedades mecânicas referentes ao comportamento do material. As tensões demonstram a resposta interna do material quando submetido a esforços externos sob uma determinada área. As finalidades dos ensaios de materiais incluem a aquisição de informações do produto e o desenvolvimento de novas informações sobre determinado material, ou seja, no fabrico de novos materiais (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2000).

2.8.1 Tração

A capacidade de suportar determinada carga até ruptura é característica da resistência do material. O ensaio de tração é um dos mais importantes quando se quer determinar a resistência de certo produto. De todas as propriedades que esse teste pode informar sobre o material, a determinação da relação entre a tensão normal

média e a deformação normal média é a mais importante. Esse ensaio é usado em materiais da engenharia como polímeros, metais, cerâmicos e compósitos (HIBBELER, 2010).

No ensaio convencional, de tração, para avaliação das propriedades mecânicas, a tensão convencional (σ_c) é dada pela equação 1 (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2000):

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0} \tag{1}$$

Onde σ_c é a tensão (em PA), P é a carga aplicada (em N) e S_0 a seção transversal (em m^2).

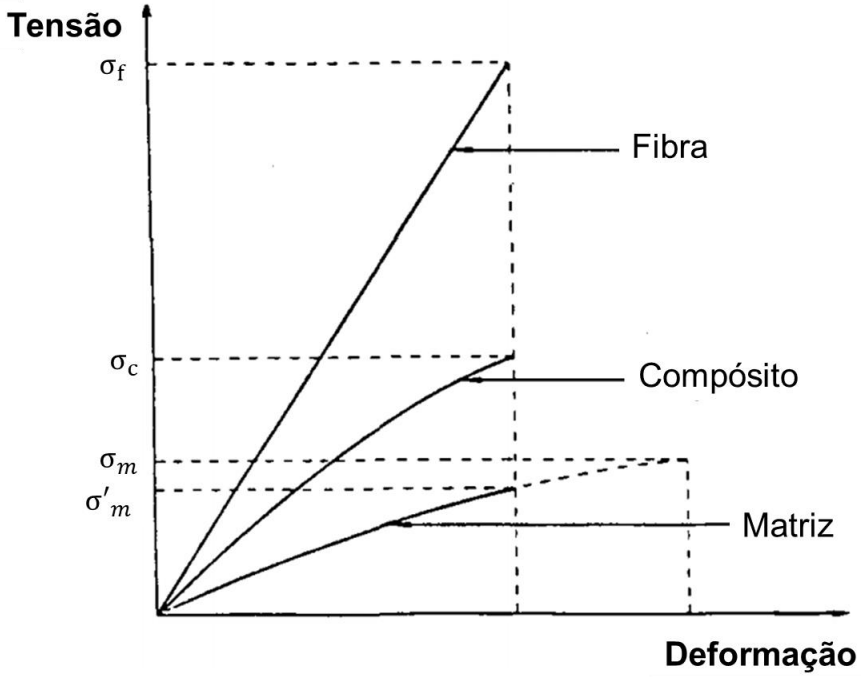
E a deformação convencional (ε_c) é mostrada na equação 2:

$$\varepsilon_c = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2}$$

Onde ε_c é a deformação (de natureza adimensional), o l_0 é o comprimento inicial de referência (em metros) e l o comprimento de referência para cada carga P aplicada (também em metros).

O gráfico da Figura 8 mostra as curvas de tensão-deformação da fibra, matriz e compósito.

Figura 8 – Gráfico da curva de tensão-deformação para fibra, matriz e compósito.



Fonte: Adaptado de Vinson e Chou, 1975.

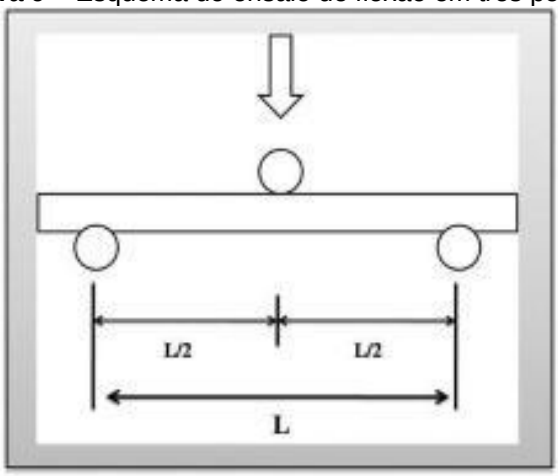
A resistência a tração em compósitos é denominada, em grande parte, pelas propriedades dos reforços. Em compósitos reforçados com tecidos, se a força de tração for paralela ao tecido entrelaçado (0°), predomina a propriedade das fibras. Já se carga for aplicada a, aproximadamente, 45° em relação a trama do tecido, predomina as propriedades da matriz. Alguns fatores interferem nos resultados dos ensaios de tração para compósitos reforçados por fibras ou tecidos, como o controle na preparação dos corpos de prova, as tolerâncias dos corpos de prova e o condicionamento e variabilidade da umidade (LEVY NETO e PARDINI, 2016).

2.8.2 Flexão

A flexão é um estudo muito realizado em componentes de máquinas e componentes estruturais, como as vigas. Peças que sofrem flexão podem apresentar grandes deformações. Ao ser flexionada a estrutura se deformará, e nas seções transversais e em cada ponto dessas seções iram ocorrer pressões normais de compressão, de tração e tangenciais de cisalhamento. A pressão é a força dividida pela área e é comum utilizar em situações de compressão (BEER *et al*, 2011; BOTELHO, 1998).

O ensaio de flexão se baseia na aplicação de uma carga crescente em determinado ponto de um material de geometria padronizada. Pode estar bi apoiado ou preso em uma das extremidades. O ensaio pode ser à três pontos, ensaio em quatro pontos e o ensaio de engaste. O ensaio de três pontos (Figura 9) é o mais comum, ele consiste na aplicação de uma carga P no centro do corpo de prova que está apoiado em dois pontos, a carga aumenta gradativamente até ruptura do corpo de prova (GAMA, 2017).

Figura 9 – Esquema do ensaio de flexão em três pontos.



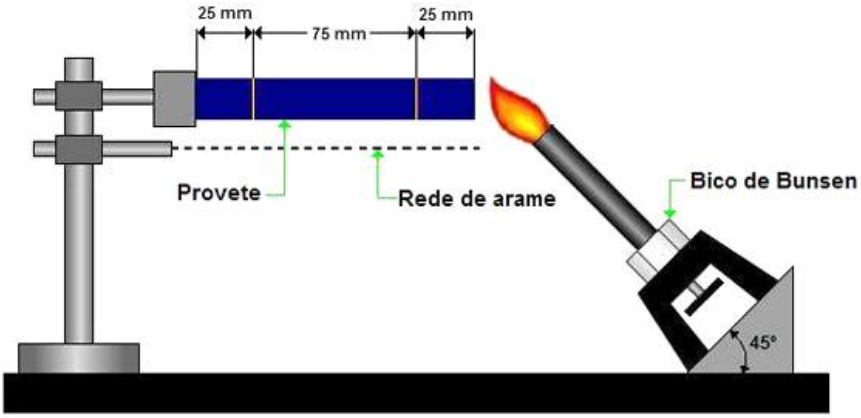
Fonte: Holanda, 2013.

2.9 Ensaio de flamabilidade

Em algumas situações, evitar a combustão de certo material é muito importante. Com isso, cresce o desenvolvimento de novos materiais retardantes de chama e a velocidade de propagação desta. A resistência ao fogo é considerada uma diminuição na velocidade de queima quando está recebendo a chama da fonte de calor (BARBOSA, CARVALHO e CANEDO, 2014).

Para o ensaio de flamabilidade algumas normas podem ser aplicadas, como a IEC 60695-11-10, a ASTM D635 e UL94. O método mais usual, UL94 (1996), consiste em incidir a chama em um corpo de prova – que está a 45° - de, aproximadamente, 125 mm, deve ser registrado o tempo necessário para atingir a marca de 100 mm - após passar a primeira marca de 25 mm (CAETANO, 2019). Como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Ensaio usual de resistência à chama segundo norma UL94.



Fonte: Caetano, 2019

2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A função do microscópio eletrônico de varredura (MEV) é poder observar o que estiver em tamanho tão pequeno que não é possível enxergar a olho nu. O microscópio eletrônico de varredura irá utilizar um feixe de elétrons, que possibilitará observar o material em sua estrutura. Com o aparelho de MEV as informações sobre a morfologia e elementos químicos presentes são fornecidas rapidamente. O que chama muita atenção no MEV é a possibilidade de gerar amostras com aparência tridimensional, isso ocorre devido a boa profundidade de campo (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

A utilização do aparelho é muito rotineira em áreas como a engenharia, biologia, química, farmácia, geologia, dentre outras. A alta resolução que o MEV oferece explica sua rotineira utilização em diversos casos, isso porque é possível observar as características microestruturais de diversos materiais. Instrumentos de MEV em pesquisas avançadas atingem uma resolução melhor que 1 nm (NAGATANI *et al*, 1987).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

Na etapa de fabricação dos corpos de prova foram utilizados alguns materiais, como pode ser observado no item seguinte.

3.1.1 Matriz polimérica

Para a fabricação das placas de compósitos foi utilizada como matriz a resina poliéster isoftálica adquirida da empresa Centerglass (Figura 11a). A resina possui coloração amarelada e é ausente de acelerador em sua composição, possui boa resistência química. Com densidade de 1,15 g/cm^3 segundo ficha do fabricante.

Juntamente a resina utilizou-se acelerador de cobalto denominado como CAT MET UMEDECIDO - octoato de cobalto – em proporção de 1,5 % em v/v, adquirida da empresa Aerojet fiberglass (Figura 11b). E foi utilizado, adicionado a resina, o catalisador comercial Butanox (Figura 11c) – peróxido de metil etil cetona [MEK-P] – também da empresa Aerojet brasileira de fiberglass LTDA, em proporção de 1 % v/v. Para desmoldar o material foi utilizado desmoldante Desmojet líquido da empresa Aerojet (Figura 11d);

Figura 11 – Resina poliéster isoftálica (a), acelerador de cobalto (b), catalisador MEK-P. (c) e desmoldante Desmojet (d).

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.1.2 Argila

Utilizou-se argila proveniente da região de várzea do distrito de Icoaraci, região metropolitana de Belém. A mesma foi peneirada em peneira de 100 *mesh* (Figura 12).

Figura 12 – Argila proveniente do distrito de Icoaraci após peneiramento (100 *mesh*).

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.1.3 Fibra de juta

O tecido de fibra de juta (Figura 13) foi obtido no comércio de Belém-PA, com gramatura de 2,66 g/m^2 segundo o fabricante e foi armazenada nas devidas condições de umidade e temperatura.

Figura 13 –Tecido de juta proveniente do comércio de Belém.

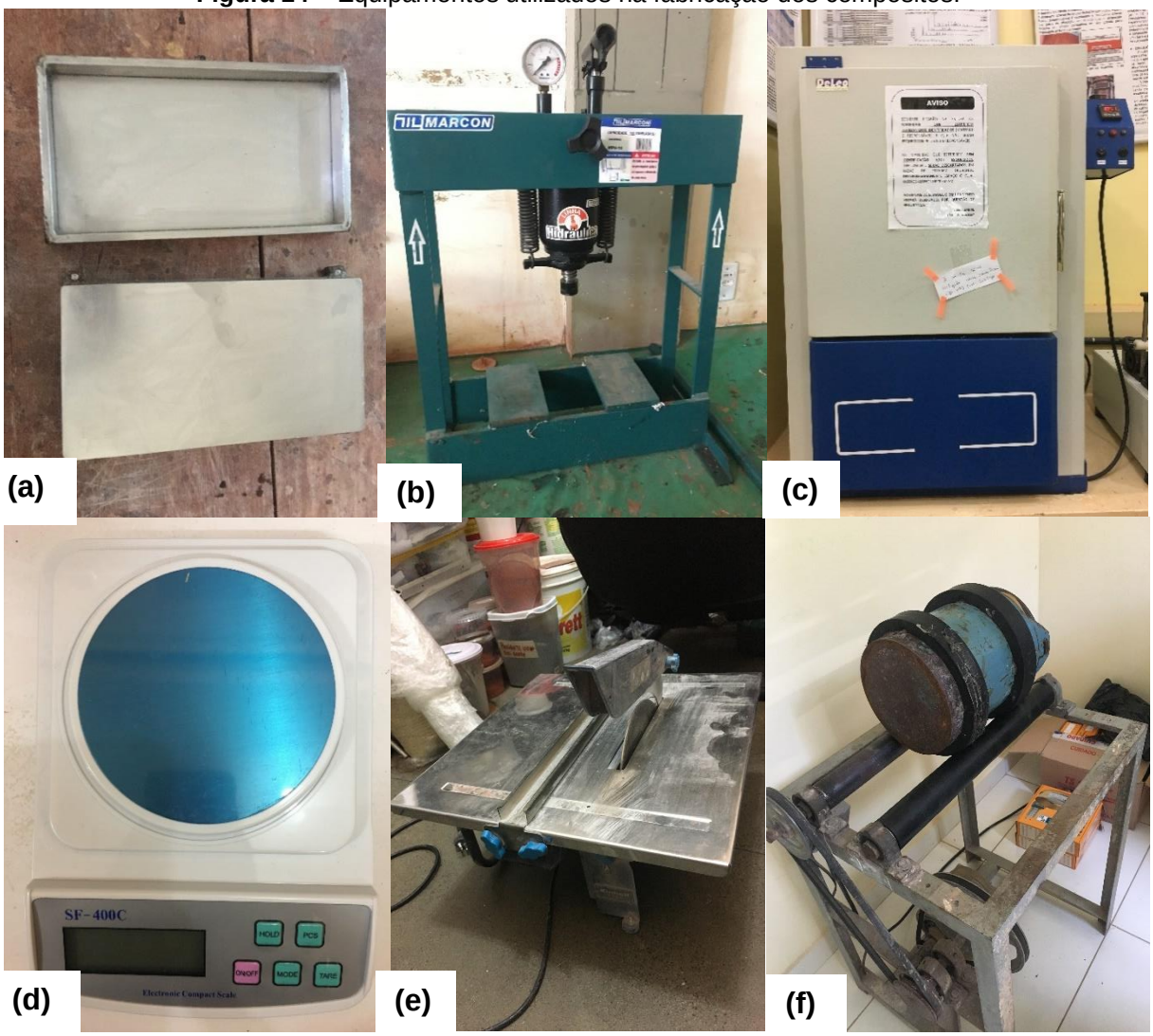
Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados na fabricação dos compósitos foram do Laboratório de Engenharia Química (LEQ), da Usina de Materiais (USIMat) na Universidade Federal do Pará. Foram os seguintes:

- Molde metálico retangular inoxidável de tamanho 32,1 cm x 17,3 cm (Figura 14a);
- Prensa hidráulica da Marcon, de modelo MPH-10, para até 10 toneladas (Figura 14b);
- Estufa DeLeo, utilizada na temperatura de 105 ºC (Figura 14c);
- Balança analítica da *eletronic compact scale*, SF-400C (Figura 14d);
- Serra circular de bancada, Einhell, modelo BT-TC900S, para o corte dos corpos de prova (Figura 14e);
- Moinho de bolas (Figura 14f).

Figura 14 – Equipamentos utilizados na fabricação dos compósitos.



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3 Procedimento experimental

3.3.1 Preparação das matérias-primas

A argila foi obtida do distrito de Icoaraci, região metropolitana de Belém. Primeiro a argila foi para a estufa para secagem durante 24 horas à 105 ºC e posteriormente foi desagregada em moinho de bolas. Após, foi utilizada peneira de 100 *mesh* (0,149 mm) para a obtenção da granulometria desejada para a confecção dos materiais compósitos.

A juta foi utilizada como tecido, não houve variação na quantidade de camadas do tecido de juta, ou seja, em todo a pesquisa foram fabricadas placas de compósitos com apenas uma camada de juta (variou-se apenas a porcentagem de argila). O tecido foi cortado nas dimensões do tamanho do molde metálico (32,1 cm x 17,3 cm). O formato como ela foi disposta no molde pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 – Fibra de juta disposta em molde metálico.

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3.2 Análise por Difração de Raios-X (DRX) da argila

Foi realizada a análise por difração de raios-X da amostra da argila utilizada (argila do distrito de Icoaraci). Primeiramente foi diminuição dos tamanhos da partícula, com um almofariz e um pistilo, conforme demonstra a Figura 16. As análises foram realizadas por meio de um equipamento de Difratômetro de Raios-x, importante para a observação das fases cristalinas presentes no material.

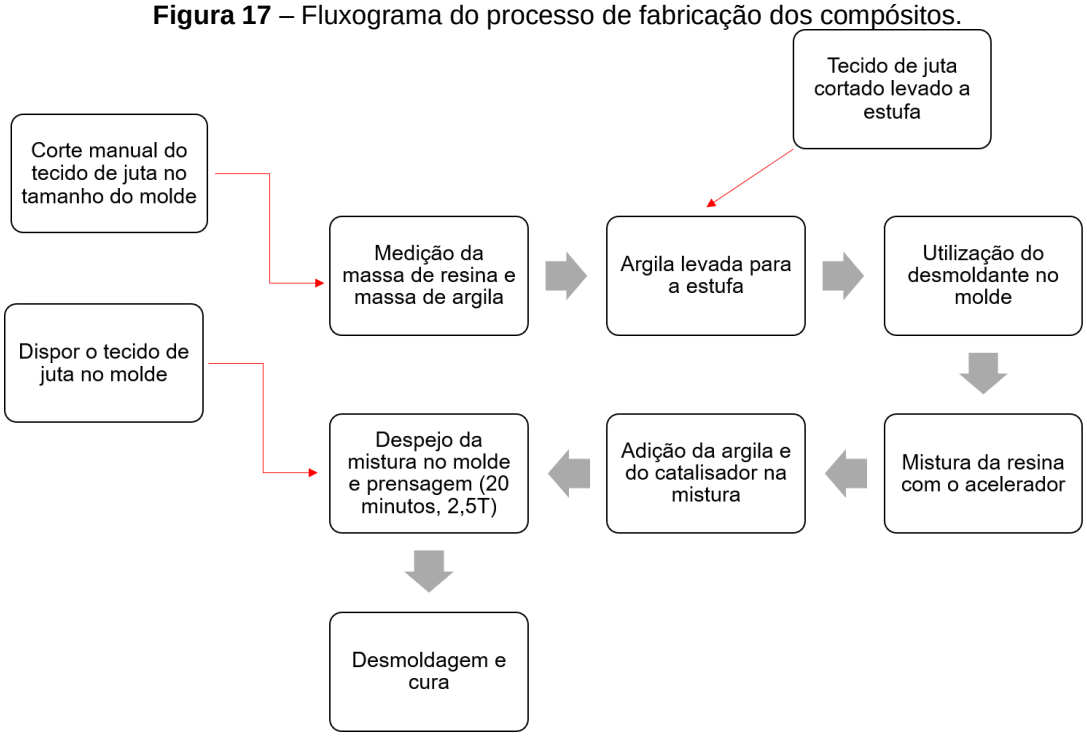
Figura 16 – Preparação da amostra para realização da análise por difração de raios-x (DRX).

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3.3 Fabricação das placas de compósitos

O processo de fabricação dos materiais compósitos pode ser observado no fluxograma da Figura 17. O processo utilizado foi o *hand lay up*.

Figura 17 – Fluxograma do processo de fabricação dos compósitos.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Além da fabricação de compósitos apenas com resina e argila, fabricou-se, também, compósitos utilizando a argila junto ao tecido de juta – ambos funcionaram como fase dispersa. As fabricações destes dois tipos de composições foram realizadas com o intuito de comparar seus resultados.

Para a fabricação dos compósitos foi necessária, primeiramente, a realização de cálculos para a determinação da quantidade de resina (em massa) e, consequentemente, da quantidade de argila (também em massa). Além disso, foi necessária a determinação da quantidade de acelerador (1,5 %) e catalisador (1 %) para cada composição. As quantidades determinadas podem ser observadas na Tabela 1, onde observa-se que está incluso tanto para as placas somente de argila quanto para as com argila e tecido de juta.

Tabela 1 – Determinação das quantidades para a confecção das placas.

Resina (g)	Argila (%)	Argila (g)	Fibra (camadas)	Fibra (%)	Fibra (g)	% Mek	Mek (ml)	% Co	Co (ml)
276	0	0	0	0	0	1	2,76	1,5	4,14
262,2	5	13,8	0	0	0	1	2,62	1,5	3,93
234,6	15	41,4	0	0	0	1	2,34	1,5	3,51
207	25	69	0	0	0	1	2,07	1,5	3,10
263,39	0	0	1	4,56	12,61	1	2,63	1,5	3,95
249,59	5	13,8	1	4,56	12,61	1	2,49	1,5	3,74
221,99	15	41,4	1	4,56	12,61	1	2,21	1,5	3,32
194,39	25	69	1	4,56	12,61	1	1,94	1,5	2,91

Fonte: Autoria própria, 2019.

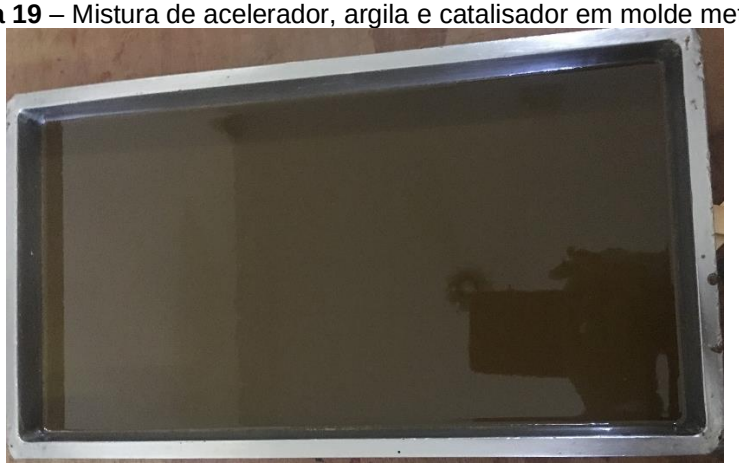
Para a fabricação dos compósitos primeiramente é necessária a medição da quantidade de resina e de argila. A argila foi seca em estufa a 105 ºC durante 20 minutos. Para as placas híbridas, o tecido de juta já cortado também foi para a estufa junto a argila. A massa de juta, para cada composição, mostrada na tabela 1 são pesos aproximados de cada corte (nas dimensões do molde metálico), realizado para inserção no compósito. Pois como não houve variação na quantidade de camada de juta utilizada, não há peso específico.

Após os 20 minutos, na resina é adicionado o acelerador de cobalto (1,5 % v/v) e a argila, como mostrado na Figura 18. Após homogeneização da mistura é acrescentado o catalisador MEK-P (1 % v/v). O desmoldante é necessário ser utilizado no molde metálico para facilitar a retirada da placa após prensagem. A mistura de acelerador, argila e catalisador foi despejada no molde (que já estava nivelado), de acordo com a Figura 19, e então esperou-se atingir o ponto de gel (entre 10 e 15 minutos) necessário para a prensagem. A prensagem ocorreu com uma carga fixa de 2,5 toneladas durante um tempo de 20 minutos. Após esse tempo o material foi retirado e armazenado para a cura (24 horas).

Figura 18 – Homogeneização de acelerador e argila.

Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 19 – Mistura de acelerador, argila e catalisador em molde metálico.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para os compósitos híbridos, primeiramente o tecido de juta foi disposto no molde e depois a mistura resina-acelerador-argila-catalisador é despejada sobre o tecido (Figura 20). Também esperou-se o tempo de 20 minutos em prensagem a 2,5 toneladas e o compósito é retirado para a cura por 24 horas.

Figura 20 – Fabricação do compósito híbrido.

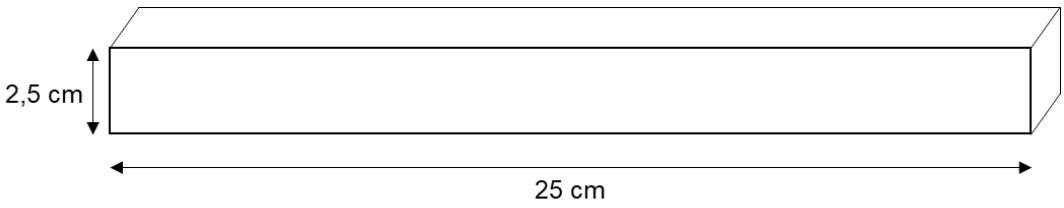
Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3.3.1 Cortes dos corpos de prova

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram cortados segundo a norma ASTM D3039 (2000), o tamanho foi de 25 cm x 2,5 cm (Figura 21) e em suas extremidades colados 4 tab’s de Duratex. E para o ensaio de flexão foram cortados

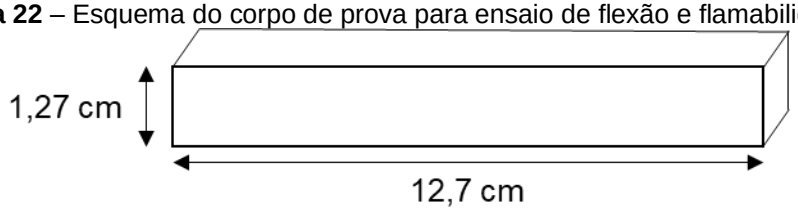
de acordo com a norma ASTM D790 (2010), no qual o tamanho foi de 12,7 cm x 1,27 cm (Figura 22) – mesmo tamanho usado para o ensaio de flamabilidade (ASTM D635, 2010).

Figura 21 – Esquema do corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 22 – Esquema do corpo de prova para ensaio de flexão e flamabilidade.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para os ensaios físicos os corpos de prova foram cortados em tamanhos de 2,5 cm x 2,5 cm (NBR 12766, 1992), como mostrado na Figura 23. Para todos os cortes foi utilizada uma serra circular de bancada.

Figura 23 – Corpos de prova para ensaios físicos.

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3.4 Caracterização dos corpos de prova

3.3.4.1 Determinação das propriedades físicas

As propriedades físicas avaliadas dos compósitos foram a porosidade aparente (PA), a absorção de água (AA) e a massa específica aparente (MEA). Para isso, a metodologia adotada baseou-se na NBR 12766.

Para a realização dos ensaios separou a quantidade de corpos de prova necessária (seis corpos de prova), de cada composição. Depois de marcadas, as amostras foram deixadas em estufa por 24 horas à uma temperatura de 105 ºC. Após, foram medidas as massas secas (m_s) de cada corpo de prova. Os mesmos foram, então, deixados submersos em água destilada por 24 horas novamente. Após esse tempo foi medida a massa úmida (m_u) e em seguida a massa imersa (m_i) (Figura 24) dos corpos de prova. Todas as medições foram feitas em balança analítica de marca Bioscale.

Figura 24 – Aparato para medição da massa imersa do material.

Fonte: Autoria própria, 2019.

Porosidade aparente

A porosidade aparente foi calculada segundo a equação 3.

$$\mathrm{PA} = \frac{\mathrm{m_u} - \mathrm{m_s}}{\mathrm{m_u} - \mathrm{m_i}} \text{ X } 100\ (\%) \qquad (3)$$

Absorção de água

Já a absorção de água dos corpos de prova foi calculada seguindo a equação 4.

$$\mathrm{AA} = \frac{\mathrm{m_u} - \mathrm{m_s}}{\mathrm{m_s}} \mathrm{X}\, 100\ (\%) \tag{4}$$

Massa específica aparente

A massa específica aparente foi calculada segundo a equação 5.

$$\mathrm{MEA} = \frac{\mathrm{m_s}}{\mathrm{m_u} - \mathrm{m_i}} \mathrm{X}\, 100\ \left(\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm^3}}\right) \tag{5}$$

Onde m_u é a massa úmida, m_s é a massa seca e m_i é a massa imersa, todos em gramas.

3.3.4.2 Ensaios mecânicos (tração e flexão)

O ensaio de resistência a tração seguiu a norma ASTM D3039 (2000) e foi realizado em uma máquina de modelo KE 2000 MP, da marca KRATOS (Figura 25). Já o de flexão seguiu a norma ASTM D790 (2010) foi realizado na máquina de marca AROTEC e modelo WDW 100e (Figura 26). As velocidades utilizadas para os dois ensaios foram de 2 mm/min e célula de carga de 5 kN.

Figura 25 – Máquina para ensaio de tração.

Fonte: Tavares, 2018.

Figura 26 – Máquina para ensaio de flexão.

Fonte: Tavares, 2018.

3.3.4.3 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Primeiramente foi feita a preparação dos corpos de prova para a realização do ensaio, onde coletou-se amostra da região de ruptura dos corpos de prova após ensaio de tração (Figura 27).

Figura 27 – Corpos de prova para análise por microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autoria própria, 2019.

O equipamento utilizado de marca Hitachi e modelo TM3000 pode ser observado na Figura 28. A análise foi realizada no Laboratório de Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal do Pará.

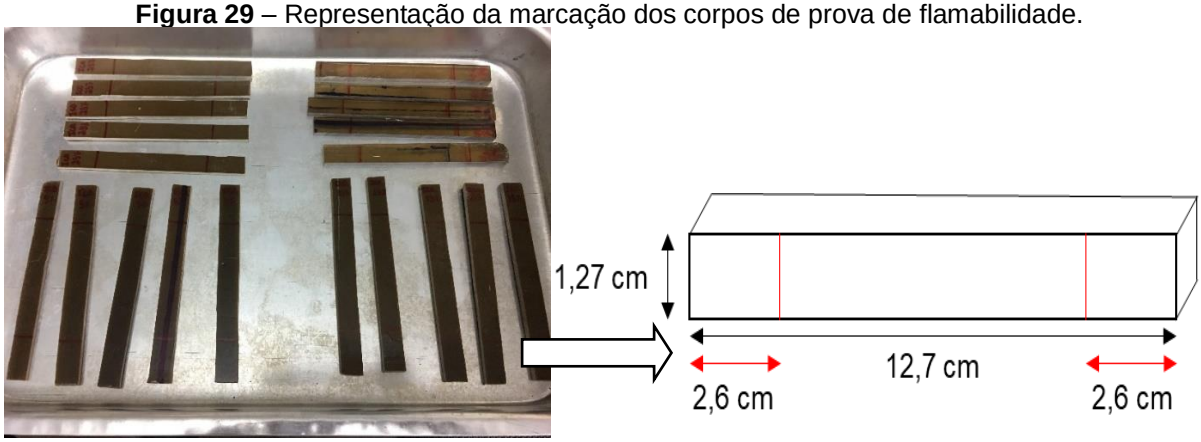
Figura 28 – Equipamento para microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3.4.4 Resistência à chama

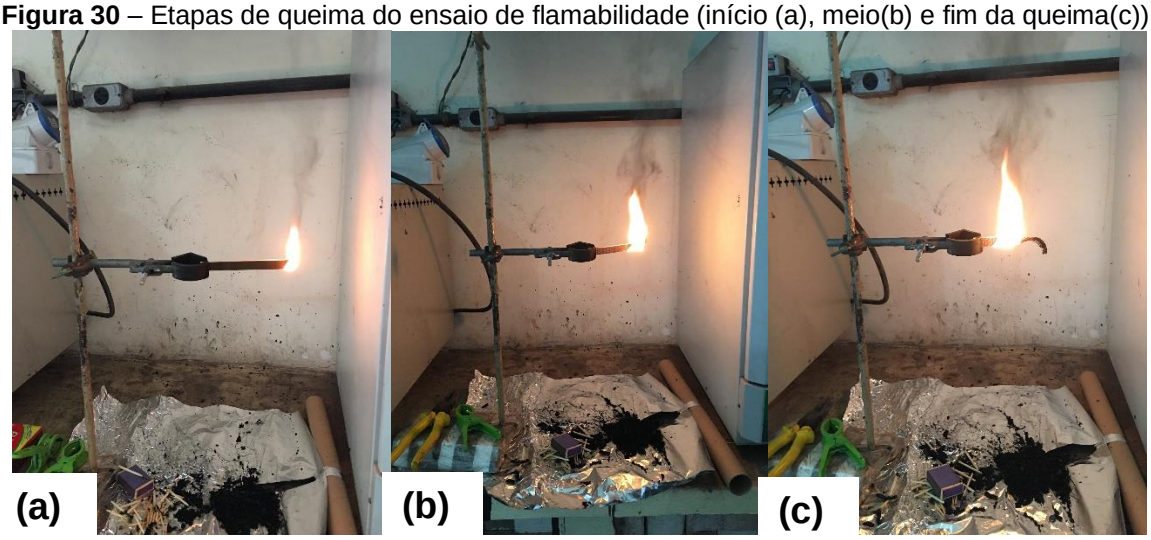
O ensaio de resistência a chama foi realizado com o corpo de prova em posição horizontal (ASTM D635, 2010). O corpo de prova foi marcado de tal forma que o comprimento útil (central) fosse de 7,5 cm (Figura 29). Incidiu-se a chama utilizando bico de Bunsen em um ângulo de 45º. A Figura 30 mostra as etapas de queima (início, meio e fim).

Figura 29 – Representação da marcação dos corpos de prova de flamabilidade.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 30 – Etapas de queima do ensaio de flamabilidade (início (a), meio(b) e fim da queima(c)).



Fonte: Autoria própria, 2019.

A taxa de queima de cada corpo de prova pode ser calculada segundo a equação 6.

$$Taxa\ \left(\frac{mm}{\min}\right) = \frac{60L}{t} \qquad (6)$$

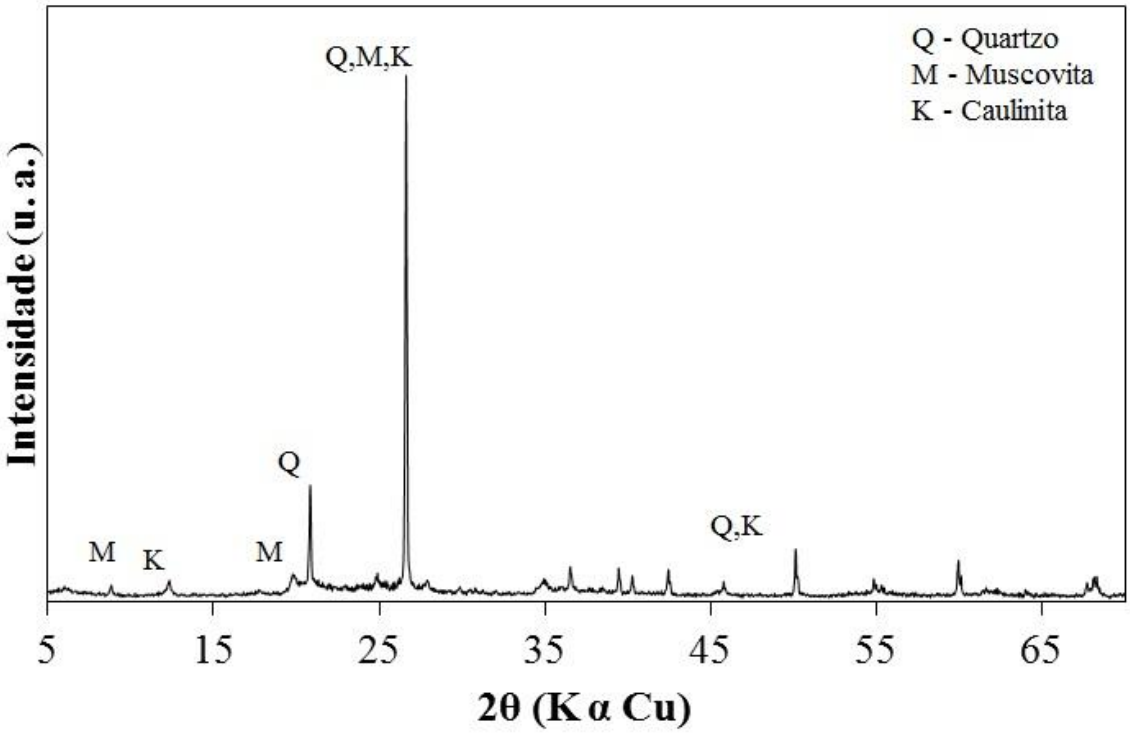
Onde L é o comprimento atingido pela queima (75 mm) e t é o tempo necessário para que o corpo de prova queime até o final dos 75 mm marcados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Difração de Raios-X (DRX)

As composições mineralógicas da argila caulinítica proveniente do distrito de Icoaraci foram analisadas por meio da Difração de Raios-X (DRX), apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Resultado da Difração de Raios-X para a argila utilizada.



Fonte: Autoria própria, 2019.

O difratograma apresenta os principais componentes mineralógicos da argila caulinítica. Onde observa-se que o Quartzo (SiO_2), a Caulinita ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$) e a Muscovita ($KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$ possuem picos com intensidades bem aproximadas, por isso no pico mais intenso apresentado no difratograma há os três componentes.

Vieira e Pinheiro (2011) analisaram por intermédio da Difração de Raios-X os componentes presentes na argila caulinítica e encontraram, também, como picos mais intensos o Quartzo, a Caulinita e a Muscovita.

Costa, Rodrigues e Silva (2013) observaram na argila do distrito de Icoaraci, também, os mesmos componentes nos picos de maior intensidade no difratograma (encontraram muscovita e quartzo em picos muito próximos).

4.2 Caracterização física

Pode ser observado na Tabela 2 os resultados de massa específica aparente (MEA) em g/cm^3, porosidade aparente (PA) em porcentagem e absorção de água (AA) também em porcentagem para compósitos com argila.

Tabela 2 – Resultado de ensaios físicos para compósitos com argila.

Tipos de Amostras	Proporções de Argila (%)	MEA (g/cm³)	PA (%)	AA (%)
Matriz plena	0	1,22 ± 0,0045	0,58 ± 0,1003	0,47 ± 0,0838
Argila	5	1,26 ± 0,0042	0,54 ± 0,0540	0,43 ± 0,0433
Argila	15	1,33 ± 0,0025	0,64 ± 0,1568	0,48 ± 0,1177
Argila	25	1,42 ± 0,0041	0,87 ± 0,1153	0,61 ± 0,0799

Fonte: Autoria própria, 2019.

Observa-se na Tabela 2 que a massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água, em geral, tiveram aumento. Todavia, apenas para a amostra de 5 % de argila a porosidade aparente e a absorção de água teve diminuição de seu valor, com relação a matriz plena. O aumento, para as outras proporções, pode ter acontecido devido o método de fabricação utilizado (*hand lay up*), que favorece o surgimento de algumas falhas.

Pinnavaia e Beall (2001) citam que o termo “argilominerais” são filossilicatos hidrofílicos e conferem a plasticidade as argilas. Isso pode explicar o fato da absorção de água acentuada nos compósitos com argila, neste trabalho.

Okada *et al* (1990) observaram redução na absorção de água em nanocompósitos de poliamida quando comparada ao polímero puro. Os autores explicaram que poderia ser aspectos das camadas de nanoargila que, bem dispersa na matriz, acabam dificultando a passagem das moléculas de água.

A Tabela 3 mostra os resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água para compósitos com argila e tecido de juta.

Tabela 3 – Resultados de ensaios físicos para compósitos com argila e tecido de juta.

Tipo de Amostra	Proporções de Argila/Juta (%)	MEA (g/cm³)	PA (%)	AA (%)
Matriz plena	0 / 0	1,22 ± 0,0045	0,58 ± 0,1003	0,47 ± 0,0838
Matriz/juta	0 / 4,56	1,23 ± 0,0025	1,19 ± 0,0242	0,96 ± 0,0213
Argila/juta	5 / 4,56	1,27 ± 0,0115	1,30 ± 0,3394	1,02 ± 0,2755
Argila/juta	15 / 4,56	1,35 ± 0,0438	1,27 ± 0,2041	0,94 ± 0,1368
Argila/juta	25 / 4,56	1,42 ± 0,0075	1,75 ± 0,2349	1,22 ± 0,1655

Fonte: Autoria própria, 2019.

Nota-se, na Tabela 3, que a massa específica aparente aumentou, a porosidade aparente, em geral, também aumentou, com relação a matriz plena e a absorção de água obteve aumento, por consequência. Isso significa que a fibra natural contribuiu para o aumento dos valores analisados. As argilas e fibras possuem características hidrofílicas, o que pode ter contribuído para aumento dos valores analisados.

Nunes (2015) avaliou as propriedades físicas de compósitos de matriz poliéster com lama vermelha e fibra de curauá (em porcentagem de 0 %, 10 %, 20 % e 30 % de lama vermelha), observou que a porosidade aparente variou de 2,37 % à 8,78 %, o que demonstra valores de porosidade superiores aos encontrados neste trabalho.

Menezes (2018) em seu trabalho utilizou tecido de juta para a fabricação de compósitos poliméricos e obteve aumento na massa específica aparente dos compósitos. O que infere que o tecido de juta aumenta os valores analisados neste trabalho.

4.3 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos utilizados para a verificação de suas propriedades foram o ensaio de tração e flexão. Nestes, foi possível determinar a resistência à tração e a flexão, o módulo de elasticidade e o alongamento de ambos ensaios.

4.3.1 Tração

4.3.1.1 Material compósito com inserção de argila

O ensaio de tração permitiu avaliar a resistência mecânica dos compósitos de poliéster e argila. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de tração de compósitos com inserção de argila.

Tipo de Amostra	Proporção de Argila (%)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (mm)
Matriz plena	0	11,73 (± 2,98)	1,96 (± 0,33)	1,15 (± 0,28)
Argila	5	13,92 (± 3,40)	2,22 (± 0,27)	1,29 (± 0,46)
Argila	15	23,05 (± 3,23)	2,54 (± 0,25)	1,79 (± 0,39)
Argila	25	21,99 (± 3,26)	2,34 (± 0,16)	1,78 (± 0,29)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Os resultados obtidos na Tabela 4 demonstram que houve aumento da resistência à tração dos compósitos com argila, comparados a resistência à tração da matriz plena. Dentre estes, o maior resultados observado de resistência foi o do compósito com 15 % de argila.

É válido observar que em relação a matriz plena houve um aumento de, aproximadamente, 19 % na resistência do compósito com 5 % de argila. Houve, também, um aumento de 96,5 % na proporção de 15 % de argila e um aumento de 87,4 % na composição de 25 % de argila.

O módulo de elasticidade demonstra um aumento da rigidez do material. Observou-se que o maior aumento obtido do módulo, com relação a matriz plena, foi na composição de 15 %, neste caso o aumento foi próximo de 30 %.

A argila, nesse caso, não se comportou como carga dentro da matriz e sim como reforço, nas quais todas as proporções tiveram aumento da resistência à tração. Isso pode estar ligado a granulometria das partículas, por serem pequenas, essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz próximo de cada partícula. A matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2016).

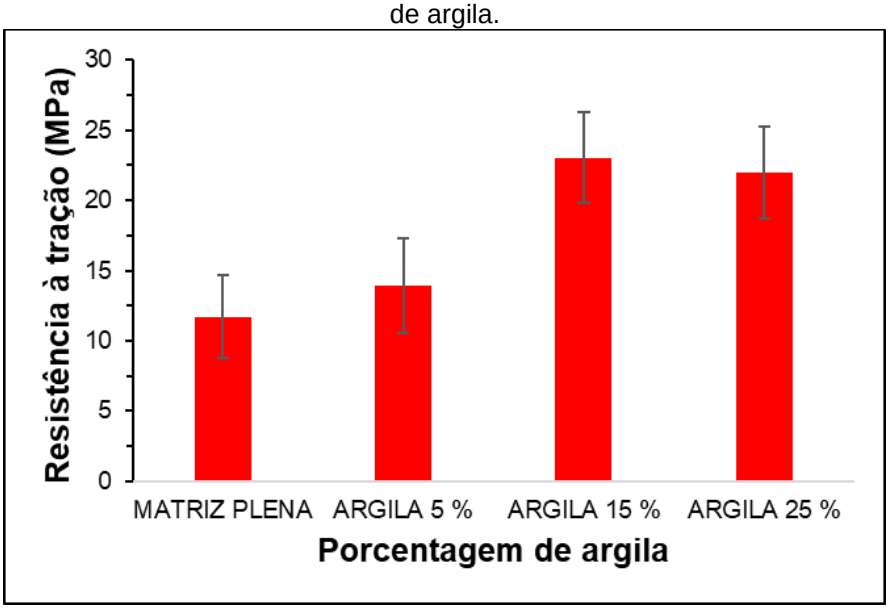
Souza (2006) diz que nanocompósitos com o teor de argila na ordem de 2 % a 10 % podem apresentar melhorias significantes nas propriedades de compósitos

poliméricos, quando comparados a matriz plena. As propriedades que podem adquirir melhora são propriedades mecânicas como resistência à fratura e módulo.

Neto, Carvalho e Araújo (2007) estudaram a adição de carga nanoparticulada de argila em compósitos de poliuretano e fibra de juta. Os resultados obtidos por eles, para compósitos somente de argila e poliuretano demonstram que o valor máximo de resistência à tração (em MPa) foi de 1,89 (que foi na composição de 5 % da argila utilizada pelos autores em matriz de poliuretano), quando comparado aos resultados obtidos no presente trabalho nota-se valores superiores ao dos autores citados.

O gráfico da Figura 32 mostra um comparativo entre os resultados de resistência à tração dos compósitos com argila e do compósito de matriz plena.

Figura 32 – Gráfico do comportamento da resistência à tração de materiais compósitos com inserção de argila.

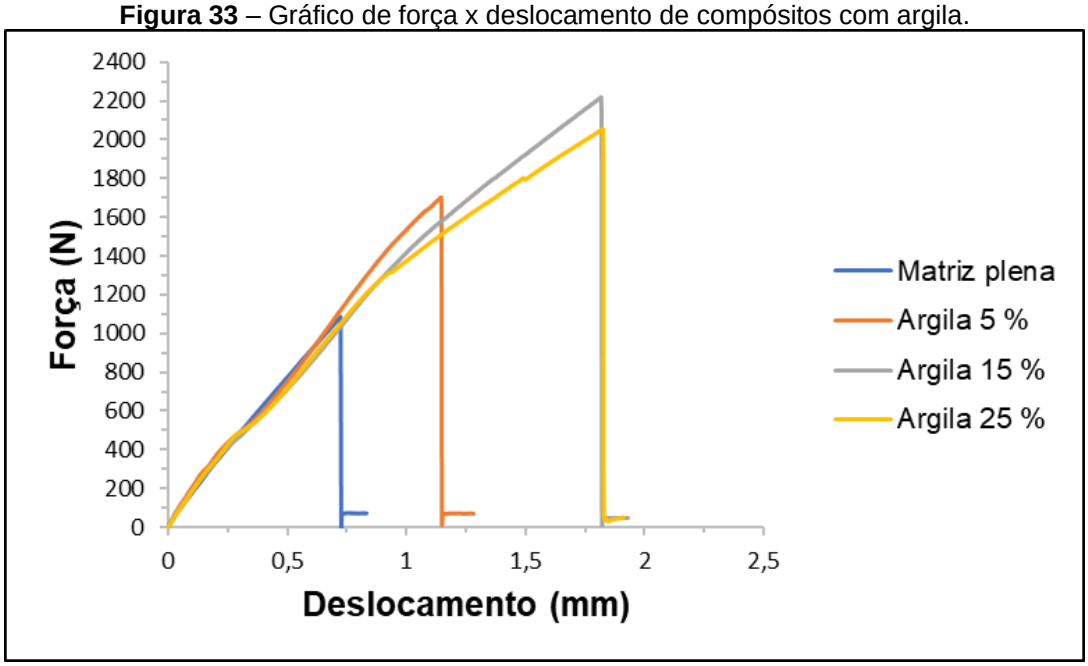


Fonte: Autoria própria, 2019.

Nota-se que apesar de haver um aumento na resistência com relação a matriz plena, há uma diminuição na composição de 25 % se comparada a composição de 15 % de argila. Isso indica que o melhor resultado obtido diante do ensaio foi para a composição de 15 % argila.

O gráfico da Figura 33 relaciona a força em newton (N) e o deslocamento em milímetros (mm) dos compósitos poliméricos com argila.

Figura 33 – Gráfico de força x deslocamento de compósitos com argila.



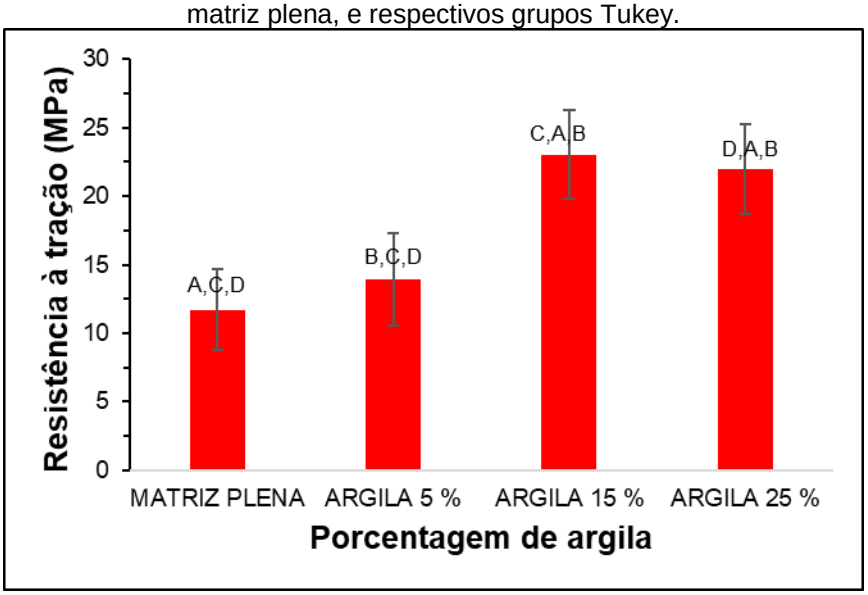
Fonte: Autoria própria, 2019.

Analisando o gráfico da Figura 33 observa-se algo típico para materiais compósitos, as curvas possuem certa linearidade, onde há o regime considerado elástico até posterior ruptura. Isso é caracterizado como um comportamento frágil, ou seja, no momento em que o material atinge máxima resistência, ocorre a queda de maneira repentina da força.

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey realizou-se a comparação das composições em estudo, com o objetivo de demostrar se há diferenças significativas entre as resistências à tração dos compósitos com argila. O software utilizado foi o livre PAST, os resultados mostraram uma diferença significativa entre as composições, com probabilidade de significância de 8,6984E-05.

Utilizando o mesmo software, realizou-se o teste de Tukey. Onde pode ser observado algumas diferenças estatísticas (Figura 34).

Figura 34 – Gráfico de tensão de resistência à tração de compósitos com argila em comparação a matriz plena, e respectivos grupos Tukey.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Por meio do gráfico, pode ser observado que a matriz plena diferiu significativamente das composições de 15 % e 25 %. A composição de 5 % de argila diferiu estatisticamente de forma significativa das composições de 15 % e 25 % de argila. Compósitos com 15 % de argila foram significativamente diferentes da matriz plena e de 5 % de argila. E os compósitos com 25 % de argila diferiram estatisticamente da matriz plena e da proporção de 5 % de argila.

4.3.1.2 Material compósito com inserção de argila e tecido de juta

Os compósitos de matriz polimérica com a inserção de argila e tecido de juta foram submetidos a ensaio de tração para avaliação de propriedades mecânicas. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração de compósitos com argila e tecido de juta.

Tipo de Amostra	Proporção de Argila/Juta (%)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (mm)
Matriz plena	0 / 0	11,73 ± 2,98	1,96 ± 0,33	1,15 ± 0,28
Matriz/juta	0 / 4,56	10,47 ± 3,12	1,43 ± 0,56	1,65 ± 0,56
Argila/juta	5 / 4,56	11,39 ± 1,78	2,10 ± 0,16	1,11 ± 0,27
Argila/juta	15 / 4,56	12,13 ± 3,31	2,20 ± 0,20	1,10 ± 0,16
Argila/juta	25 / 4,56	19,15 ± 4,35	2,16 ± 0,36	1,78 ± 0,56

Fonte: autoria própria, 2019.

Nota-se na Tabela 5 que, em geral, os valores de resistência à tração obtiveram aumento se comparado a matriz plena, porém nas composições matriz/juta e argila (5 %)/juta houve decréscimo dessa resistência. O maior valor obtido por meio do ensaio foi para a amostra de argila (25 %) e juta.

Nota-se que houve um aumento de 3,41 % na amostra de argila (15 %) e juta comparado a matriz plena. Mas o que obteve um bom aumento foi o de argila (25 %) e juta, aproximadamente 63,2 % superior a matriz plena.

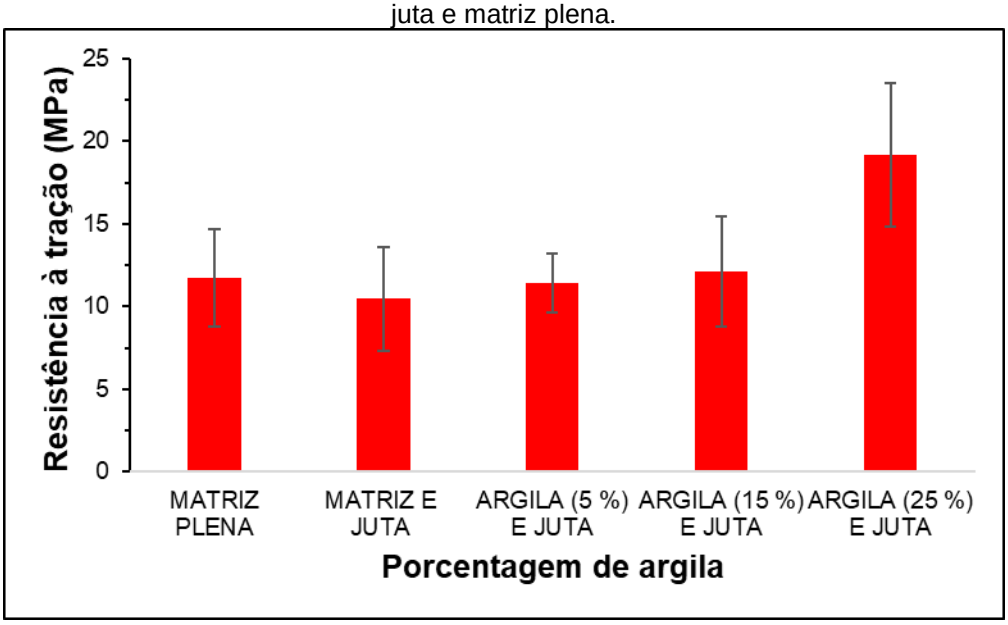
O módulo de elasticidade também, em geral, aumentou, com a exceção do compósito de matriz e juta. O maior aumento avaliado foi em relação a composição de argila (15 %) e juta, 12,2 % superior ao módulo de elasticidade da matriz.

Percebe-se decaimento da resistência à tração nas amostras de matriz/juta e argila (5 %)/juta com relação a matriz plena, o que indica dificuldade de molhamento da fibra. Essa dificuldade de molhamento pode estar ligada a forma como os fios estão, em tecido (feixes de fibras), dessa forma a matriz polimérica encontra dificuldade de penetrar nas regiões centrais dos fios de juta, interferindo negativamente na resistência à tração. Ayres, Oliveira e Nóbrega (2012) citam, em seu trabalho com argila e fibra de sisal, que a partir de 50 gramas de sisal a resistência à tração sofre decaimento, isso porque há uma maior dificuldade de molhamento das fibras, diminuindo as propriedades.

Neto, Carvalho e Araújo (2007) avaliaram as propriedades de compósitos com argila e fibra de juta (variou-se tanto a porcentagem de fibra quanto a de argila). Pode-se comparar o resultado de resistência à tração dos autores na composição de matriz (poliuretano) e fibra de juta, que foi de 4,96 MPa (PU e 9 % de fibra). Já nesse trabalho, o resultado encontrado para a composição de matriz (poliéster) e tecido de fibra de juta (não varia, mantendo a proporção constante de 4,56 % de juta), foi de 10,47 MPa, resultado que se mostra bem superior ao dos autores citados.

O gráfico da Figura 35 mostra o comparativo dos resultados da tensão de ruptura dos compósitos com tecido de juta e matriz plena.

Figura 35 – Gráfico comparativo dos resultados de tensão de ruptura de compósitos com tecido de juta e matriz plena.

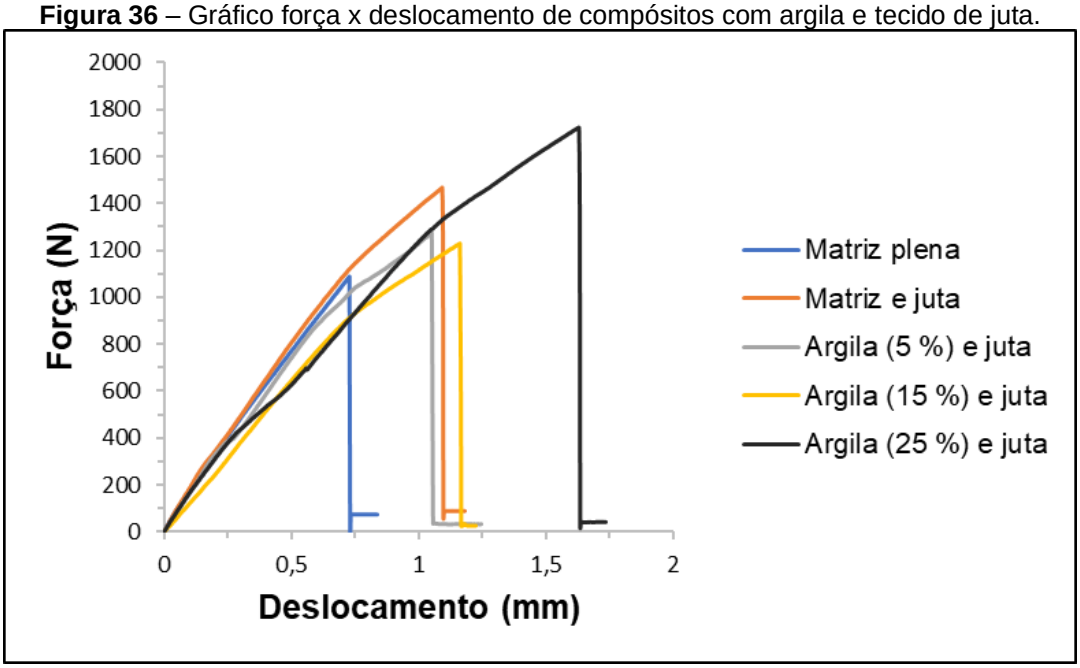


Fonte: Autoria própria, 2019.

Observa-se que existe um aumento da resistência à tração mais significativo nas composições de argila (15 %) e juta e argila (25 %) e juta quando comparadas ao compósito apenas de poliéster. Porém houve decaimento da resistência nas amostras de matriz e juta (12 % menor) e argila (5 %) e juta (2,9 % menor) quando comparadas a matriz plena. Isso pode ser justificado pelo fato da argila preencher espaços auxiliando na impregnação da resina na fibra.

O gráfico da Figura 36 mostra a relação entre a força (N) e o deslocamento (mm) dos compósitos de matriz polimérica, argila e tecido de juta, além da matriz plena.

Figura 36 – Gráfico força x deslocamento de compósitos com argila e tecido de juta.



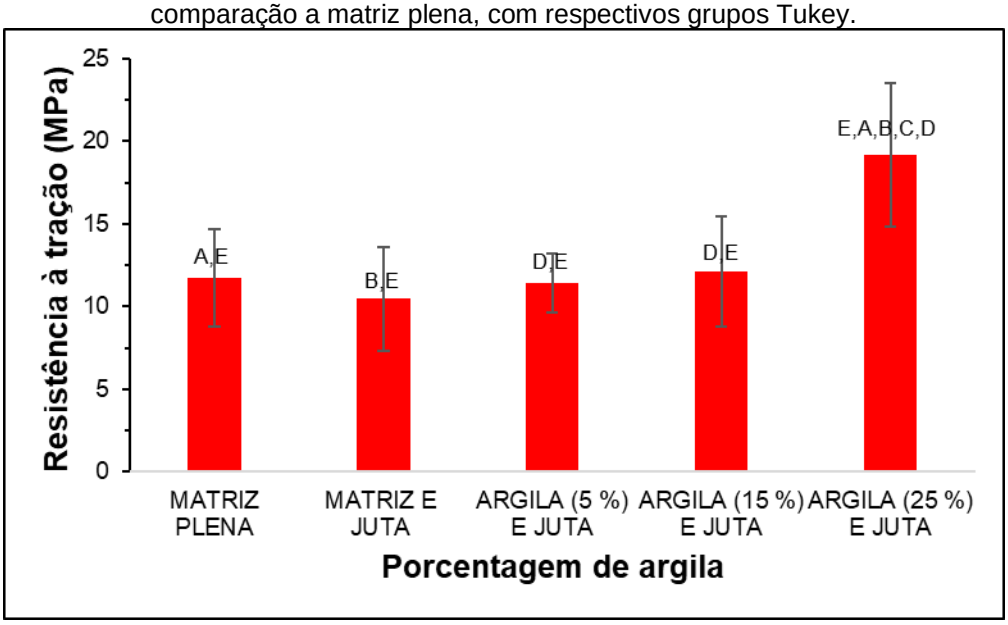
Fonte: Autoria própria, 2019.

É notável no gráfico da Figura 36 que os maiores valores atingidos de força é na proporção de argila (25 %) e juta, o que demonstra que foi preciso exercer uma força maior para ruptura do material. É observado, também, que os corpos possuem comportamento de fratura frágil, bem comum em materiais compósitos de matriz polimérica.

Com o objetivo de avaliar as diferenças estatisticamente significativas dos compósitos com fibra e argila, onde variou-se apenas a porcentagem de argila inserida, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey. Os resultados mostraram diferença entre as composições, com probabilidade de significância de 3,5106E-03.

Utilizando o mesmo software foi realizado o teste de Tukey, que evidenciou algumas diferenças estatísticas (Figura 37).

Figura 37 – Gráfico de tensão de resistência à tração de compósitos com argila e juta em comparação a matriz plena, com respectivos grupos Tukey.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Observa-se que as composições de matriz plena, matriz e juta, 5 % de argila e juta, e 15 % de argila e juta diferiram estatisticamente da composição de 25 % de argila e juta. E, por conseguinte, o compósito de 25 % de argila e juta diferiu de todas as outras composições, inclusive da matriz plena.

4.3.2 Flexão

Outro ensaio realizado para a avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos foi o de flexão. Foi possível, com esse ensaio, obter resultados de resistência à flexão (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e alongamento (mm) dos materiais.

4.3.2.1 Material compósito com inserção de argila

Os resultados adquiridos do ensaio de flexão de compósitos com argila podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de flexão em compósitos com argila.

Tipo de Amostra	Proporção de Argila (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (mm)
Matriz plena	0	51,61 ± 24,53	2,18 ± 0,27	2,49 ± 0,76
Argila	5	71,22 ± 15,76	2,05 ± 0,30	1,84 ± 0,44
Argila	15	75,86 ± 8,61	2,40 ± 0,23	1,7 ± 0,23
Argila	25	67,06 ± 9,45	2,03 ± 0,43	1,81 ± 0,28

Fonte: autoria própria, 2019.

Os resultados da Tabela 6 demonstram que houve aumento da resistência à flexão de todas as composições quando comparadas a matriz plena. O maior aumento foi constatado na composição de 15 % de argila.

Para a amostra de 5 % de argila o aumento foi de, aproximadamente, 38 % com relação a matriz plena. Para a composição de 15 % argila o aumento foi de 46,9 %. E para a de 25 % argila houve um crescimento de 29,9 % na resistência à flexão quando comparado aos corpos de prova somente de matriz plena. Observa-se que houve boa compactação e homogeneização das partículas de argila com a resina.

Vieira (2013) estudou a adição de nano sílica em compósitos híbridos de sisal (tratada e não tratada) e obteve o valor de 59,72 MPa para resistência à flexão (sisal não tratada) para compósitos com inserção de nano sílica dispersa, resultado inferior aos encontrados neste trabalho.

O módulo de elasticidade demonstra que houve aumento apenas na composição de 15 % de argila, quando comparado a matriz plena. O que quer dizer que para as outras composições a rigidez do material diminuiu com relação a matriz plena.

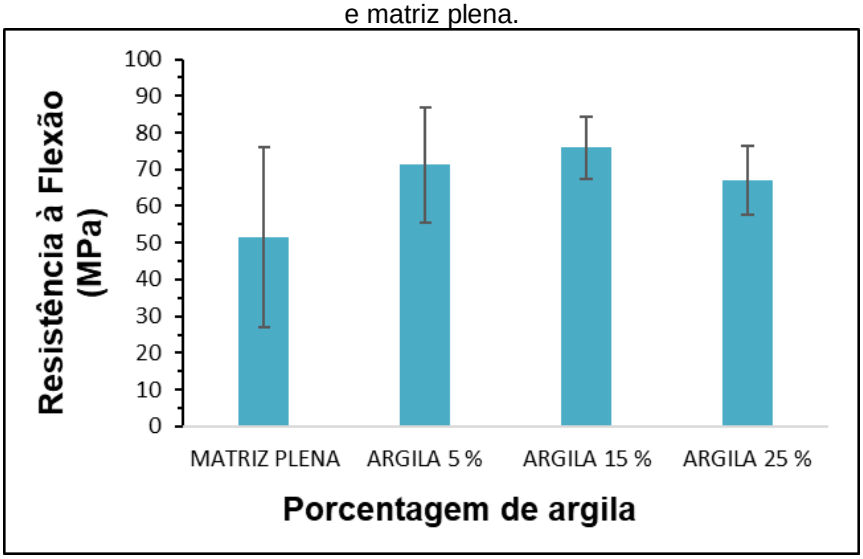
Santos (2007) estudou a influência da adição de resíduo industrial de poliéster e EVA (Etileno Acetato de Vinila) , além de cargas de areia e diatomita, em matriz poliéster, os resultados obtidos mostraram que com 20 % de diatomita na matriz a resistência à flexão foi de 33,3 MPa que foi o maior valor encontrado de resistência dentre os resíduos e particulados avaliados. Quanto ao módulo, os valores encontrados pelo mesmo autor variaram entre 1,1 GPa (12,5 % de EVA em matriz poliéster) e 6,7 GPa (areia e diatomita em matriz poliéster). A título de comparação, os valores para resistência à flexão obtidas neste trabalho, com argila em matriz

poliéster, foi superior ao do autor citado. E o módulo de elasticidade teve pequena variação, além de valores mais baixos, quando comparado ao dos autores.

Gomes (2015) avaliou as propriedades de resistência à flexão para compósitos com polipropileno com polipropileno graftizado com anidrido maleico e argila (5 %) e obteve resultado de 39,9 MPa, o que mostra-se inferior aos resultados de resistência obtidos neste trabalho.

O gráfico da Figura 38 mostra o comparativo dos resultados de resistência à flexão dos compósitos com argila e matriz plena.

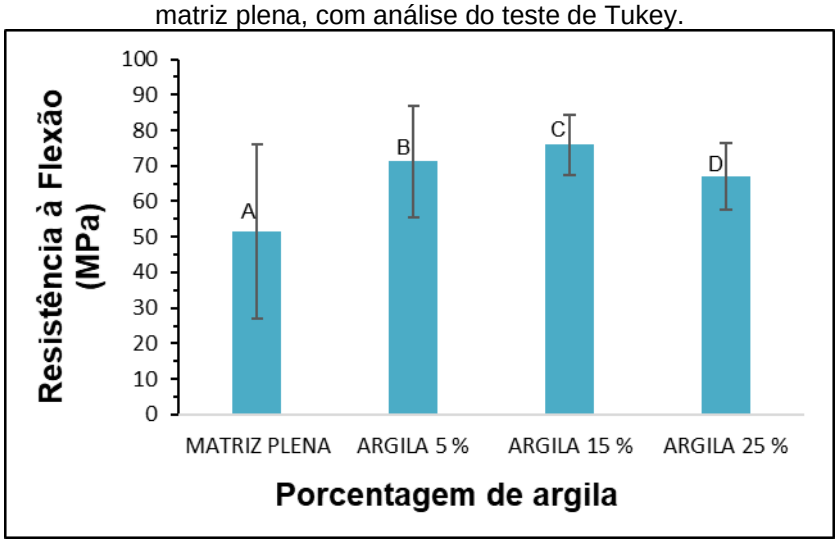
Figura 38 – Gráfico de comparação dos resultados de resistência à flexão de compósitos com argila e matriz plena.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Por intermédio da ANOVA foi possível avaliar as diferenças entre os compósitos com argila, onde a probabilidade de significância foi de 7,2650E-02. Já no teste de Tukey foi possível observar que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os pares analisados (Figura 39).

Figura 39 – Gráfico de tensão de resistência à flexão de compósitos com argila em comparação a matriz plena, com análise do teste de Tukey.



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.3.2.2 Material compósito com inserção de argila e tecido de juta

A Tabela 7 demonstra os resultados obtidos de resistência à flexão dos compósitos com tecido de juta.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de flexão em compósitos com argila e tecido de juta.

Tipo de Amostra	Proporção de Argila/Juta (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (mm)
Matriz plena	0 / 0	51,61 ± 24,53	2,18 ± 0,27	2,49 ± 0,76
Matriz/juta	0 / 4,56	55,20 ± 19,17	2,16 ± 0,96	1,85 ± 0,67
Argila/juta	5 / 4,56	64,21 ± 15,41	2,03 ± 0,21	1,61 ± 0,44
Argila/juta	15 / 4,56	67,50 ± 7,40	2,14 ± 0,29	1,71 ± 0,24
Argila/juta	25 / 4,56	69,66 ± 17,05	1,77 ± 0,49	1,88 ± 0,28

Fonte: Autoria própria, 2019.

Os resultados observados na Tabela 7 mostram que, em comparação a matriz plena, a resistência à flexão de todas as composições mostrou certo aumento, exibindo que os compósitos com fibras tornaram-se obstáculo na resistência à flexão e o particulado preencheu os vazios deixados, de certa forma, por conta do tecido de juta. Em que o maior aumento foi na composição de argila (25 %) e juta.

Em comparação a matriz plena: a amostra de poliéster e juta (0 % de argila) aumentou em 6,95 %; a composição de argila (5 %) e juta sofreu aumento de 24,4 %;

a amostra de argila (15 %) e juta aumentou em 30 %; por fim, a composição de argila (25 %) e juta aumentou em 34,9 % em relação a matriz plena.

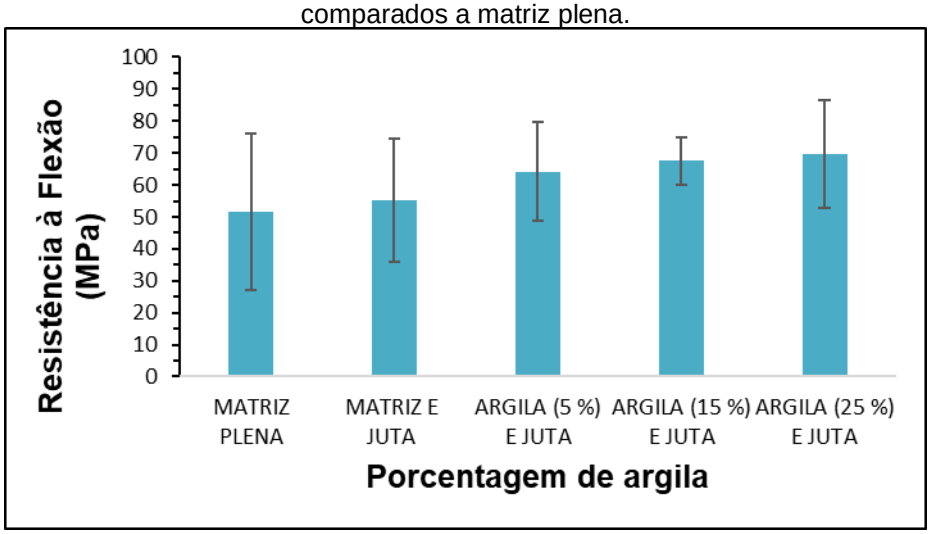
Oliveira (2013) utilizou polietileno de alta densidade (PEAD) como matriz junto as fibras da palmeira real australiana, no qual o maior valor de resistência encontrado foi de 32,4 MPa (20 % de fibra tratada), valor esse, inferior aos encontrados no presente trabalho.

O módulo de elasticidade demonstra que houve diminuição da rigidez dos compósitos com fibra de juta e argila, em comparação ao módulo da matriz plena.

Os resultados obtidos por Monteiro *et al* (2006) mostram que para 5 % de tecido de juta a resistência à flexão é de aproximadamente 17,5 MPa (matriz de polietileno reciclado). Já neste trabalho, observa-se que todos os valores de resistência à flexão em compósitos com tecido de juta (com ou sem argila) são superiores ao dos autores.

O gráfico da Figura 40 compara os resultados de resistência à flexão das amostras.

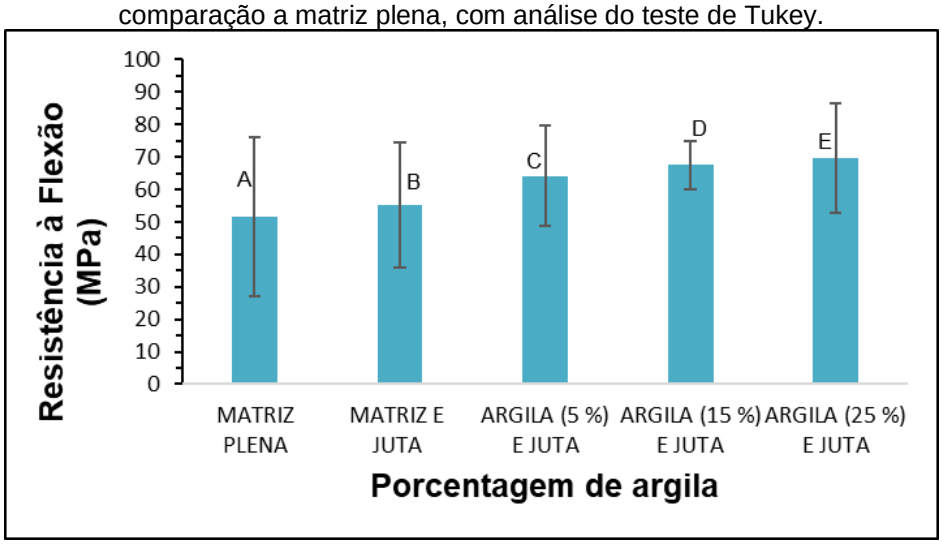
Figura 40 – Gráfico dos resultados de resistência à flexão de compósitos com argila e tecido de juta comparados a matriz plena.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para avaliação dos compósitos com argila e tecido de juta foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey. Os resultados mostraram uma probabilidade de significância nos resultados de 6,6331E-02. O teste de Tukey exibiu que não houve diferença estatisticamente significativa nos pares analisados (Figura 41).

Figura 41 – Gráfico de tensão de resistência à flexão de compósitos com argila e juta em comparação a matriz plena, com análise do teste de Tukey.

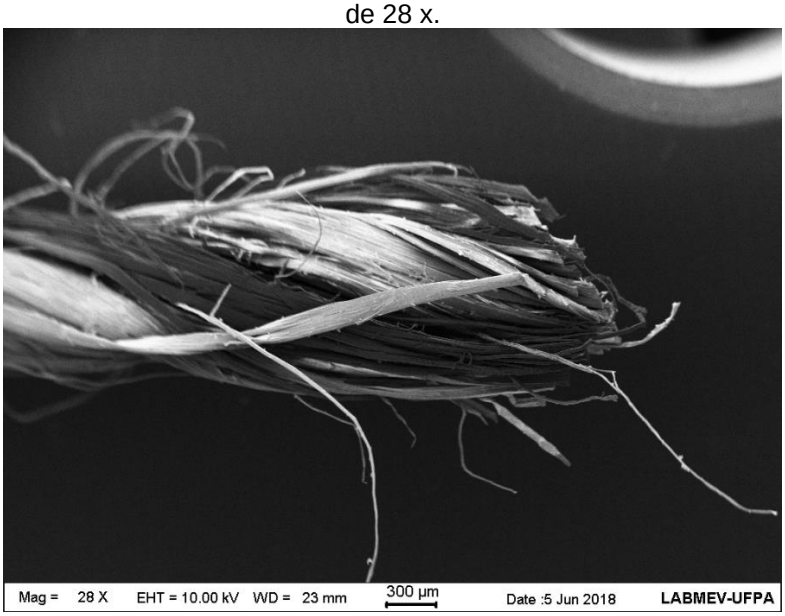


Fonte: Autoria própria, 2019.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foi realizada microscopia eletrônica de varredura na fibra de juta, com aumento de 28 x, como pode ser observado na Figura 42.

Figura 42 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura da fibra de juta, com aumento de 28 x.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 42 apresenta o aspecto da fibra de juta, onde nota-se os vários filamentos que a mesma possui. Todos esses filamentos juntos formam a fibra de juta, que posteriormente irá ser utilizada para formar o tecido com fibras de juta. A fibra apresenta uma superfície que dificulta a interação com a matriz, ocorre dificuldade de

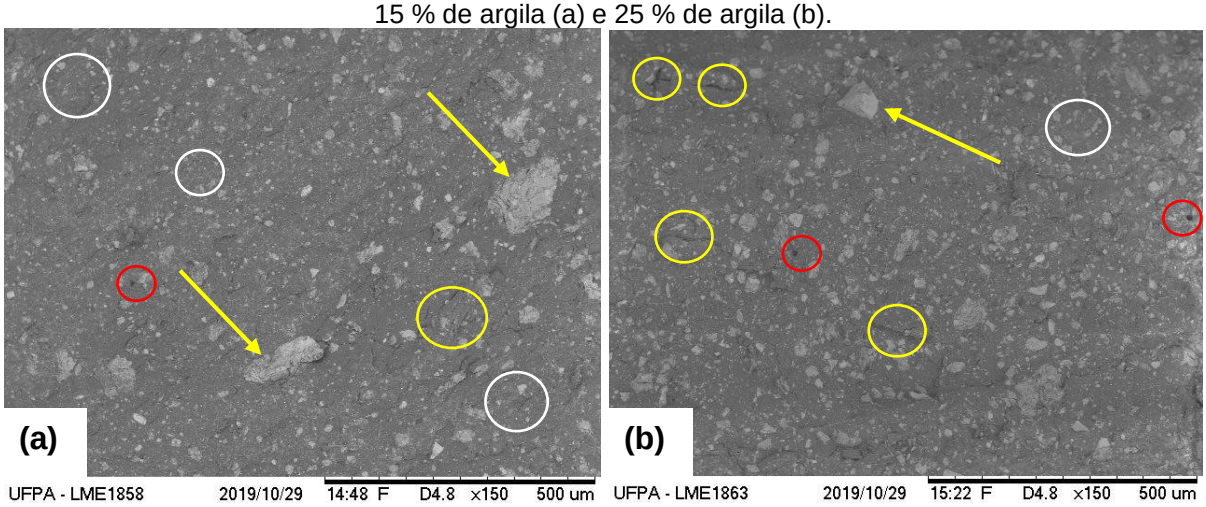
molhabilidade da resina principalmente por conta da fibra estar disposta em forma de feixe de filamentos.

Monteiro *et al* (2006) em sua pesquisa analisou a fibra de juta por microscopia eletrônica de varredura, observou o aspecto grosseiro do trançado dos filamentos que formam a fibra e citou que o espaço encontrado entre esses filamentos na fibra pode ajudar a entrada da resina no tecido.

Lima (2009), durante sua pesquisa, observou a fratura de fios e fibras, com o auxílio do MEV, e demonstrou que houve fratura uniforme das fibras, ou seja, as microfibrilas que compõem a fibra romperam praticamente de uma só vez.

Realizou-se microscopia eletrônica de varredura na região de fratura de compósitos com inserção de argila, submetidos ao ensaio de tração, nas proporções de 15 % de argila (Figura 43a) e 25 % de argila (Figura 43b), com aumento de 150 x.

Figura 43 – Micrografia da região de fratura de compósitos com inserção de argila nas proporções de 15 % de argila (a) e 25 % de argila (b).



Fonte: Autoria própria, 2019.

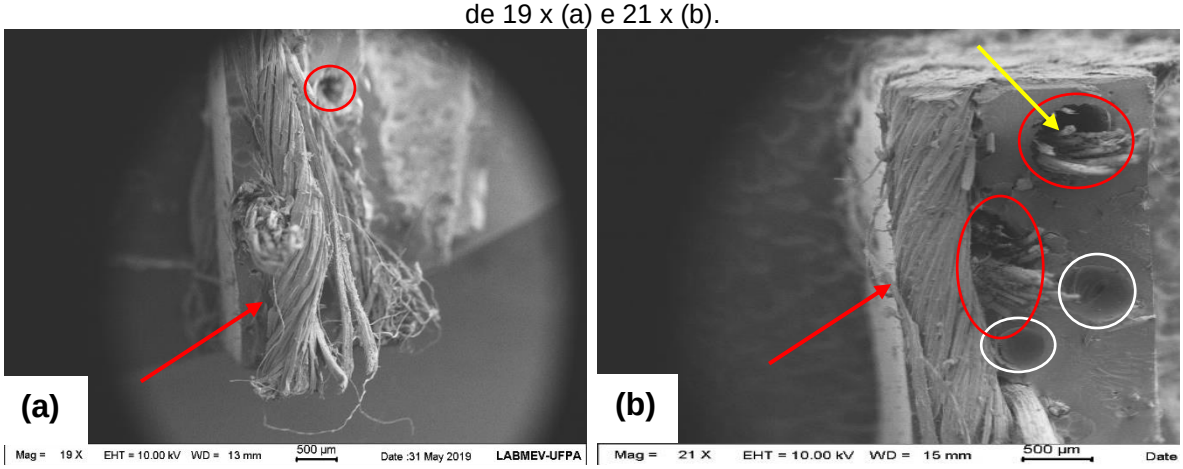
Por meio da análise da região de fratura dos compósitos da Figura 43 pode-se observar que, em geral, há uma boa dispersão das particulas de argila na matriz poliéster (círculos brancos), o tamanho de partícula pode ter contribuído para essa boa dispersão e, consequentemente, para o aumento da resistência mecânica. Além disso, observa-se, indicado com seta amarela, alguns aglomerados do particulado, provavelmente originado no momento da homogeneização da mistura acelerador-argila-catalisador. Para mais, com circulos vermelhos pode-se verificar a presença de poucos vazios, provavelmente causado durante a solicitação mecânica, onde a argila pode ter sido arancada ou pode ter sido a presença de bolhas do processo de

fabricação. Por fim, os circulos de cor amarela indicam propagação de trincas geradas provavelmente no momento da ruptura dos corpos de prova.

Araújo *et al* (2006) avaliou a micrografia da região de fratura de compósitos polietileno/argila Brasgel e observou vazios que provavelmente deve ter sido argila arrancada da matriz durante a solicitação mecânica ou pode ter sido de bolhas geradas por conta do processo de moldagem.

Foi realizada microscopia eletrônica de varredura na região de fratura de compósitos poliéster/tecido de juta, submetidos ao ensaio de tração, com aumento de 19 x (Figura 44a) e 21 x (Figura 44b).

Figura 44 – Micrografia da região de fratura de compósitos com matriz e tecido de juta com aumento de 19 x (a) e 21 x (b).



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 44a pode ser observado a interação da resina com o tecido de juta, onde observa-se a dificuldade de impregnação da resina na fibra, observa-se também a presença de vazio (círculo vermelho), provavelmente originado de bolhas durante o processo de prensagem. A seta em vermelho mostra a fibra disposta de maneira transversal ao sentido na força aplicada, o que pode contribuir para a diminuição da resistência.

A Figura 44b mostra também a presença de vazios (círculos vermelhos) em dois pontos, provavelmente devido a baixa interação da fibra com a resina. Além de vazios, nota-se a presença de bolhas (círculos brancos), possivelmente originados do processo de fabricação. Ademais, com a seta amarela observa-se, na fibra, rompimento por conta do ensaio de tração, mas não o mecanismo de *pull-out*, além da dificuldade de molhabilidade da resina na fibra. Por fim, a seta em vermelho mostra

uma fibra disposta transversalmente ao carregamento ou força aplicada, o que, também, pode ter contribuído para redução da resistência.

Merlini *et al* (2012) avaliou e micrografia de compósitos epoxy/fibra de juta e observou boa quantidade de fibras arrancadas da matriz e cavidades entre a fibra e a matriz indicando baixa adesão superficial entre matriz e fibra.

Esmeraldo (2006) observou que compósitos com fibras naturais sem tratamento apresentam baixa interação com a matriz, a exposição da fibra evidencia esse fato. Fibras com tratamento apresentam redução dessa exposição e distribuição mais efetiva da fibra na matriz.

4.5 Retardo à chama

A Tabela 8 mostra os resultados do ensaio de flamabilidade para os compósitos tanto com argila quanto para os compósitos com argila e tecido de juta.

Tabela 8 – Taxa de queima (em mm/min) para os compósitos estudados.

Tipo de amostra	Proporção de argila/juta (%)	Taxa de queima (mm/min)
Matriz plena	0 / 0	24,98 ± 2,881
Argila	5 / 0	27,43 ± 2,784
Argila	15 / 0	23,11 ± 2,241
Argila	25 / 0	20,29 ± 1,398
Matriz/juta	0 / 4,56	20,64 ± 1,055
Argila/juta	5 / 4,56	22,35 ± 1,519
Argila/juta	15 / 4,56	21,17 ± 2,223
Argila/juta	25 / 4,56	16,79 ± 3,143

Fonte: autoria própria, 2019.

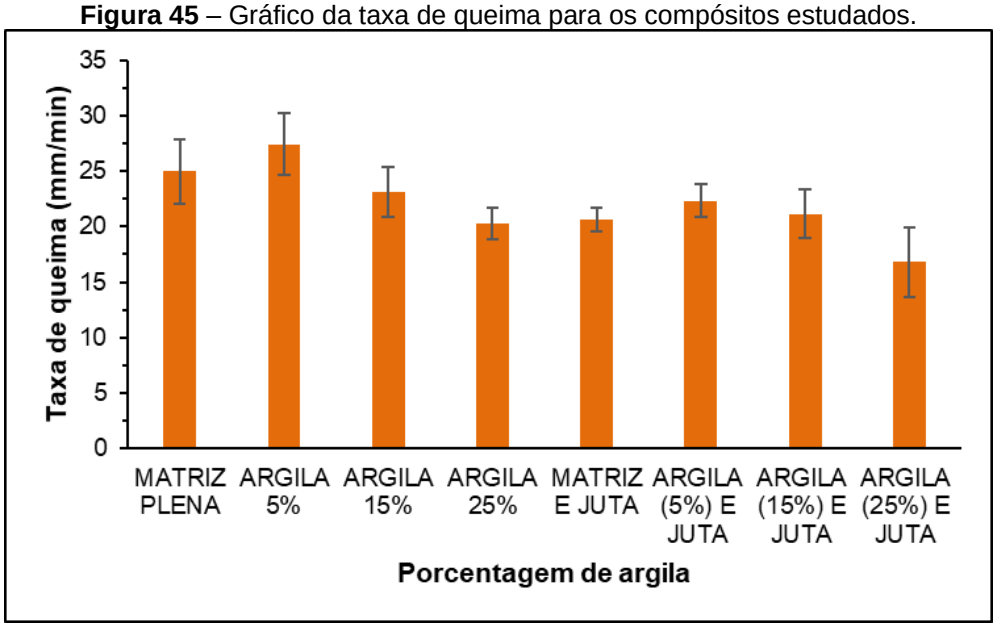
As taxas de queima apresentadas evidenciam que, em geral, houve diminuição com relação a matriz plena, o que indica um resultado positivo para retardo à chama. O menor valor de taxa de queima foi para o compósito de argila (25 %) e juta, inferindo que a junção da argila (em 25 %) e da camada de tecido de juta funcionaram como bons retardantes.

Arndt *et al* (2017) obteve taxa de queima inferior a 10 mm/min para nanocompósitos de polietileno linear de baixa densidade e montmorilonita (um tipo de argila utilizada para a produção de nanocompósitos) organofílica. Já neste trabalho as taxas, para compósitos apenas com argila, foram acima de 20 mm/min.

Na pesquisa de Ribeiro (2011) foi realizado o teste de flamabilidade em compósitos de resina poliéster e fibras da folha do abacaxizeiro, porém foi adicionado retardante de chama em proporções de 20 %, 40 % e 60 %. Os resultados mostraram que com 40 % de retardante a taxa de queima é de 17,79 mm/min, resultado parecido com o menor valor de taxa de queima encontrado no presente trabalho (16,79 mm/min na proporção de argila (25 %) e juta).

O gráfico da Figura 45 mostra a comparação entre os resultados de taxa de queima das composições em análise.

Figura 45 – Gráfico da taxa de queima para os compósitos estudados.



Fonte: Autoria própria, 2019.

De acordo com as normas do Conselho Nacional de Trânsito, o CONTRAN (2014), a taxa de queima para materiais empregados nos revestimentos internos dos veículos não pode exceder 100 mm/min. Comparando os resultados obtidos com esse trabalho percebe-se que a menor taxa obtida está muito inferior as exigências do CONTRAN, o que indica um resultado muito positivo para o presente trabalho.

A norma ASTM D635 especifica que para amostras que possuam de 3 a 13 mm de espessura a taxa de queima linear não deve exceder 40 mm/min, o que está de acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, onde a maior taxa é de 27,43 mm/min.

5 CONCLUSÕES

A fabricação dos compósitos com argila e com tecido de juta ocorreu de maneira adequada e satisfatória. Foi possível, por intermédio do processo manual *hand lay up*, a realização da fabricação para o tipo de material estudado.

As análises obtidas por Difração de Raios-X mostraram composições mineralógicas já esperadas. Em que os picos mais intensos foram de Quartzo, Muscovita e Caulinita. Essas características são tipicamente de uma argila caulinítica.

Com relação aos ensaios físicos a massa específica aparente (MEA) obteve aumento em todas as composições, com relação a matriz plena. A porosidade aparente (PA), em geral, aumentou nas composições, com exceção da composição de 5 % apenas de argila, que diminuiu com relação a matriz plena. E, por último, a absorção de água, aumentou com relação a matriz plena, com exceção das amostras de 5 % apenas de argila. Esses resultados demonstram algo esperado, pois tanto a argila quando a fibra de juta possuem características hidrofílicas, houve absorção dentro do esperado.

Os resultados de resistência à tração mostraram-se favoráveis, principalmente para compósitos apenas com argila. Para compósitos com argila e tecido de juta, as amostras de 4,6 % de tecido de juta com matriz e a amostra de 5 % de argila com juta obtiveram decréscimo em seus valores com relação à matriz plena. Em geral, os resultados demonstram boas características mecânicas para os compósitos.

O módulo de elasticidade no ensaio de tração das composições, em geral, aumentou com relação a matriz plena. A exceção foi a amostra de 4,56 % de juta com matriz que teve diminuição de seu valor. O alongamento, em tração, aumentou com relação a matriz plena, para compósitos apenas com argila e para compósitos com argila e tecido de juta houve tendência de diminuição.

Os resultados obtidos com o ensaio de flexão evidenciaram valores muito favoráveis de resistência. Todos os resultados foram superiores a resistência da matriz plena. O que pode inferir que houve boa compactação e homogeneização do particulado com a resina e em compósitos com argila e tecido de juta, o particulado provavelmente preencheu espaços deixados, de certa forma, pela falta de aderência da resina na fibra.

O módulo de elasticidade no ensaio de flexão, em sua maioria, diminuiu com relação a matriz plena. Apenas o valor da composição de 15 % de argila foi superior a matriz plena. O alongamento, para a flexão, diminuiu em todas as composições.

A Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura demonstrou características já esperadas para os compósitos. A análise da fibra de juta mostrou o aspecto da fibra. Nos compósitos apenas com argila a boa dispersão do particulado na matriz contribui para resistência mecânica, apesar de haver poucos vazios e particulado aglomerado. Nos compósitos poliéster/tecido de juta observou-se a região de ruptura da fibra, a presença de vazio e bolhas.

As taxas de queima encontradas mostraram-se como boas retardantes, principalmente quando comparadas a norma. A menor taxa de queima obtida foi do compósito de argila (25 %) e tecido de juta e a maior taxa foi no compósito de 5 % de argila, evidenciando a fibra e a menor quantidade de resina como bons retardantes.

A avaliação das propriedades dos compósitos em estudo mostrou-se, de maneira geral, viável. Propriedades mecânicas obtiveram bons resultados (principalmente em relação a ensaio de flexão). A aplicabilidade destes se torna possível e pode estar relacionada a esforços estáticos.

5.1 Propostas para futuros trabalhos

- Fabricar e caracterizar compósitos com diferentes tipos de fibras e comprimentos, para avaliação de propriedades mecânicas;

- Promover tratamento químico das fibras para avaliação das propriedades, para melhorar a impregnação da resina na fibra;

- Produzir compósitos com outros tipos de particulados e com fibras sintéticas, para avaliação de propriedades mecânicas e resistência à chama;

- Realizar outras caracterizações dos compósitos produzidos, para melhor análise do trabalho.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, Bhawan D.; BROUTMAN, Lawrence J.; CHANDRASHEKHARA, K. **Analysis and performance of fiber composites**. 3ª edição. Nova Delhi: Wiley, 2015. 562 p.

ALMEIDA, Nuno Miguel Bastos Gomes. **Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta**. 2012. 181 p. Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) D3039. **Standard test method for tensile properties of Polymer matrix composite materials**. Annual book of ASTM standards. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) D635. **Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position**. Annual book of ASTM standards. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) D790. **Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. Annual book of ASTM standards. 2010.

AQUINO, Regina Coeli Martins Paes. **Desenvolvimento de compósitos de fibras de piaçava da espécie *Attalea funifera mart* e matriz de resina poliéster**. 2003. 121 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2003.

ARAÚJO, Edcleide M. *et al*. Preparação de argilas organofílicas e desenvolvimento de nanocompósitos com matrizes poliméricas de polietileno e nylon6. parte 1: comportamento mecânico. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.16, n. 1, p.38-45, 2006.

ARNDT, Aline *et al*. Avaliação das propriedades físico-químicas de nanocompósitos de polietileno linear de baixa densidade e montmorilonita organofílica obtidos por extrusão. **Revista matéria**, suplemento, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 12766. **Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente, absorção d'água aparente**, 1992.

AYRES, Ana Ligia Sampaio Neves; OLIVEIRA, Ilderval Neri Bezerra; NÓBREGA, Múcio Marcos Silva. Desenvolvimento de compósitos poliméricos, reforçados com fibras de sisal e nanopartículas, visando aplicações industriais. **IV Encontro Universitário da UFC no Cariri**. 2012.

BAILLIE, Caroline. **Green composites: polymer composites and the environment**. 1ª edição. Cambridge: CRC Press Inc, 2005. 308 p.

BALBINO, Lucineide *et al*. Caracterização de compósitos particulados de polietileno de alta densidade/pó de concha de molusco. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, abril. 2017.

BARBOSA, Renata Tatianny Soares Alves; CARVAHO, Laura Hecker; CANEDO, Eduardo Luis. Inflamabilidade de nanocompósitos de polipropileno/argila organofílica. **Polímeros**, Piauí, v. 24, n. 3, p. 307-313, 2014.

BEER, Ferdinand P. *et al*. **Mecânica dos materiais**. 5ª edição. Porto Alegre: AMGH, 2011. 789 p.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Resistência dos materiais para entender e gostar: um texto curricular**. 1ª edição. São Paulo: Studio Nobel, 1998. 301 p.

BRASILJUTA. **Juta**. 2016. 1 fotografia.

CAETANO, Mário J.L. **Flamabilidade: ensaios de resistência à chama. Desenho esquemático de ensaio de resistência à chama**. 2019. 1 fotografia.

CALLISTER JR., William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 866 p.

CAMPBELL, Flake C. **Structural Composite Materials**. 1ª edição. Ohio: ASM International, 2010. 599 p.

CAMPILHO, Raul Duarte Salgueiral Gomes. **Modelação da execução de reparações em materiais compósitos**. 2005. 215 p. Dissertação (Especialização de Construções Mecânicas) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2005.

CANEVAROLO JR, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros**. 2ª edição. São Paulo: Artliber, 2002. 275 p.

CASARIL, Alexandre *et al*. Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 408-419, out. 2006.

CHUNG, Deborah D.L. **Composite materials: science and applications**. 2ª edição. Buffalo: Springer, 2010. 343 p.

CHAWLA, Kristian K. **Composite materials: science and engineering**. 3ª edição. Nova Iorque: Springer, 2012. 533 p.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN) – **Materiais para revestimento interno de veículos automotores**. 2014.

COSTA, J.H.B.; RODRIGUES, M.C.G.; SILVA, S.S. Caracterização tecnológica da argila utilizada no processo produtivo de cerâmica artesanal do distrito de Icoaraci, em Belém do Pará. **XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**. P. 233-240, 2013.

CUPERTINO, Leandro Fontoura. **Modelagem do módulo de Young em nanocompósitos através de inteligência computacional**. 2009. 79 p. Dissertação (Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2009.

DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. **Engineering mechanics of composite materials**. 2ª edição. Nova Iorque: Oxford University Press, 2006. 403 p.

DA SILVA, Rosana Vilarim *et al*. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. **Revista Matéria**, v. 13, n. 1, p. 154-161, jan. 2008.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. 1ª edição. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p.

DIBENEDETTO, Anthony T.; JONES, Keith D. Tailoring of interface in glass fiber reinforced polymer composites: a review. **Material Science and Engineering**, v. 302, n. 1, p. 74-82, abril. 2001.

ESMERALDO, Milena Alencar. Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural. 2006. 101 p. Dissertação (Química Orgânica e Inorgânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

GAMA, Daniel Pereira Nunes. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. 2017. 71 p. Dissertação (Ciências em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaios dos materiais**. 1ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 246 p.

GOMES, Celso Figueiredo. **Argilas: o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Colouste Gulbenkian, 1986. 457 p.

GOMES, Leila Verônica da Rocha. **Preparação e caracterização de nanocompósitos de polipropileno reforçados com argila verde lodo e fibra da castanha-do-Brasil**. 2015. 89 p. Tese (Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos materiais**. 7ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 628 p.

HOLANDA, Elisângela Bezerra das Neves. **Morfologia e propriedades mecânicas da fibra de sisal unidirecional e em sobreposição de compósito com resina epóxi**. 2013. 1 fotografia.

HULL, D.; CLYNE, T.W. **An introduction to composite materials**. 2ª edição. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996. 326 p.

JONES, Robert M. **Mechanics of composite materials**. 2ª edição. Philadelphia: Taylor e Francis, 1999. 507 p.

JOSÉ NETO, R. A.; CARVALHO, Laura H.; ARAÚJO, Edcleide M. Influência da adição de uma carga nanoparticulada no desempenho de compósitos poliuretano/fibra de juta. **Polímero: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 1, p. 10-15. 2007.

JOSEPH, Kuruvilla; ELITON, S. Medeiros; CARVALHO, Laura H. **Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal**. 1999. 1 fotografia.

KELLY, A.; MILEIKO, S.T. **Handbook of composites**. Volume 4. North-Holland: Elsevier Science, 1983. 586 p.

KURUVILLA, J.; MATTOSO, L.H.C. Sisal fibre reinforced polymers composites, status and future. **Symposium of natural polymers and composites**. São Pedro, 2000. 606 p.

LEVY NETO, Flamínio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2016. 418 p.

LIMA, Amanda Camerini. **Caracterização e propriedades de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado**. 2009. 95 p. Tese (Engenharia e Ciência dos Materiais – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2009.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio Mendes. **Introdução a polímeros**. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 187 p.

MARINELLI, Alessandra L. *et al*. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 92-99. 2008.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia**. 1ª edição. São Paulo: Artliber, 2011. 333 p.

MATERIAMUNDI. **Manta de fibra natural**. 2019. 1 fotografia.

MENEZES, Patricer Lulumba. **Desenvolvimento e caracterização de um compósito polimérico reforçado com resíduos têxteis de tecido de juta e malha de poliéster**. 2018. 98 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade federal do Rio Grande do Norte, 2018.

MERLINI, Claudia *et al*. Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Juta no Comportamento Mecânico de Compósitos de Matriz Epóxi. **Polímeros**, v. 22, n.4, p.339-344, 2012.

MONTEIRO, Sergio Neves *et al*. Propriedades de compósitos de tecido de juta descartado reforçando matriz de polietileno reciclado. **Revista Matéria**, v.11, n. 4, p. 403-411. 2006.

MOREIRA, Waldomiro. **Compósitos I: materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências**. 1ª edição. São Paulo: ABMACO, 2008. 615 p.

MOURA, Marcelo F.S.F.; MORAIS, Alfredo B.; MAGALHÃES, Antônio G. **Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2ª edição. Porto: Publindútria, 2010. 368 p.

MÜSSIG, Jörg. **Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications**. 1ª edição. United Kingdom: Wiley, 2010. 523 p.

NAGATANI, Takashi *et al*. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. **Scanning Microscopy**, v. 11, p. 901-909, 1987.

NASCIMENTO, Maria da Paz Ferreira; DIAS, Ayres Guimarães; DOMINGOS, Jorge Luiz de Oliveira. Importância de compósitos sustentáveis fibra natural – polímero para produção de “madeira plástica” para fins naval e náutico. **Revista Pagmar**, n. 6, p.71-75, 2018.

NET COMPOSITES. ***Woven Fabrics***. 2019. 1 fotografia.

NUNES, Kamila Silva. **Influência da Lama Vermelha e Fibra de Curauá *Ananas lucidus*, Mill, nas propriedades físicas e mecânicas em compósitos de poliéster isoftálico**. 2015. 37 p. Dissertação (Engenharia de Processos – Mestrado Profissional) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

OKADA, Akane *et al.* Nylon 6-clay hybrid. **Met Res Soc Symp Proc**, v.171, p. 45-50, 1990.

OLIVEIRA, Helington Neves. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos para aplicação em deck**. 2013. 60f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha do Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2013.

PAOLI, Marco-Aurelio. **Degradação e estabilização de polímeros**. 2ª edição. São Paulo: Chemkeys, 2009. 286 p.

PINNAVAIA, T.J.; BEALL, G.W. **Polymer-clay nanocomposites**. 1ª edição. Estados Unidos: Wiley, 2001. 370 p.

PIRES, Eduardo Nascimento. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. 2009. 55 p. Dissertação (Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

REVISTA TÊXTIL. **Fibra natural em Roving**. 2017. 1 Fotografia.

RIBEIRO, Luciene Mendes. **Estudo da flamabilidade e resistência à chama de compósitos de poliéster insaturado e fibra da folha de abacaxizeiro (PALF)**. 2011. 89 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

RODRIGUES, Jean; SOUZA, José Antônio; FUJIYAMA, Roberto. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão. **Revista Matéria**, v.20, n.4, p. 946-960, maio/junho. 2015.

ROWELL, R.M. *et al*. Utilization of natural fibers in plastic composites: problems opportunities. **Lignocellulosic-plastics composites**. São Paulo: USP-UNESP, 1997, p. 23-51.

SANCHEZ, Elisabete M.S. *et al*. Compósitos de resina poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades. **Polímeros**, v. 20, n. 3, p. 194-200. 2010.

SANTOS, Eylisson André. **Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de matriz de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais**. 2007. 98p. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SANTOS, Pérsio de Souza. **Ciência e tecnologia das argilas**. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 405 p.

SILAEX, Poliéster Insaturado. Imagem de poliéster isoftálico. Disponível em: <http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>. Acesso em: 29 de agosto de 2019.

SILVA, Isabela Leão Amaral da. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras continuas de juta**. 2014. 95 p. Tese (Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

SIMÊNCIO, Éder Cícero Adão. **Ciência dos materiais**. 1ª edição. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016. 216 p.

SOUZA, João Henrique Santos *et al*. Materiais compósitos de matriz poliéster com reforço híbrido de tecido de fibra de juta e mantas de fibra de vidro. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 1, p. 777-790. 2018.

SOUZA, Michelle A.; PESSAN, Luiz A.; RODOLFO JR, Antonio. Nanocompósito de Poli (Cloreto de Vinila) (PVC)/Argilas Organofílicas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 4, p. 257-262. 2006.

TAVARES, Arthur Ruan Dias. **Caracterização mecânica e morfológica de compósitos com fibras de vidro e palha da costa (*Raphia taedigera mart*)**. 2018. 75 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.

UL 94 - ***Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances.*** Estados Unidos, 1996.

VIEIRA, C.M.F.; PINHEIRO, R.M. Avaliação de argilas cauliníticas de Campos dos Goytacazes utilizadas para a fabricação de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 57, n. 343, p. 319-323. 2011.

VIEIRA, Luciano Machado Gomes. **Efeito do tratamento químico e da adição de nano sílica em compósitos híbrido de sisal**. 2013. 83 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2013.

VINSON, JR; CHOU, T. **Composite materiais and their use in structures**. Applied Sei. Publishers Ltd., Londres, 1975.