



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DANIEL REIS BORGES

INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) TRATADAS
QUÍMICAMENTE EM COMPÓSITOS DE POLÍMERO TERMOFÍXO CARREGADAS
COM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE COBRE

BELÉM/PA
2018

DANIEL REIS BORGES

INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) TRATADAS QUÍMICAMENTE EM COMPÓSITOS DE POLÍMERO TERMOFÍXO CARREGADAS COM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE COBRE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos Inorgânicos.

ORIENTADORES: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza.

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa.

BELÉM/PA

2018

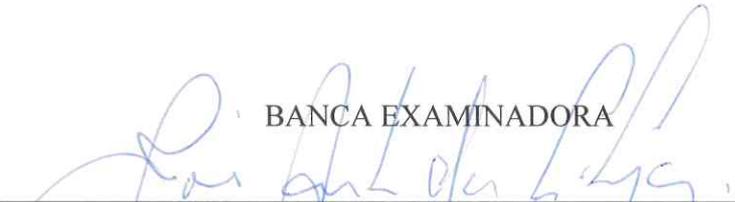
DANIEL REIS BORGES

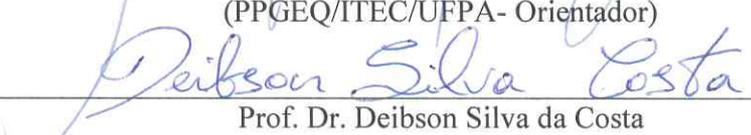
INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) TRATADAS QUÍMICAMENTE EM COMPÓSITOS DE POLÍMERO TERMOFÍXO CARREGADAS COM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO DE MENÉRIO DE COBRE

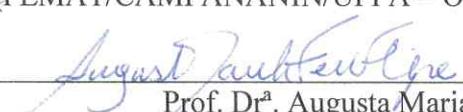
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

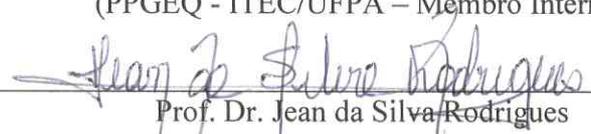
DATA DA AVALIAÇÃO: 27/03/2018

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza
(PPGEQ/ITEC/UFPA- Orientador)


Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMAT/CAMPANANIN/UFPA – Orientador – Membro Externo)


Prof. Dr.ª Augusta Maria Paulain Felipe
(PPGEQ - ITEC/UFPA – Membro Interno)


Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues
(FEMAT/UFPA – Membro Externo)

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

- B732i Borges, Daniel Reis
 Influência do Uso de Fibras de Bambu (*Bambusa Vulgaris*) Tratadas Quimicamente em Compósitos de Polímero Termofixo Carregadas com Resíduo da Indústria de Beneficiamento de Minério de Cobre / Daniel Reis Borges. — 2018
 102 f. : il. color
- Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PPGEQ), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
 Orientação: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza
 Coorientação: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa.
1. Materiais Compósitos. 2. Fibras de Bambu. 3. Resíduo de Cobre. 4. Ensaio Mecânico Tração. I. Souza, José Antônio da Silva, *orient.* II. Título
-

CDD 660.28

*Dedico este trabalho à minha família,
pois, sem ela nada da minha vida
seria possível.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade por Ele oferecida a mim para buscar meus objetivos.

À minha mãe Catarina e meu Pai Eliezer que sempre me incentivaram e apoiaram, oferecendo-me seu amor incondicional e acreditando sempre em mim. A meus irmãos Eliezer Jr e Érika e seu esposo Frank, pelo apoio sempre e pela motivação.

À minha Esposa Maria Naiana pelo amor, paciência e ajuda. Obrigado por acreditar em mim e seguir meus passos nesta longa travessia. Ao meu filho Arthur, meu sobrinho Kaike e a minha enteada Yasmin meus maiores incentivadores.

Ao meu orientador Professor Dr. José Antônio pela excelente orientação, confiança depositada em mim e pelo vasto conhecimento que me foi oferecido sempre com a melhor disposição. Dando o maior esforço para que desenvolvêssemos o melhor trabalho possível.

Ao meu Orientador Deibson Silva da Costa pelo apoio, amplo conhecimento que me brindou sobre fibras naturais e contribuições neste trabalho, sempre dando a melhor disposição.

Ao meu amigo Alessandro Gomes, aluno do doutorado do PRODENA – UFPA, pela ajuda, incentivo e pelos muitos conselhos.

Ao meus amigos Sylvester, Rafael, Thielle, Michelle, Lilian e Edinan por me darem força nos momentos difíceis e por suas amizades.

Ao CNPQ pelo financiamento e pela bolsa durante meu período de pós-graduação.

Ao Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma do PPGEM - UFPA, Responsável do Laboratório de Ensaios Mecânicos e dos alunos de Pós Graduação: Mauro Lobato, Carlos e Emerson pela ajuda nos Ensaios de Tração.

Ao Prof. Fernando da Eng. Mecânica do IFPA, responsável pelo laboratório de Metalografia e o Técnico do laboratório Rogério pela ajuda nas análises das superfícies de fratura dos compósitos no MEV.

A todos que de alguma forma direta ou indiretamente colaboraram para elaboração do presente trabalho.

“O Homem erudito é um descobridor de fatos que já existem - mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir.”

Albert Einstein.

RESUMO

No Presente trabalho foram produzidos: matriz polimérica plena, compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras de bambu nos tamanhos 15 mm e 30 mm, utilizou-se fibras de bambu tratadas quimicamente com hidróxido de sódio 5 % v / v e não tratadas quimicamente, matriz polimérica com incorporação de resíduo de cobre e compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibras de bambu e incorporação de resíduo de cobre. O Resíduo de cobre foi caracterizado através de Difração de Raios-X - DRX, as fibras de bambu foram tratadas com uma solução de hidróxido de sódio a 5 % v / v. Os compósitos foram fabricados por moldagem manual (*Hand-Lay-Up*), moldagem por compressão e a temperatura ambiente ($T = 25^\circ$). Foram avaliadas as propriedades físicas dos compósitos, a propriedade mecânica dos compósitos foram analisadas por meio de ensaio de tração, já as superfícies de fraturas geradas dos compósitos foram verificadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), de modo a se correlacionar os aspectos de fratura com a propriedade mecânica dos compósitos. As propriedades físicas de porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente apresentaram aumento com a adição dos constituintes (resíduos e fibras). Os compósitos com fração mássica 40 % de resíduo de cobre tiveram um valor de 40,24 MPa de resistência à tração, já os compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm com tratamento químico chegaram a um valor de 33,05 MPa, compósitos com reforços de fibras de bambu 30 mm sem tratamento químico atingiram o valor de 33,11 MPa. Os compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e fibras de bambu 15 mm sem tratamento químico apresentaram a melhor resistência a tração chegando ao valor de 37,94 MPa. As superfícies de fratura apresentaram os mecanismos de falhas predominantes para cada série de compósitos fabricados. Para os compósitos com reforços de fibras, incorporação de resíduos e híbridos de maiores resistências mecânicas os mecanismos de falhas predominantes foram o rompimento das fibras e boa distribuição do resíduo na superfície da matriz; para os compósitos com reforço de fibras, incorporação de resíduo e híbridos de menores resistência mecânica os mecanismos de falhas predominantes foram o *pull out* (arrancamento de fibras) e o descolamento da fibra da matriz e concentração do resíduo nas extremidades da matriz.

Palavras-chave: Materiais Compósitos, Ensaio de Tração, Fibras de Bambu, Resíduo Cobre.

ABSTRACT

In the present work were produced: full polymer matrix, composites of polymeric matrix with reinforcement of bamboo fibers in sizes 15 mm and 30 mm, using chemically treated bamboo fibers with 5% v / v sodium hydroxide not chemically treated, matrix polymer with copper residue loading insert and hybrid polymer composites reinforced with bamboo fibers and insertion of copper residue. The copper residue was characterized by X-ray Diffraction - XRD, the bamboo fibers were treated with 5% v / v sodium hydroxide solution. The composites were manufactured by hand-lay-up, compression molding and room temperature ($T = 25\text{ }^{\circ}$). The physical properties of the composites were evaluated, the mechanical properties of the composites were analyzed by means of traction tests. The fracture surfaces generated from the composites were verified by scanning electron microscopy (SEM), in order to correlate aspects of fracture with the mechanical properties of the composites. The physical properties of apparent porosity, water absorption and apparent specific mass increased with the addition of the constituents (residues and fibers). The composites with 40% mass fraction of copper residue had a value of 40.24 MPa of tensile strength, while the reinforced composites of 15 mm bamboo fibers with chemical treatment reached a value of 33.05 MPa, composites with reinforcements of 30 mm bamboo fibers without chemical treatment reached the value of 33.11 MPa. Hybrid composites with insertion of copper residue and 15 mm bamboo fibers without chemical treatment showed the best tensile strength reaching 37.94 MPa. The fracture surfaces presented the predominant failure mechanisms for each series of fabricated composites. For composites with fiber reinforcements, residue incorporation and hybrids with higher mechanical strengths, the predominant mechanisms of failure were fiber disruption and good distribution of the residue on the matrix surface; for composites with fiber reinforcement, incorporation of residues and hybrids of lower mechanical resistance, the mechanisms of predominant failure were the pull out and the detachment of the fiber from the matrix and concentration of the residue at the ends of the matrix.

Keywords: Composite Materials, Mechanical Properties, Traction Tests, Bamboo Fibers, Copper Residue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Classificação dos diversos tipos de compósitos.....	21
Figura 3.2 - Esquema de um compósito de matriz polimérica.....	22
Figura 3.3 - Estrutura química básica do polímero de poliéster isoftálico.....	24
Figura 3.4 - Tipos de fibras e orientações nos materiais compósitos.....	25
Figura 3.5 - Partes da planta de bambu.....	26
Figura 3.6 - Mecanismo de falha em materiais compósitos.....	32
Figura 4.7 - Resíduo de cobre.....	35
Figura 4.8 - Fibras de bambu.....	36
Figura 4.9 - Fibras de bambu em solução alcalina de hidróxido de sódio.....	37
Figura 4.10 - (a) Prensa hidráulica, (b) molde metálico.....	38
Figura 4.11 - Etapas de produção dos compósitos.....	41
Figura 4.12 - Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de tração.....	43
Figura 4.13 - Corpos de provas para o ensaio de tração.....	44
Figura 5.14 - Difração de Raios –X do resíduo de cobre.....	45
Figura 5.15 - Gráfico AA e PA versus proporções dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre.....	47
Figura 5.16 - Gráfico MEA versus proporções dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre.....	47
Figura 5.17 - Gráfico AA e PA versus proporções dos compósitos com reforço de fibras de bambu.....	49
Figura 5.18 - Gráfico MEA versus proporções dos compósitos com reforço de fibras de bambu.....	50
Figura 5.19 - Gráfico AA e PA versus proporções dos compósitos híbridos.....	52
Figura 5.20 - Gráfico MEA versus proporções dos compósitos híbridos.....	52
Figura 5.21 - Comportamento de resistência à tração material compósito em função dos resíduos de cobre.....	55
Figura 5.22 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com incorporação de resíduo de cobre: (a) 10 RC e (b) 40 RC.....	57
Figura 5.23 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 15 mm não tratadas.....	59
Figura 5.24 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas: (a) 1 FB e (b) 3 FB.....	61

Figura 5.25 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 15 mm tratadas.....	63
Figura 5.26 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 15 mm tratadas: (a) 1 FB e (b) 3 FB.....	65
Figura 5.27 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 30 mm não tratadas.....	68
Figura 5.28 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratadas: (a) 3 FB e (b) 1 FB.....	70
Figura 5.29 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 30 mm tratadas.....	72
Figura 5.30 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas: (a) 2 FB e (b) 1 FB.....	74
Figura 5.31 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 15 mm não tratadas.....	76
Figura 5.32 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 15 mm não tratado: (a) 20 RC + 3 FB e (b) 10 RC 10 + 3 FB.....	78
Figura 5.33 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 15 mm tratadas.....	81
Figura 5.34 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 15 mm tratado: (a) 10 RC + 3 FB e (b) 20 RC + 3 FB.....	83
Figura 5.35 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 30 mm não tratadas.....	85
Figura 5.36 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 30 mm não tratado: (a) 30 RC + 3 FB e 20 RC + 3 FB.....	87
Figura 5.37 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 30 mm tratadas.....	90
Figura 5.38 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 30 mm tratado: (a) 10 RC + 3 FB e (b) 20 RC + 3 FB.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características apresentadas pelos compósitos poliméricos.....	20
Tabela 3.2 - Principais resinas de poliéster.....	23
Tabela 3.3 - Composição química do resíduo de cobre.....	30
Tabela 3.4 - Principais minerais de importância comercial.....	30
Tabela 4.5 - Característica da resina isoftálica insaturada.....	34
Tabela 4.6 - Quantidade de placas e corpos de prova fabricados.....	40
Tabela 5.7 - Resultados dos ensaios de MEA, AA e PA.....	46
Tabela 5.8 - Resultados dos ensaios de MEA, AA e PA.....	48
Tabela 5.9 - Resultados dos ensaios de MEA, AA e PA.....	51
Tabela 5.10 - Resultado do ensaio de tração dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre.....	53
Tabela 5.11 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre.....	55
Tabela 5.12 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 10 RC 20 RC, 30 RC, 40 RC e 50 RC.....	56
Tabela 5.13 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos reforçados com fibras de bambu 15 mm sem tratamento.....	58
Tabela 5.14 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas.....	60
Tabela 5.15 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 15 mm não tratadas.....	60
Tabela 5.16 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos reforçados com fibras de bambu 15 mm com tratamento.....	62
Tabela 5.17 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm tratadas.....	64
Tabela 5.18 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 15 mm tratadas.....	64
Tabela 5.19 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos reforçados com fibras de bambu 30 mm sem tratamento.....	67
Tabela 5.20 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratadas.....	69

Tabela 5.21 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 1 FB 2 FB e 3 FB 30 mm não tratadas.....	69
Tabela 5.22 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos reforçados com fibras de bambu 30 mm com tratamento.....	71
Tabela 5.23 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas.....	73
Tabela 5.24 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 1 FB 2 FB e 3 FB 30 mm tratadas.....	73
Tabela 5.25 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos híbridos com incorporação de resíduos de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm sem tratamento.....	75
Tabela 5.26 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas.....	77
Tabela 5.27 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC+ 3 FB e 30 RC + 3 FB 15 mm não tratadas.....	78
Tabela 5.28 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos híbridos com incorporação de resíduos de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm com tratamento.....	80
Tabela 5.29 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm tratadas.....	82
Tabela 5.30 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 15 mm tratadas.....	82
Tabela 5.31 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos híbridos com incorporação de resíduos de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm sem tratamento.....	84
Tabela 5.32 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm não tratadas.....	86
Tabela 5.33 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 30 mm não tratadas.....	87

Tabela 5.34 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos híbridos com incorporação de resíduos de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm com tratamento.....	89
Tabela 5.35 - Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas.....	91
Tabela 5.36 - Resultados do teste de tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 30 mm tratadas.....	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

10 RC - 10 % Resíduo de Cobre
20 RC - 20 % Resíduo de Cobre
30 RC - 30 % Resíduo de Cobre
40 RC - 40 % Resíduo de Cobre
50 RC - 50 % Resíduo de Cobre
1 FB - 1 % Fibras de Bambu
2 FB - 2 % Fibras de Bambu
3 FB - 3 % Fibras de Bambu
ASTM - Sociedade Americana para Testes e Materiais
AA - Absorção de Água
CO₂ - Dióxido de Carbono
DRX - Difração de Raios – X
FM - Fração Mássica
MEA - Massa Específica Aparente
MEV - Microscópico Eletrônico de Varredura
MI - Massa Imersa
MU - Massa Úmida
MS - Massa Seca
MP - Matriz Plena
NaOH - Hidróxido de Sódio
NT - Não Tratada
PA - Porosidade Aparente
PPGEQ - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
T - Tratada
UPR - Resina de Poliéster Insaturado
UV - Ultra Violeta
UFPA - Universidade Federal do Pará
VALE S.A - Mineradora Vale Sociedade Anônima

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPÉCIFICOS.....	19
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	20
3.2 MATRIZ POLIMÉRICA.....	21
3.2.1 Resina Poliéster Isoftálica.....	23
3.3 FIBRAS VEGETAIS.....	24
3.3.1 Bambu (<i>Bambusa Vulgaris</i>).....	26
3.3.1.1 Fibras de Bambu (<i>Bambusa Vulgaris</i>).....	27
3.3.2 Tratamento Químico nas Fibras Vegetais.....	28
3.4 CARGAS NOS COMPÓSITOS.....	28
3.4.1 Resíduo Industrial: Cobre.....	29
3.5 ENSAIOS MECÂNICOS.....	31
3.6 FRACTOGRAFIA.....	32
4 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	34
4.1 MATERIAS SINTÉTICOS USADOS.....	34
4.2 MATÉRIAS PRIMAS USADAS.....	35
4.2.1 Resíduos Industriais: Cobre.....	35
4.2.2 Fibra Natural: Bambu.....	35
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	36
4.3.1 Caracterização do Resíduo de Cobre.....	36
4.3.1.1 Difração de Raios – X (DRX).....	36
4.3.2 Tratamento Químico nas Fibras Vegetais.....	37
4.3.3 Produção dos Compósitos.....	37
4.3.3.1 Etapas da Produção dos Corpos de Prova.....	38
4.3.4 Caracterização Física dos Compósitos Produzidos.....	42
4.3.5 Ensaio de Resistência a Tração.....	43
4.3.6 Análise das Superfícies de Fratura.....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE COBRE.....	45

5.1.1 Difração de Raios - X.....	45
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS.....	46
5.2.1 Ensaio de Massa Específica Aparente (MEA), Absorção de ÁGUA (AA) e Porosidade Aparente (PA).....	46
5.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	53
5.3.1 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos com Incorporação de Resíduo de Cobre.....	53
5.3.2 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos com Reforço de Fibras de Bambu 15 mm Não Tratadas.....	58
5.3.3 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Com Reforço de Fibras de Bambu 15 mm Tratadas.....	62
5.3.4 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Com Reforço de Fibras de Bambu 30 mm Não Tratadas.....	67
5.3.5 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Com Reforço de Fibras de Bambu 30 mm Tratadas.....	71
5.3.6 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Híbridos com Incorporação de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu 15 mm Não Tratadas.....	75
5.3.7 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Híbridos com Incorporação de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu 15 mm Tratadas.....	80
5.3.8 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Híbridos com Incorporação de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu 30 mm Não Tratadas.....	84
5.3.9 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Híbridos com Incorporação de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu 30 mm Tratadas.....	89
6 CONCLUSÕES.....	94
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
REFERÊNCIA	96

1 INTRODUÇÃO

O uso crescente de materiais compósitos em vários domínios tecnológicos modernos despertou atenção considerável nas pesquisas de materiais reforçados e processos avançados de produção. Durante muito tempo esta tecnologia ficou restrita, mas atualmente ela vem sendo aplicada principalmente nas indústrias automotivas, esportivas e de construção civil, pois esses são materiais que apresentam baixo peso (leveza) e um desempenho, principalmente mecânico, superior aos materiais convencionais (TORRES, 2013).

Os Compósitos formados por matrizes poliméricas e fibras vegetais constituem uma das maiores áreas de interesse na pesquisa de materiais compósitos. Este interesse surgiu com mais intensidade no início da década de 90 devido às exigências das autoridades legislativas quanto ao uso e destino final de fibras sintéticas e resinas derivadas do petróleo e a maior conscientização dos consumidores, da necessidade de preservação do meio ambiente e de fontes naturais renováveis (SILVA, 2003).

O uso de fibras vegetais como reforço em matrizes poliméricas traz como vantagens principais a introdução de propriedades desejáveis ao material final, além de baixo custo de processo e efeitos socioeconômicos positivos (SARANDI, 2002).

Para que as fibras naturais e a matriz polimérica atuem conjuntamente em uma determinada aplicação, o contato interfacial entre elas tem que ser adequado. A modificação superficial da fibra diminui o seu caráter hidrofílico e aumenta na maioria das vezes a adesão com a matriz polimérica. Muitos trabalhos indicam que a modificação superficial das fibras naturais antes de ser incorporada como reforço em matrizes poliméricas reduz a diferença de polaridade e melhora a compatibilidade entre fibra e matriz (PAULA, 2011).

Já os compósitos com adição de cargas minerais, por exemplo, o resíduo de cobre, que são substâncias inorgânicas compostas por grãos pouco flexíveis que são incorporados à massa de polímero; os polímeros, por sua vez, são substâncias orgânicas formadas a partir da polimerização de compostos orgânicos, sendo constituídos por cadeias carbônicas flexíveis e moldáveis (CANEVAROLO, 2007).

Estudos sobre as cargas minerais inseridas em misturas com polímeros, os compósitos, visam estabelecer qual carga mineral é mais adequada para ser usada em conjunção com um determinado tipo de polímero de modo a se atingir propriedades previamente estabelecidas. Não é qualquer carga mineral que, misturada com determinado polímero, fará com que o compósito apresente as características físicas e químicas desejadas (LIMA, 2007).

Dentre as matrizes poliméricas utilizadas para a produção de compósitos, a matriz de poliéster tem se destacado devido as suas boas propriedades mecânicas, baixa viscosidade, alta molhabilidade e baixo custo. Poliésteres insaturados são extremamente versáteis em suas propriedades e aplicações e tem sido um popular termofixo usado como matriz polimérica em compósitos. O poliéster é amplamente produzido industrialmente e possui muitas vantagens quando comparadas às outras resinas termofixas, incluindo capacidade de cura (“endurecimento da resina”) a temperatura ambiente, boas propriedades mecânicas (AZIZ *et al.*, 2005).

Um dos parâmetros mais importantes em materiais compósitos, com uma ou mais fases contínuas, é a interface entre o reforço e a matriz. A interface é a região onde ocorre o contato entre os componentes do compósito. Essa região é a primeira responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço. A adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface pode promover o início de falhas, comprometendo o desempenho do compósito. Portanto, além das propriedades individuais de cada componente do compósito, a interface deve ser a mais adequada possível para garantir a combinação das propriedades envolvidas (DANIEL e ISHAI, 2006).

Este trabalho procurou desenvolver compósitos com o mínimo de processamento tecnológico nas suas respectivas etapas produtiva. Foi avaliado o comportamento mecânico (Tração) e propriedades físicas da matriz polimérica plena, compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras de bambu, tamanhos de 15 mm e 30 mm, fibras tratadas quimicamente com hidróxido de sódio 5 % v / v e sem tratamento químico, compósitos com incorporação de resíduo de cobre, além de compósitos híbridos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinação da influência do uso de fibras de bambu (*bambusa vulgares*) tratadas quimicamente e não tratadas na confecção de placas de compósitos de base polimérica carregadas com resíduo da indústria do beneficiamento de minério de cobre.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos Específicos são:

- Desenvolver compósitos de matriz polimérica plena, compósito polimérico reforçado com fibras de bambu, nos tamanhos 15 mm e 30 mm, tratadas quimicamente e sem tratamento, compósito polimérico com incorporação de resíduo de cobre e compósitos polimérico híbridos;
- Caracterização mineralógica do resíduo industrial de cobre;
- Determinar Fisicamente (Absorção Aparente, Porosidade Aparente, Massa Específica Aparente), matriz polimérica plena e os compósitos confeccionados;
- Avaliar mecanicamente (Tração), matriz polimérica plena e os compósitos produzidos;
- Analisar as superfícies de fraturas geradas na matriz polimérica plena e nos compósitos produzidos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um compósito pode ser definido como sendo um material multifásico obtido através da combinação de diferentes materiais com o intuito de adquirir propriedades desejadas, as quais não podem ser obtidas em cada componente individualmente. Estes materiais podem ser projetados de forma a possuir as características e propriedades desejadas de acordo com os materiais selecionados, suas proporções, distribuição, morfologia, textura, bem como a estrutura e composição da interface entre os seus componentes (CHUNG, 2010).

Os compósitos podem ser produzidos a partir de matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas. Há também, uma abundância de compósitos que ocorrem na natureza, como a madeira, que é formada por fibras de celulose resistentes e flexíveis, que são envolvidas e mantidas unidas por meio de um material menos rígido que é a lignina. Os compósitos poliméricos apresentam características peculiares que os fazem ser de fácil utilização nos diversos segmentos industriais, além de serem econômicos (ROCHA, 2015). Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas características essenciais dos compósitos.

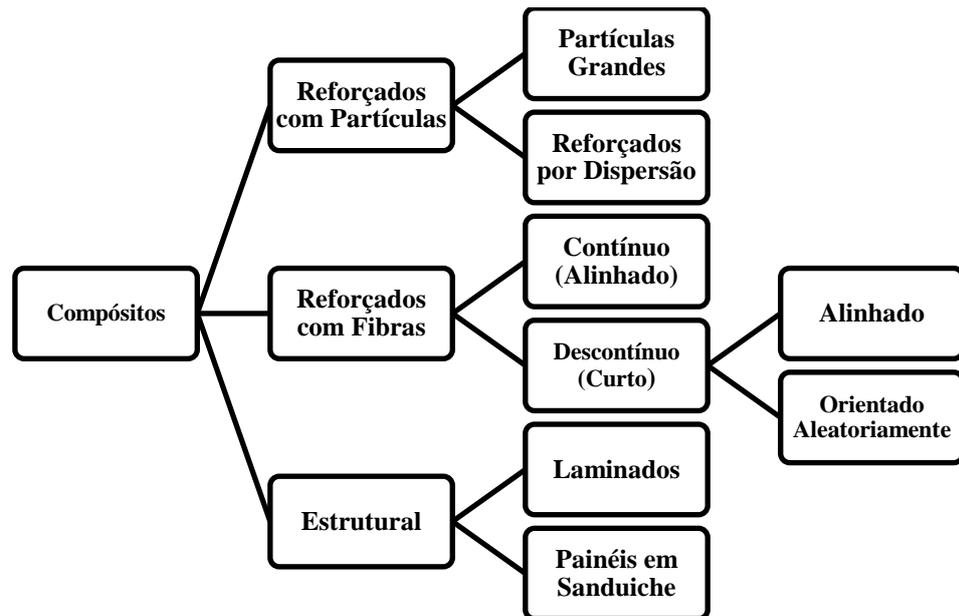
Tabela 3.1: Características apresentadas pelos compósitos poliméricos.

Leveza	Devido ao peso específico das resinas e das fibras, os compósitos poliméricos apresentam um baixo peso específico.
Resistência Química	Materiais com excepcional inércia química, permitindo sua utilização em ambientes quimicamente agressivos.
Durabilidade	Material de alta durabilidade em consequência de sua composição e a ligação polimérica formada durante o processo de moldagem.
Resistência Mecânica	Apresenta excelente resistência mecânica devido as suas características e a variedade de combinações que podem ser realizadas entre as resinas e o material de reforço.
Resistência as Intempéries	Grande resistência aos problemas causados pelos ventos, a umidade, o sol e as mudanças climáticas.
Facilidade de Manutenção	Sujeitos a fáceis e simples técnicas de manutenção.
Flexibilidade Arquitetônica	Os compósitos têm grande vantagem sobre os materiais estruturais, devido a sua fácil modelagem às formas complexas.

Fonte: MARTINS NETO (2010).

Em consequência da variedade de materiais que podem constituir as diferentes fases os compósitos são classificados em três grandes grupos de acordo com o material utilizado como reforço: compósitos com cargas de partículas, compósitos com reforço de fibras e compósitos estruturais (MARTINS NETO, 2016). Na Figura 3.1 é mostrado um esquema da classificação dos diversos tipos de compósitos.

Figura 3.1: Classificação dos diversos tipos de compósitos.

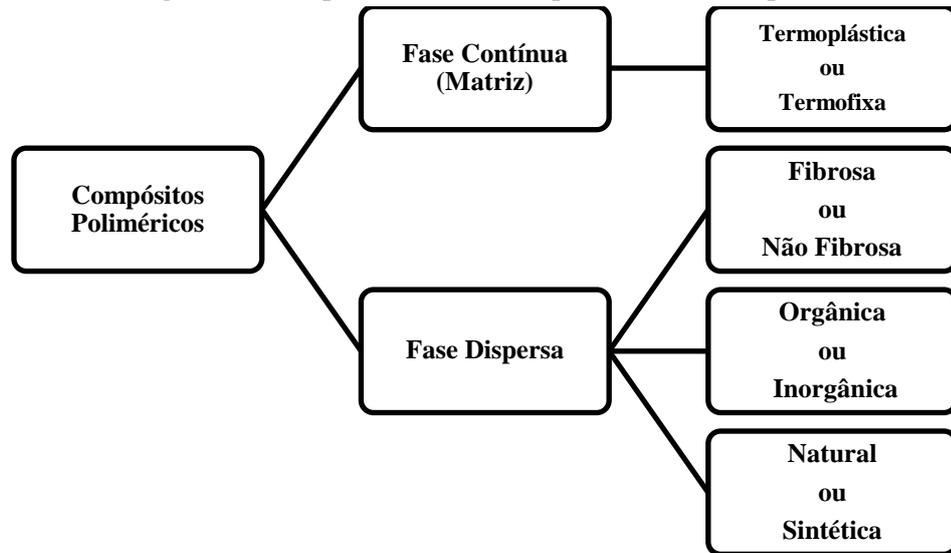


Fonte: CALLISTER JR (2012).

3.2 – MATRIZ POLIMÉRICA

As matrizes se classificam em: orgânicas (poliméricas), metálicas e cerâmicas. As matrizes poliméricas são as mais utilizadas devido à versatilidade de formulação e possuem baixo custo de processamento, quando em comparação com outras matrizes (VINCENZINE, 1995). A Figura 3.2 demonstra um esquema de um compósito de matriz polimérica.

Figura 3.2: Esquema de um compósito de matriz polimérica.



Fonte: RABELLO (2000).

As propriedades da matriz polimérica dependem da composição da resina e consequentemente do tipo de polímero que as constitui. Em polímeros, o processamento consiste na transformação do mesmo, como matéria-prima, em um produto final. A escolha do tipo de processo de transformação de um polímero em um produto polimérico é feita com base nas suas características intrínsecas, na geometria do produto a ser moldado e na quantidade do produto que será produzida. O processamento de um polímero pode ser feito utilizando várias técnicas, sendo as principais as seguintes: moldagem por injeção, extrusão (incluindo as técnicas de coextrusão), moldagem por sopro (extrusão-sopro e injeção-sopro), moldagem por compressão, calandragem, termoformagem a vácuo, moldagem rotacional (ou rotomoldagem), *Hand-Lay-Up* e *Spray Up* (BRASKEM, 2002).

O *Hand-Lay-Up* é um processo de moldagem manual que não exige altas pressões, que possui um custo relativamente baixo devido à facilidade de manufatura e que não envolve o investimento em equipamentos. Este processo não demanda mão de obra especializada, contudo, possui um baixo rendimento e uma maior possibilidade de defeitos durante a produção do produto (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

3.2.1 - Resina Poliéster Isoftálica

Quando se trabalha com compósitos, as resinas poliméricas, têm se tornado o principal material utilizado nas matrizes destes compósitos, elas são formadas por longas moléculas ou macromoléculas compostas por uma rede de entidades estruturais simples denominadas meros. Essas cadeias moleculares podem combinar-se entre si, com outras moléculas semelhantes, ou outros compostos (FERREIRA *et al.*, 2006).

As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis, que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. O tipo de ácido influencia as propriedades finais da resina e poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas podem ser produzidas. Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada (SILVA, 2010).

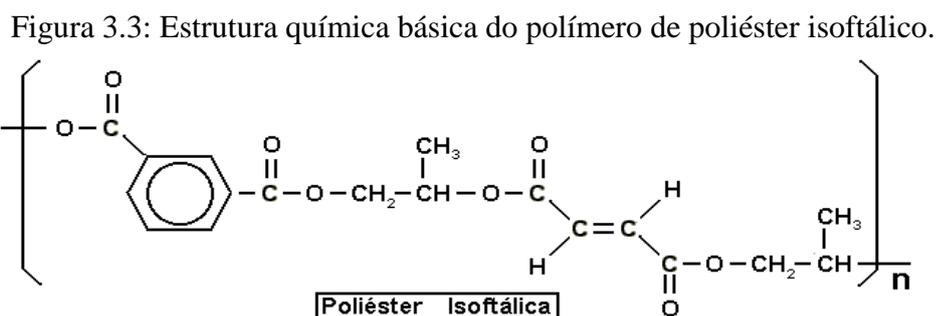
Os principais tipos de resinas de poliéster insaturado (UPR – *Unsaturated Polyester Resin*) são: resina Ortoftálica, Tereftálica, Isoftálica e Bisfenólica. Como a UPR é sólida à temperatura ambiente, normalmente usam-se monômeros apropriados, como por exemplo, o estireno, que é usado para diminuir a viscosidade e facilitar a processabilidade da resina, além de participar do processo de polimerização da resina (TARGA *et al.*, 2009). A Tabela 3.2 mostra as principais resinas de Poliéster.

Tabela 3.2: Principais resinas de poliéster.

Principais Resinas	Comentários
Ortoftálica	Resina mais comum de menor custo para usos básicos
Tereftálica	Possui resistências físicas inferiores a ortoftálica, porém baixa resistência a UV
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Bisfenólica	Possui melhores características químicas e térmicas que as anteriores.

Fonte: SILAEX (2017).

O ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, não sofre desvantagem de regeneração, como no caso das ortoftálicas, e conseqüentemente, podem ser obtidos poliésteres de alto peso molecular, ou seja, com cadeias mais longas. Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica, pois absorvem melhor impactos. Conseqüentemente tornam-se polímeros de maior resistência química e térmica. A Figura 3.3 ilustra esquematicamente a estrutura química básica do polímero de poliéster Isoftálico (SILAEX, 2017).



Fonte: SILAEX (2017).

3.3 FIBRAS VEGETAIS

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

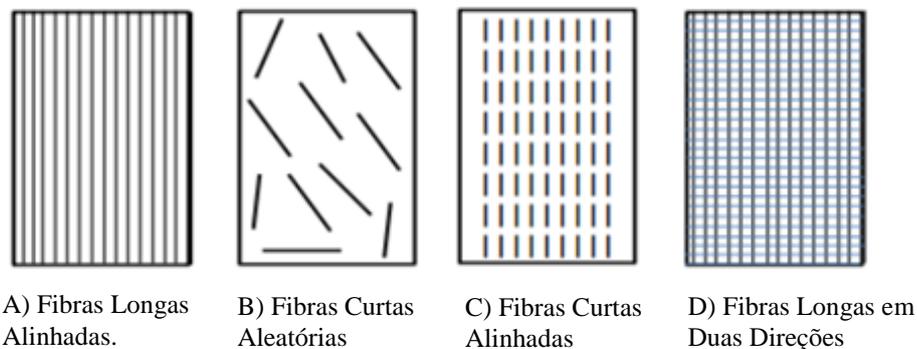
Algumas das fibras Vegetais mais comuns e estudadas no Brasil são as de sisal, coco, juta, curauá, piaçava e bambu. As origens das fibras podem ser do caule, da folha, do fruto ou do tronco. Estas têm diferentes usos como: elementos de veículos, indústria têxtil, reforços de compósitos em matrizes à base de polímeros e de cimento. Cada fibra tem propriedades diferentes e únicas, dependendo de fatores como diâmetros da fibra, estrutura, grau de cristalinidade, tipo de extração, e as condições que a planta teve desde sua plantação até seu corte (MARINELLI, MONTEIRO e AMBRÓSIO, 2008).

Fibras vegetais, por serem abundantes, de baixo impacto ambiental quando descartadas e por apresentarem propriedades mecânicas, físicas e térmicas adequadas às aplicações na indústria, estão se tornando alternativas atrativas do ponto de vista econômico e

ambiental. No passado, o desconhecimento da estrutura das fibras vegetais e de suas propriedades, limitou sua utilização. Com os avanços nas pesquisas, a ascensão dos materiais compósitos tem sido facilitada pela introdução de novos materiais, melhorias nos processos de fabricação e desenvolvimento de novos métodos analíticos de teste (CARVALHO, 2003).

Segundo MALLICK (2007), o tipo de fibra, forma, fração, volume e a orientação são muito importantes, pois, influenciam diretamente as propriedades finais dos compósitos. Após a sua inserção, as fibras podem ser curtas ou longas, podendo estar alinhadas ou desalinhadas na matriz do compósito, segundo o tipo de aplicação, como é demonstrado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Tipos de fibras e orientação nos materiais compósitos.



Fonte: LEÃO (2012).

Cada fibra vegetal, denominada de fibra técnica, é constituída de várias fibras elementares fortemente ligadas entre si por um material de cementação, constituído principalmente de lignina. Esta possui uma parede espessa formada por várias microfibrilas que formam espirais ao longo do eixo da fibra, tendo um lumen no centro. Cada fibra elementar é, em essência, um compósito no qual as rígidas microfibrilas de celulose estão envolvidas por uma matriz de lignina e hemicelulose. A lignina atua como o material de cementação, unindo as microfibrilas e a hemicelulose como interface entre a microfibrila de celulose e a lignina (SILVA, 2003).

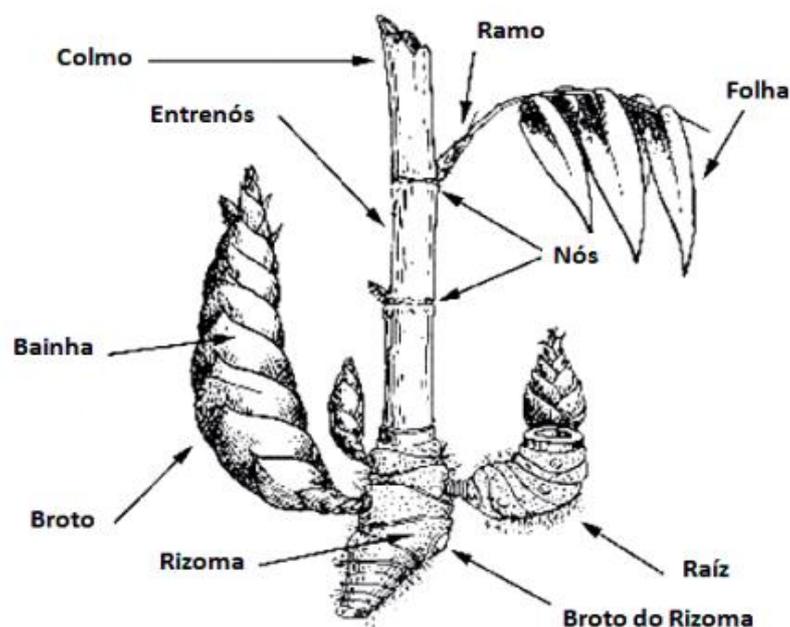
3.3.1 Bambu (*Bambusa vulgaris*)

Os Bambus pertencem à família Gramínea e subfamília Bambusoidea, algumas vezes tratados separadamente como pertencentes à família Bambusacea, com aproximadamente 50 gêneros e 1300 espécies, que se distribuem naturalmente dos trópicos às regiões temperadas, tendo, no entanto, maior ocorrência nas zonas quentes e com chuvas abundantes das regiões tropicais e subtropicais da Ásia, África e América do Sul. Os bambus nativos crescem naturalmente em todos os continentes, exceto na Europa, sendo que 62 % das espécies são nativas da Ásia, 34 % das Américas, e 4 % da África e Oceania (LOPES, 2003).

No Brasil, as espécies nativas são em sua grande maioria enquadradas na categoria de ornamentais, e estão associadas a um meio ambiente específico, como as florestas. A maioria das espécies de bambu que se vê plantadas são exóticas, originárias em sua maior parte de países orientais, de onde foram sendo trazidas e aqui introduzidas desde o tempo do descobrimento, exceção feita ao gênero *Guadua*, originário da América, sendo muito utilizado na Colômbia e Equador, e possuindo várias espécies nativas no Brasil (GRECO, 2011).

A planta do bambu é constituída por diversas partes, na superior, sobre o solo, encontram-se os colmos, os ramos, os entrenós, as folhas, os nós, as bainhas e os brotos e na parte inferior, em baixo do solo, estão os rizomas, os brotos do rizoma e as raízes (KIGOMO, 2007). A Figura 3.5 demonstra Partes da Planta do Bambu.

Figura 3.5: Partes da planta de bambu.



Fonte: KIGOMO (2007).

As principais características comuns às diversas espécies são: As plantas são formadas por colmos, na parte aérea e por rizomas e raízes na parte subterrânea. Os colmos são cilíndricos, em geral ocos, muito resistentes e flexíveis, formados por nós e entrenós de material lenhoso, com superfície externa lisa e sem casca. Os galhos e as folhas formam-se no terço superior dos colmos e representam uma fração pequena do peso total dos mesmos. O crescimento é muito rápido, atingindo a altura máxima em seis meses e a maturidade em três anos. O diâmetro não sofre incremento durante o crescimento. O rendimento florestal é excelente e chega a 40 toneladas por hectare ao ano, semelhante ao eucalipto. A propagação é espontânea, através de novos brotos e dispensa plantio por mais de 100 anos na mesma área (FLUMIGNAN, 2015).

3.3.1.1 Fibras de Bambu (*Bambusa Vulgaris*)

As fibras do bambu são as principais responsáveis pela sua elevada resistência mecânica, elas constituem cerca de 40 a 50 % do tecido, contribuem com 60 a 70 % do peso total do colmo, podendo ocorrer variações entre os gêneros e espécies (GROSSER; LIESE, 1974).

As fibras de bambu possuem vantagens versáteis como, por exemplo: rápida biodegradabilidade, rápida renovação, fácil acessibilidade, possui alta proporção e relação força / peso excelente, o que as torna ideais substituições em potencial para fibras sintéticas utilizadas na produção de compósitos reforçados com fibras (YU *et al.*, 2014).

As fibras, principais responsáveis pela resistência do bambu, têm distribuição variável na seção transversal do colmo, com cerca de 40 a 70 % na parte mais externa e cerca de 15 a 30 % na parte mais interna. Nos nós, as fibras se interconectam e penetram parcialmente no diafragma e nos galhos, resultando em pontos de menor resistência (GHAVAMI, 1988).

3.3.2 Tratamento Químico nas Fibras Vegetais

A grande dificuldade na fabricação de compósitos de materiais poliméricos com fibras naturais está na adesão entre a fibra e a matriz, além da absorção de água pela fibra e sua baixa resistência a ataques químicos e microbiológicos (CARVALHO, 2006).

A estrutura e a natureza da interface fibra matriz desempenham um papel importante nas propriedades mecânicas e físicas dos materiais compósitos porque é através desta interface que ocorre a transferência da carga da matriz para a fibra. Para melhorar a adesão na interface fibra/matriz, as fibras naturais precisam ser submetidas a tratamentos químicos, para que possam interagir melhor com a matriz polimérica (RAZERA, 2004).

A escolha de um tratamento nas fibras vegetais engloba vários fatores que devem ser considerados, tais como, a toxicidade do reagente, facilidade de remoção do reagente em excesso, custo do processo, disponibilidade de recursos, tempo de aplicação, quantidade de resíduos gerados (THOMAS, 2011).

Estudos sobre o tratamento alcalino em fibras de juta, por exemplo, mostraram que a remoção de lignina e hemicelulose afetaram as características de tração das fibras. Quando as hemiceluloses são removidas a região interfibrilar provavelmente se torna menos densa e menos rígida permitindo que as fibrilas se tornem mais capazes de se rearranjarem na direção da deformação. Quando fibras naturais são estiradas, esses rearranjos entre as fibrilas podem resultar em uma melhor distribuição de carga, resultando no desenvolvimento de maior tensão por parte da fibra. Em contraste o amolecimento da região interfibrilar na matriz afeta adversamente a transferência de tensão entre as fibrilas e, portanto, o desenvolvimento global da tensão da fibra submetida à tração. Como a lignina é removida gradualmente, o centro da lamela de junção das células pode se tornar mais plástica e bem mais homogênea devido à eliminação gradual de micro-vazios, enquanto as células principais são afetadas apenas ligeiramente (BLEDZKI *et al.*, 1999).

3.4 CARGAS NOS COMPÓSITOS

Cargas podem ser adicionadas nas resinas por várias razões, mas uma das principais é a redução de custos gerais na manufatura. Quase qualquer material pulverizado pode ser usado como carga, sendo os mais comuns oriundos de depósitos naturais (SAROJA *et al.*, 1998).

Carga mineral corresponde a minerais, ou rochas, que são encontrados na natureza, tais como o calcário (calcita, dolomita), o cobre, o filito, a mica (muscovita, flogopita, biotita), sílica (quartzo, zeólita), talco, pirofilita (agalmatolito), gesso, barita, wolastonita, esmectita (bentonita, montmorilonita, hectorita, saponita) e ilita (LEWIN *et al.*, 2005).

Cada tipo de carga mineral tem propriedades diferentes e estas são influenciadas, por sua vez, pelo tamanho da partícula, pela forma, dureza, composição química, estrutura cristalina, etc. As cargas minerais são produzidas por empresas de mineração que as extraem de jazidas minerais, beneficiam e acondicionam em embalagens adequadas ao mercado consumidor (sacos de 20 a 50 kg), sendo que o mercado brasileiro exige que para adição em polímeros estas devam apresentar granulometria sempre abaixo de 45 μm (LIMA, 2007).

As principais características consideradas no desempenho de uma carga mineral para produção de um compósito são: propriedades mineralógicas (composição química, estrutura cristalina, propriedades ópticas, hábito, clivagem e dureza, densidade, brilho, cor e propriedades físico-químicas de superfície), granulometria, área de superfície específica e relação de aspecto (*aspectratio*) (LIMA, 2007).

3.4.1 Resíduo Industrial: Cobre

O cobre é um dos metais mais antigos da civilização mundial, de acordo com *AJ Wilson's The Living Rock*, o mais antigo objeto de metal feito à mão descoberto até agora é de cobre, e foi encontrado no norte do Iraque datado de 9500 anos A.C. Não é por acaso que, dos quatro mais recentes e importantes períodos que marcam o progresso da humanidade para a vida moderna, um leva o seu nome a partir do próprio metal e outro a partir da sua liga mais amplamente, respectivamente, o Período Calcolítico ou Cobre e a Idade do Bronze. Uma das mais importantes fontes de cobre na antiguidade localizava-se na ilha de Chipre, de onde deriva o seu nome original *cyprium* (minério de Chypre), mais tarde conhecido durante o período romano como *cuprum*, palavra latina que deu origem ao símbolo químico Cu. Na atualidade, o cobre mantém sua relevância para o homem, graças às suas características que lhe conferem diversidade de aplicações no desenvolvimento tecnológico industrial (JESSOP e TOMPSON, 2002).

O elemento químico cobre é um metal de cor avermelhada, calcófilo, de número atômico 29, peso atômico 63,546 u.m.a, ponto de fusão 1.023° C, brilho metálico, ótimo condutor de calor e eletricidade, dúctil e maleável. Apresenta elevada resistência à tensão

física e à corrosão. Possui propriedade não magnética e é de fácil formação de ligas com outros metais (RICHARDSON, 1997).

O cobre em estado puro, denominado cobre nativo, raramente é encontrado na natureza. Normalmente está associado a outros elementos químicos em várias formas estruturais, proporções estequiométricas e combinações químicas, formando diversos minerais.

O rejeito do beneficiamento do cobre é constituído essencialmente por sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro. Cobre e óxidos de magnésio, cálcio, sódio e potássio ocorrem de forma subordinada (SOUZA, 2010). A Tabela 3.3 apresenta a caracterização química de amostras do resíduo de cobre

Tabela 3.3: Composição química do resíduo de cobre.

Componente	Quantidade (%)	Componente	Quantidade (%)
SiO ₂	57,6	Na ₂ O	2,79
Al ₂ O ₃	12,0	K ₂ O	1,69
Fe ₂ O ₃	13,7	TiO ₂	0,42
MgO	4,1	P ₂ O ₅	0,77
CaO	4,37	MnO	0,04

Fonte: SOUZA (2010).

Existem dois grupos de minerais: os primários ou sulfetados, ocorrentes em zonas mais profundas da crosta terrestre, com mais alto teor em cobre, e os oxidados ou secundários, de origem mais superficial, de menor teor em cobre. Entre esses grupos são conhecidas cerca de 170 espécies minerais, das quais apenas algumas apresentam importância econômica (OLIVEIRA 2013). Na Tabela 3.4 são mostrados os principais minerais de importância comercial.

Tabela 3.4: Principais minerais de importância comercial.

Tipo	Nome Usual	Fórmula Química	% de Cu
Minério Primário (Sulfetado)	Calcopirita	CuFeS ₂	34,6
	Bornita	Cu ₅ FeS ₄	63,3
	Calcocita	Cu ₂ S	79,9
	Covellita	CuS	66,5
Minério Secundário (Oxidado)	Cuprita	Cu ₂ O	88,8
	Tenorita	CuO	79,8
	Malaquita	CuCO ₃ .Cu(OH) ₂	57,5
	Azurita	2CuCO ₃ .Cu(OH) ₂	55,3

Fonte: SCHLESINGER (2011).

Para a utilização do cobre em aplicações estruturais é necessário que o material possua elevada resistência mecânica, propriedade que é atingida com a união de outros elementos em suas ligas. Porém no caso do cobre, quando este é submetido a processos de união a outros materiais em altas temperaturas, esta propriedade fica ainda mais comprometida devido à recristalização e crescimento de grãos do cobre que ocorrem em temperaturas relativamente baixas, isto é, abaixo da temperatura de fusão das ligas de adição (WERMUTH, 2015).

3.5 ENSAIO MECÂNICO (TRAÇÃO)

As propriedades mecânicas dos materiais poliméricos são de grande importância e interesse científico e tecnológico, devido aos requisitos e/ou exigências que diversos polímeros existentes devem atender na maior parte de suas aplicações. Valores de propriedades mecânicas, tais como resistência a tensão, módulo de elasticidade, alongação, entre outros, permitem a comparação do desempenho mecânico dos diferentes polímeros, assim como a avaliação dos efeitos decorrentes da modificação do polímero base (reforços, cargas, aditivos, plastificantes), para especificações, etc.

Em termos práticos, a análise das propriedades mecânicas destes materiais é uma das considerações essenciais a serem feitas no processo de seleção dos materiais poliméricos para o projeto de uma peça ou de um produto. Esses valores de propriedades mecânicas são obtidos por meio de ensaios mecânicos padronizados através de normas, dentre os quais se destaca o ensaio de solitação mecânica sob tração (CANEVAROLO, 2007).

E dentre os diversos tipos de ensaios, o mais utilizado é o ensaio de tração, por ser um tipo de ensaio relativamente simples e de realização rápida além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto e a fabricação de peças e componentes. Nos ensaios de tração, os corpos de prova são fixados em dispositivos chamados de garras. As garras são acopladas à travessa fixa e à móvel da Máquina Universal de Ensaio. A taxa de deformação de tração é controlada pelo mecanismo de direcionamento, enquanto a tensão de tração sustentada pela amostra é registrada pela célula de carga, ambos acoplados à travessa fixa (BRANDÃO, 2015).

3.6 FRACTOGRAFIA

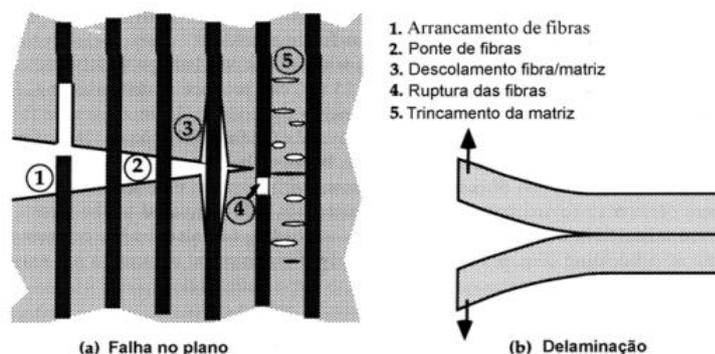
A Fractografia é uma das principais técnicas utilizadas no processo de análise de materiais após falha. Consiste em identificar aspectos fractográficos e estabelecer as relações entre a presença ou ausência desses aspectos com a sequência de eventos da fratura, podendo levar à determinação do carregamento e das condições dos esforços no momento da falha (SOHN e HU, 1995).

A fractografia é a chave para se determinar a sequência dos eventos ocorridos durante o processo de fratura e identificar o estado de tensões atuantes no momento da falha. Outros fatores como condições ambientais e defeitos do material podem contribuir para o início e crescimento da fratura e também podem ser avaliados por esta técnica (FRANCO, 2003).

A caracterização das propriedades mecânicas dos materiais compósitos não é uma tarefa simples. A primeira questão que surge é como aplicar os métodos padrões, desenvolvidos para materiais homogêneos, aos materiais compósitos. Este é especialmente o caso das propriedades locais, como os parâmetros de resistência ao impacto e tenacidade à fratura (BURZIC, 2001).

A Figura 3.6 mostra os vários mecanismos de falha que podem ocorrer em compósitos reforçados por fibras. A fratura raramente ocorre de modo catastrófico, mas tende a ser progressiva, com falhas subcríticas dispersas através do material, o que constitui uma vantagem.

Figura 3.6: Mecanismos de falha em materiais compósitos.



Fonte: ANDERSON (2004).

Os mecanismos de falha local que podem ocorrer durante a fratura de um compósito fibrado são: a ruptura das fibras, a deformação e o trincamento da matriz, o descolamento das fibras, o deslizamento interfacial seguido da ruptura das fibras (*pull out*) e ainda o efeito denominado de ponte de fibras (*fiber bridging*), onde as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras. Vários destes mecanismos podem atuar simultaneamente durante o processo de fratura de um compósito. Obviamente, a importância de cada mecanismo no processo de fratura dependerá do tipo de compósito em estudo, do tipo de carregamento aplicado e da orientação das fibras (SILVA, 2003).

O método de observação utilizado na investigação fractográfica, visual, por microscopia estereoscópica, óptica ou eletrônica, deve atentar não só para a identificação e documentação da morfologia da falha, mas também para informações que ajudem a determinar as causas da falha. Assim 3 (três) operações básicas devem ser seguidas: (1) classificação do tipo de falha, (2) mapeamento da trinca e (3) análise química da superfície de fratura. A primeira classificação, envolvendo o tipo de falha, conduz a duas definições: falhas interlaminares e translaminares. Esta classificação ajuda muito, pois orienta na utilização de diferentes métodos para melhor estudar cada um dos diferentes tipos de fratura. Fraturas interlaminares ou delaminações são melhores analisadas pela direção de propagação da trinca utilizando-se microscopia óptica estereoscópica, enquanto que as fraturas translaminares, onde ocorre o rompimento das fibras, são melhores analisadas por microscopia eletrônica de varredura (FRANCO, 2003).

4 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 MATERIAS SINTÉTICOS USADOS

A Resina utilizada no trabalho foi a Resina Poliéster Isoftálico (Resina AM 910 AEROJET), de média reatividade, amarelada, não acelerada (ausência de promotor de reticulação), baixa viscosidade, boa resistência química, adquirida de Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA. O acelerador de Cobalto (Promotor de Reticulação) utilizado no presente trabalho foi o produto comercial denominado CAT MET UMEDECIDO 1,5 % (Solução de Octoato de cobalto 1,5 %), adquirido de Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA. Utilizou-se como catalisador o produto comercial BUTANOX M-50 marca de AEROJET (Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]), adquirido da empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass LTDA. As principais características da Resina AM 910 estão apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Característica da resina isoftálica insaturada.

Propriedade	Medida	Unidade
Viscosidade (25 ° C)	600 - 1200	cP
Tempo de Gel* (25 ° C)	6 - 8	Min
Pico Exotérmico	180 - 200	° C
Índice de Acidez	15 máx.	mgKOH/g
Teor de Sólidos	59 - 63	%
Massa Específica (25 ° C)	1,10 - 1,15	g/cm ³

*Cura a 25 ° C, com 0,5 % de Octanato de Co 6 % + 1,5 % de MEK-P em 100 g de resina.

Fonte: Autor, adaptado de Aerojet, 2018.

4.2 MATÉRIAS PRIMAS USADAS

4.2.1 Resíduos Industriais: Cobre

O Resíduo de cobre utilizado no decorrer do trabalho, foi fornecido pela empresa VALE S.A, originário da Mina do Sossego, Localizada no Município de Canaã dos Carajás, Sudeste do Pará, o material foi submetido a operação de secagem em estufa por 24 h à temperatura de 105 °C. Posteriormente o Resíduo de cobre sofreu peneiramento manual em peneira de granulometria 100 mesh da série Tyler (tamanho da abertura 0,147 mm), no intuito de separar a amostra desejada para o trabalho, foi utilizado no trabalho o passante da peneira de 100 mesh (amostras $\leq 0,147$ mm). A Figura 4.7 ilustra o resíduo de cobre após o peneiramento.

Figura 4.7: Resíduo de cobre.



Fonte: Autor (2018).

4.2.2 Fibra Natural – Bambu

As fibras de bambu utilizadas no presente trabalho foram extraídas do campus profissional I (Um) da Universidade Federal do Pará – UFPA. As fibras extraídas, inicialmente foram cortados vários bambus, em seguida fez-se a seleção dos colmos a serem utilizados para extração das fibras, posteriormente os mesmos foram colocados em um recipiente com água onde permaneceram por 24 h, na sequência as fibras foram extraídas dos colmos de forma manual para em seguida serem cortadas (auxílio de uma tesoura metálica), nos tamanhos 15 mm e 30 mm. A Figura 4.8 mostra as fibras de bambu extraídas.

Figura 4.8: Fibras de Bambu



Fonte: autor (2018).

4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.3.1 Caracterização do Resíduo de Cobre

4.3.1.1. Difração de Raios – X (DRX)

A Difração de Raios – X constitui uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalino. Partindo desta finalidade do ensaio, o resíduo antes de ser levado para análise, foi pulverizado com a utilização de um pistilo e almofariz com o intuito de reduzir a granulometria do material.

Para a análise do resíduo de cobre foram utilizados um difratômetro de Raios – X: D8 Advance da Bruker, com tubo de Raios – X, de ânodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$) e um filtro $K\beta$ de Ni. Foram utilizadas as seguintes condições instrumentais: varredura de 5° a 75° 2θ , voltagem: 40 kv, corrente 40 mA, tamanho do passo: $0,02^\circ$ 2θ e tempo/passos 5s.

A aquisição dos dados foram obtidas com a ajuda dos softwares: X Pert Data collector, versão 3.0 e X Pert High Score Plus, versão 3.0, da PAnalytical consultando o banco de dados PDF (Power Diffraction File) do ICDD (International Center for Diffraction Data).

4.3.2 Tratamento Químico nas Fibras de Bambu

As Fibras de bambu após serem extraídas dos colmos de bambu, foram colocadas em um recipiente e adicionado ao mesmo uma solução alcalina de hidróxido de sódio – NaOH, concentração 5 % v/v, feito isso, as fibras permaneceram na solução durante 24 h, em seguida foram lavadas em água corrente, e colocadas para serem secadas, para posteriormente serem cortadas (auxílio de uma tesoura metálica), nos tamanhos de 15 e 30 mm. A Figura 4.9 ilustra a fibras de bambu em uma solução de hidróxido de sódio.

Figura 4.9: Fibras de bambu em solução alcalina de hidróxido de sódio.

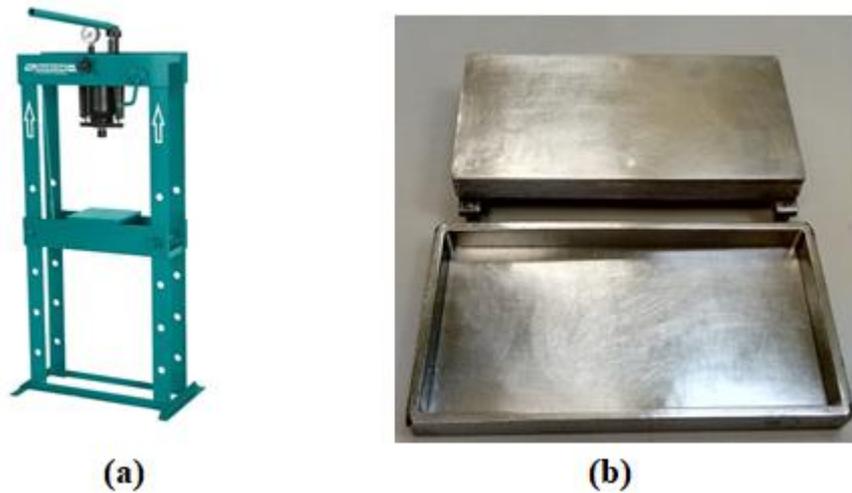


Fonte: Autor (2018).

4.3.3 Produção dos Compósitos

Para a produção dos compósitos de matriz polimérica sem carga, matriz polimérica com reforço de fibras de bambu, tratadas quimicamente com hidróxido de sódio 5 % v / v e não tratada quimicamente, nos tamanhos 15 mm e 30 mm, compósitos polimérico com inserção de carga de resíduo de cobre e compósitos poliméricos híbridos, foi utilizado um molde metálico na forma de placa retangular (Dimensões: 320 mm x 172,5 mm x 5 mm), o método aplicado foi o método manual também chamado *hand lay up*, sendo o resíduo de cobre utilizado no trabalho o passante da peneira de granulometria 100 mesh ($\leq 0,147$ mm) e as fibras sendo cortadas manualmente (com auxílio de uma tesoura metálica) nos comprimentos de 15 mm e 30 mm. As placas de compósitos foram produzidas no molde metálico e em seguida prensadas em prensa hidráulica com carga de 2,6 kN durante 20 minutos. A Figura 4.10 mostra o molde metálico e a prensa hidráulica modelo MPH-15, com capacidade de 15 Ton., marca MARCON, Brasil.

Figura 4.10: (a) prensa hidráulica e (b) molde metálico.



Fonte: Autor (2018).

4.3.3.1 Etapas da produção dos Corpos de Prova

1. Primeiramente foram colocados em estufa a 105 °C, as fibras de bambu e o resíduo de cobre no intuito de remover umidade, na sequência foram feitas às pesagens de todo o material utilizado na produção das placas de compósitos, foram pesados, a resina isoftálica, o resíduo de cobre, as fibras de bambu, o acelerador de cobalto (Promotor) e o catalisador MEK - P na intenção de obter as suas respectivas massas;
2. Na sequência iniciaram-se a produção das placas, onde primeiro se produziu placas de resina poliéster isoftálica plena, em seguida as placas de resina poliéster isoftálica com adição de carga de resíduo de cobre nas seguintes proporções: 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 % de resíduo de cobre (10 RC, 20 RC, 30 RC, 40 RC e 50 RC respectivamente). Posteriormente foram confeccionadas as placas de resina poliéster isoftálica com inserção de reforço de fibras de bambu com e sem tratamento químico nos tamanhos de 15 mm e 30 mm, com as seguintes proporções de fibras de bambu: 1 %, 2 % e 3 % (1 FB, 2 FB e 3 FB respectivamente), Depois foram produzidos os compósitos híbridos, onde variou-se apenas as quantidades de resíduo, as fibras de bambu utilizadas permaneceram com a mesma porcentagem. As proporções de compósitos híbridos com fibras de bambu tratados e não tratados foram os seguintes: 10 % RC + 3% FB; 20 % RC + 3% FB e 30 % RC + 3% FB (10 RC + 3 FB, 20 RC +

3 FB e 30 RC + 3 FB). As fibras foram dispostas aleatoriamente dentro da matriz polimérica;

3. Com as Placas produzidas no total que se desejava, foram realizados os cortes dessas placas para a produção dos corpos de prova para serem realizados os ensaios de tração. Essas placas foram cortadas com o auxílio de uma máquina de corte, marca DeWALT, modelo DW860B.

A Tabela 4.6 a seguir mostra a quantidade de placas produzidas com seus respectivos corpos de provas obtidos. O total de placas que foram fabricadas foi: 30 placas gerando dessas mesmas 240 corpos de provas.

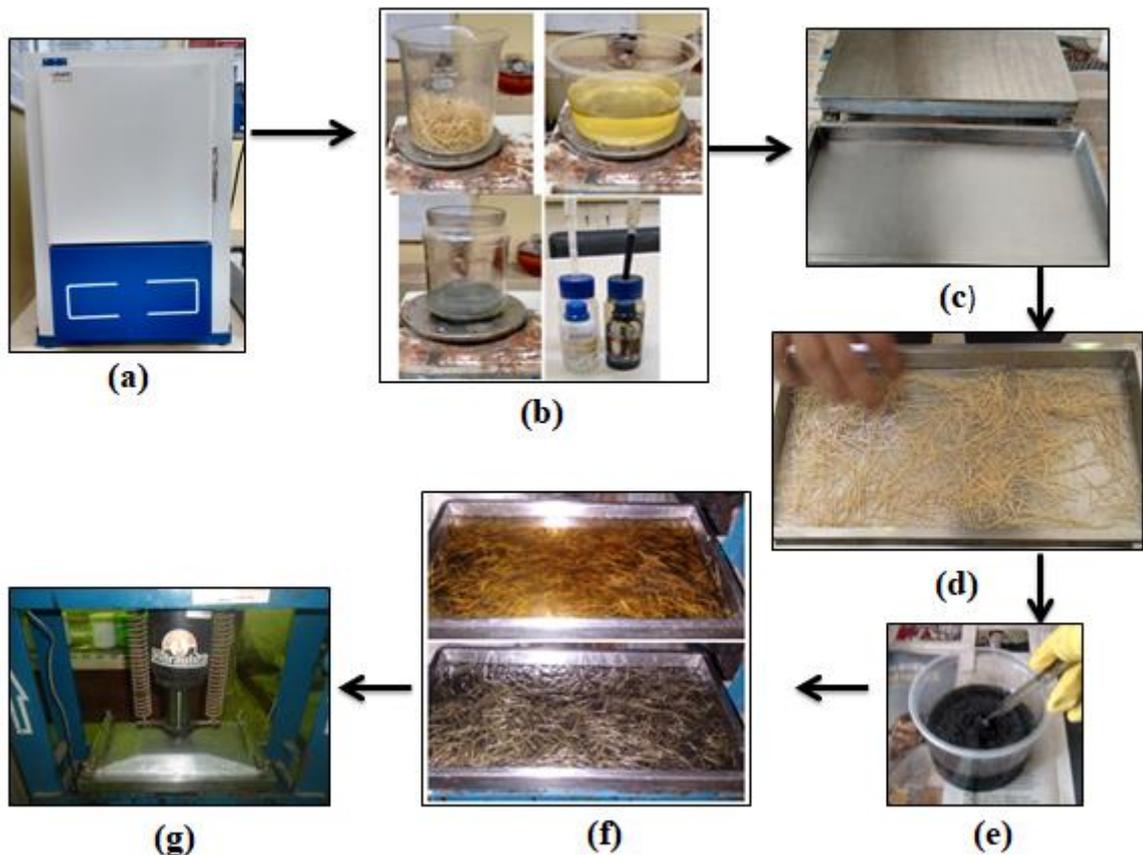
Tabela 4.6: Quantidades de placas e corpos de prova fabricados.

Proporção	Fração Mássica (%) Fase Dispersa	Quantidade de Placas	Quantidade de Corpos de Provas
Matriz Plena	0	2	8
Resíduo Cobre	10 RC	2	8
Resíduo Cobre	20 RC	2	8
Resíduo Cobre	30 RC	2	8
Resíduo Cobre	40 RC	2	8
Resíduo Cobre	50 RC	2	8
Bambu 15 mm sem trat.	1 FB 15 NT	2	8
Bambu 15 mm sem trat.	2 FB 15 NT	2	8
Bambu 15 mm sem trat.	3 FB 15 NT	2	8
Bambu 30 mm sem trat.	1 FB 30 NT	2	8
Bambu 30 mm sem trat.	2 FB 30 NT	2	8
Bambu 30 mm sem trat.	3 FB 30 NT	2	8
Bambu 15 mm com trat.	1 FB 15 T	2	8
Bambu 15 mm com trat.	2 FB 15 T	2	8
Bambu 15 mm com trat.	3 FB 15 T	2	8
Bambu 30 mm com trat.	1 FB 30 T	2	8
Bambu 30 mm com trat.	2 FB 30 T	2	8
Bambu 30 mm com trat.	3 FB 30 T	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 15 mm sem trat.	10 RC + 3 FB 15 NT	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 15 mm sem trat.	20 RC + 3 FB 15 NT	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 15 mm sem trat.	30 RC + 3 FB 15 NT	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 30 mm sem trat.	10 RC + 3 FB 30 NT	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 30 mm sem trat.	20 RC + 3 FB 30 NT	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 30 mm sem trat.	30 RC + 3 FB 30 NT	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 15 mm com trat.	10 RC + 3 FB 15 T	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 15 mm com trat.	20 RC + 3 FB 15 T	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 15 mm com trat.	30 RC + 3 FB 15 T	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 30 mm com trat.	10 RC + 3 FB 30 T	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 30 mm com trat.	20 RC + 3 FB 30 T	2	8
Matriz + Res. Cobre + Bambu 30 mm com trat.	30 RC + 3 FB 30 T	2	8

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 4.11 é mostrado um fluxograma de todo o processo de confecção e preparação dos compósitos com reforço de fibras de bambu e compósitos com incorporação de resíduo de cobre. Na Figura 4.11 (a) representa a estufa, a Figura 4.11 (b) mostra a pesagem de todos os materiais usados na produção dos compósitos, na Figura 4.11 (c) é mostrado a aplicação de produto desmoldante no molde metálico, na Figura 4.11 (d) é mostrado as fibras sendo dispostas aleatoriamente no molde metálico, na Figura 4.11 (e) é apresentada a mistura da resina com os outros produtos (promotor, catalisador MEK -P, Resíduo de cobre), na Figura 4.11 (f) é mostrado o início do processo de cura (endurecimento) dos compósitos, na Figura 4.11 (g) mostra o compósito sendo prensado na prensa hidráulica.

Figura 4.11: Etapas de produção dos compósitos.



Fonte: Autor (2018).

4.3.4 Caracterização Física dos Compósitos Produzidos

Na sequência do ensaio mecânico de tração dos compósitos, foram realizados os ensaios físicos para se determinar as propriedades físicas dos compósitos confeccionados. As propriedades que foram determinadas foram as seguintes:

- ✓ Porosidade Aparente (PA (%));
- ✓ Absorção de Água (AA (%));
- ✓ Massa Específica Aparente (MEA (g/cm³)).

Para a determinação das propriedades físicas, adotou-se à metodologia citada por SANTOS (1989) e a estabelecida na norma ASTM, 1984-92.

Porosidade Aparente

A medida da porosidade aparente foi determinada pela (eq. 4.1):

$$PA (\%) = \frac{(M_U - M_S)}{(M_U - M_i)} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde: M_U é a massa úmida (g), M_S é a massa seca (g), e M_i é a massa imersa (g).

Absorção de Água

A medida de absorção de água foi efetuada através da seguinte (eq. 4.2):

$$AA (\%) = \frac{(M_U - M_S)}{(M_S)} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde: M_U é a massa úmida (g) e M_S é a massa seca (g).

Massa Específica Aparente

A massa específica aparente foi calculada através da (eq. 4.3):

$$MEA \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{(M_S \times \rho_L)}{(M_U - M_i)} \quad (4.3)$$

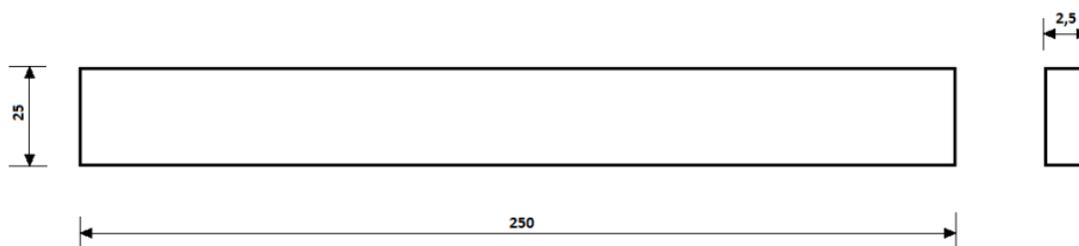
Onde, M_U é a massa úmida (g), M_s é a massa seca (g), e M_i é a massa imersa (g) e ρ_L é a massa específica da água (g/cm^3).

As caracterizações físicas dos compósitos foram realizadas da seguinte forma: após o ensaio de tração, os corpos de provas foram cortados em tamanhos de 25x25 mm no total de 10 amostra, em seguida os mesmos foram colocados em uma bandeja de ferro e levados a estufa, T 105° C, durante 24 h, na sequência foram pesados na balança de precisão (Marca: Bioscale, Modelo: FA 2204, Precisão: $\leq \pm 0.2\text{mg}$) assim definindo - se a massa de sólido seco do corpos de provas. Em seguida os corpos de provas foram mergulhados em um recipiente contendo água por 24 horas. Após este período, foi determinada a massa úmida, observando que se deve retirar a água em excesso do corpo. Em seguida, colocou-se a balança em um aparato de madeira, e a ela foi engastada (presa) uma haste feita de aço, e ao mesmo um suporte, em que é colocado o corpo de prova para se fazer às medidas de massa imersa, uma vez que este (haste) será mergulhado em um recipiente com água suficiente para cobrir o corpo, onde o mesmo (haste + corpo de prova) está abaixo do suporte de madeira.

4.3.5 Ensaio de Resistência à Tração

Os ensaios de tração foram realizados seguindo a norma ASTM D3039 e adotaram as seguintes medidas como demonstrado esquematicamente na Figura 4.12

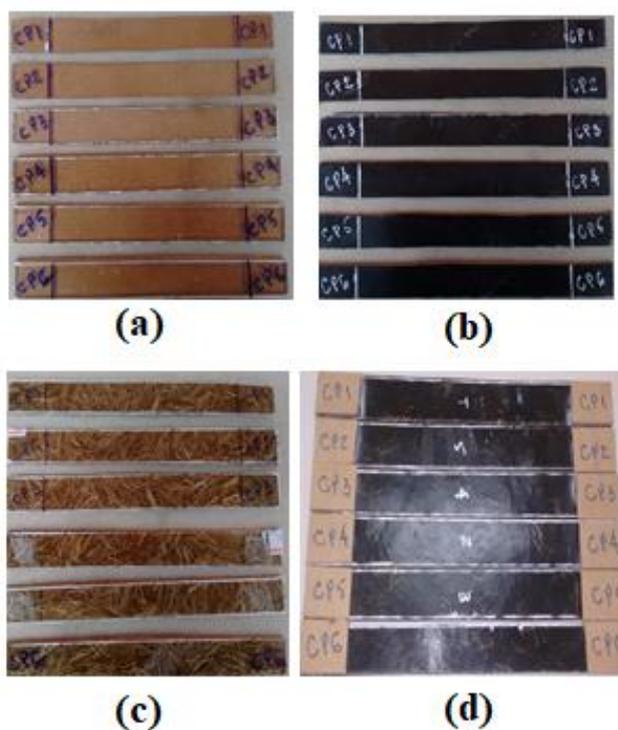
Figura 4.12: Dimensões (em mm) dos corpos de provas para ensaio de tração.



Fonte: Autor (2018).

Os ensaios de tração dos compósitos foram realizados em máquina universal de tração, marca KRATOS modelo IKCL3 com sistema de aquisição de dados, com célula de carga de 5 kN, adotando velocidade de 2 mm / min e comprimento útil para medição entre garras de 180 mm. Na Figura 4.13 é mostrado os corpos de prova para o ensaio de tração.

Figura 4.13: Corpos de prova para o ensaio de tração.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 4.13 é mostrado os corpos de prova que foram utilizados no ensaio de tração: Figura 4.13 (a) mostra os corpos de prova da matriz plena, Figura 4.13 (b) mostra os corpos de prova matriz com incorporação de resíduo de cobre, Figura (c) mostra os corpos de prova da matriz com reforço de fibras de bambu, Figura 4.13 (d) mostra os corpos de prova dos compósitos híbridos.

4.4.6 Análises das Superfícies de Fratura

Após a realização do ensaio mecânico (Tração), as superfícies de fratura dos corpos de prova foram analisadas de forma a se estudar os mecanismos de falhas de cada composição fabricada. A morfologia das superfícies de fratura foi analisada por microscopia eletrônica de varredura MEV.

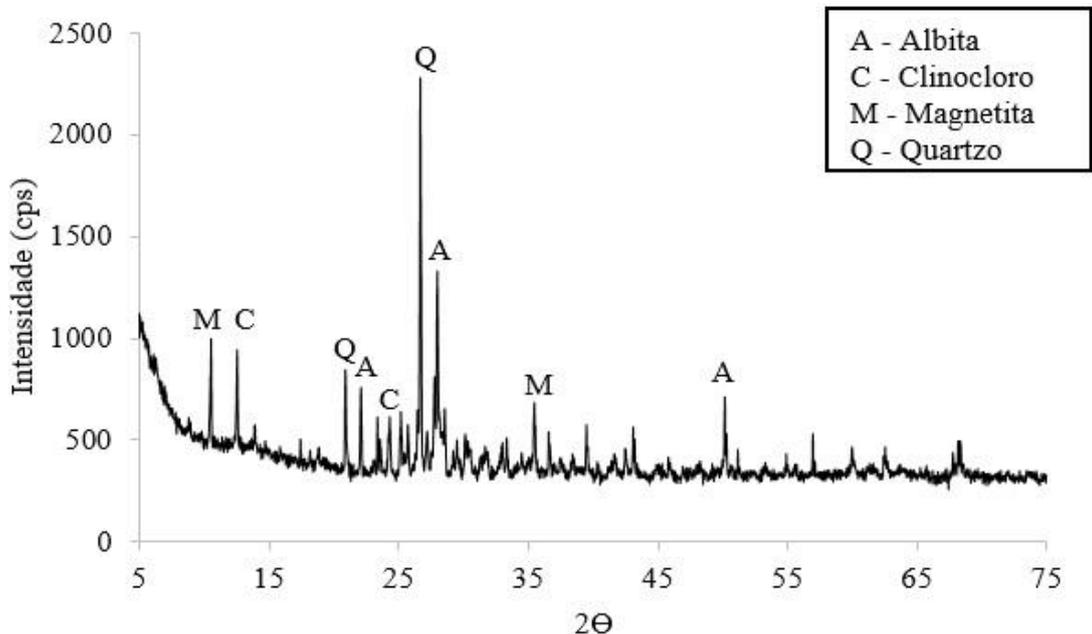
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE COBRE

5.1.1 Difração de Raios – X

A análise difratométrica realizada na amostra de resíduo de cobre, como é mostrada na Figura 5.14, apresentou os principais componentes mineralógicos do material de acordo com suas respectivas fichas PDF. Os principais picos correspondem ao quartzo (Q) – PDF 01-085-0795, Albita (A) – PDF 00-009-0466 e Magnetita (M) – PDF 01-087-0246, componentes estes já observados em estudos anteriores (MOURA *et al.*, 2004; NASCIMENTO *et al.*, 2014). Como podemos observar na figura 5.14, o quartzo se encontra em maior quantidade na amostra de resíduo de cobre analisada, indicando uma influência do mesmo (quartzo) na propriedade mecânica dos compósitos produzidos com a adição de resíduo de cobre na matriz polimérica.

Figura 5.14: Difração de Raios – X do resíduo de cobre.



Fonte: Autor (2018).

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS

5.2.1 Ensaio de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA),

- **Matriz sem Carga e Resíduo de Cobre**

A Tabela 5.7 mostra os resultados determinados através dos ensaios de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) da matriz plena e dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre.

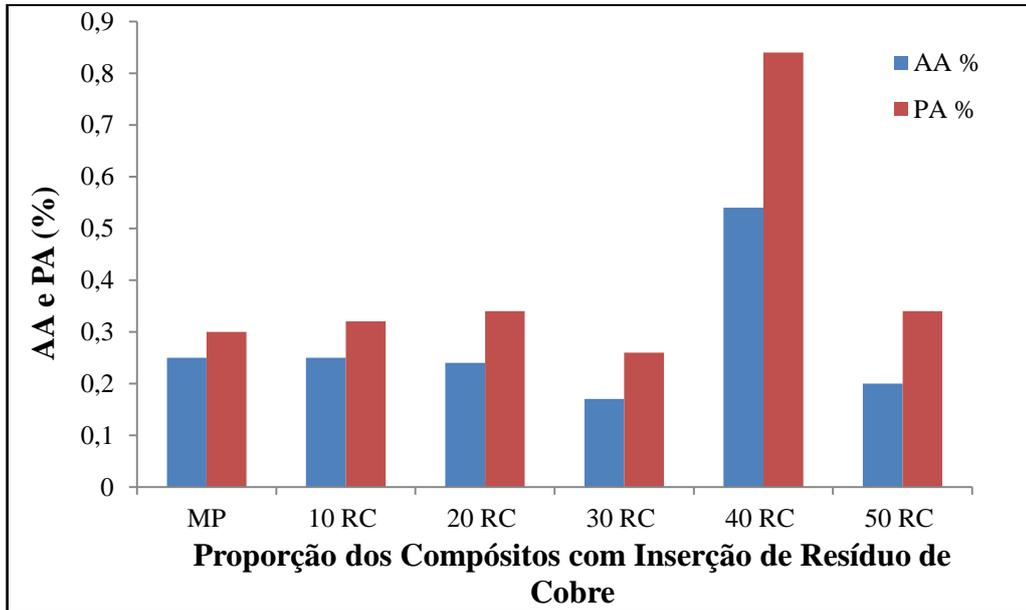
Tabela 5.7: Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA.

Fração mássica dos reforços (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
MP	0,25	0,30	1,20
10 RC	0,25	0,32	1,27
20 RC	0,24	0,34	1,36
30 RC	0,17	0,26	1,47
40 RC	0,22	0,36	1,57
50 RC	0,20	0,34	1,71

Fonte: Autor (2018).

Analisando os resultados demonstrados na Tabela 5.7, nos resultados de AA é observado que praticamente não ocorre absorção de água nos compósitos quando se adiciona resíduo de cobre, já nos resultados de PA observa-se uma tendência de aumento dos compósitos quando comparados com a matriz plena, conforme aumentam-se as proporções de resíduos de cobre, o que pode ser justificado, pelo aumento do número de vazios, bolhas e até alguns defeitos, ao se inserir estes resíduos na matriz. Já quando se observa a massa específica aparente, MEA, ocorre um aumento efetivo, aumentando-se a fração dos resíduos no compósito, o que pode ser explicado pela massa específica do resíduo ser elevada, ocasionando o aumento da massa específica aparente do compósito confeccionado. O gráfico da Figura 5.15 mostra um comparativo entre os resultados encontrados da matriz polimérica plena e compósitos poliméricos com incorporação de resíduo de cobre.

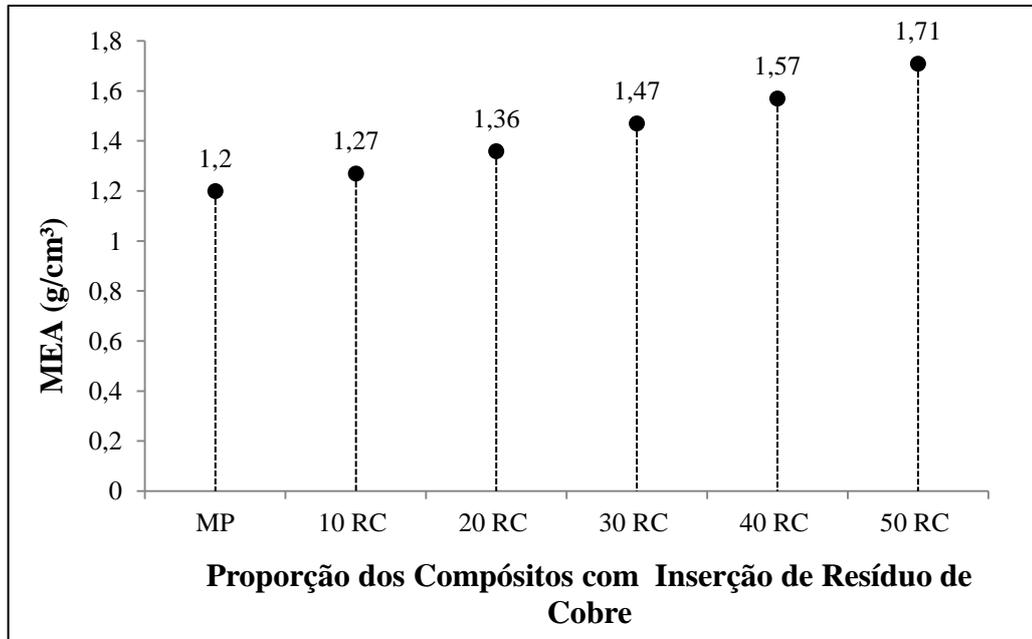
Figura 5.15: Gráfico AA e PA versus proporções de compósitos com incorporação de resíduos de cobre



Fonte: Autor (2018).

O Gráfico da Figura 5.16 mostra um comparativo entre os resultados encontrados de MEA para os compósitos estudados.

Figura 5.16: Gráfico MEA versus Proporções de compósitos com incorporação de resíduo de cobre.



Fonte: Autor (2018).

- **Matriz sem Carga e Fibras de Bambu**

A Tabela 5.8 mostra os resultados obtidos através dos ensaios de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) da matriz plena e dos compósitos com reforços de fibras de bambu.

Tabela 5.8: Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA.

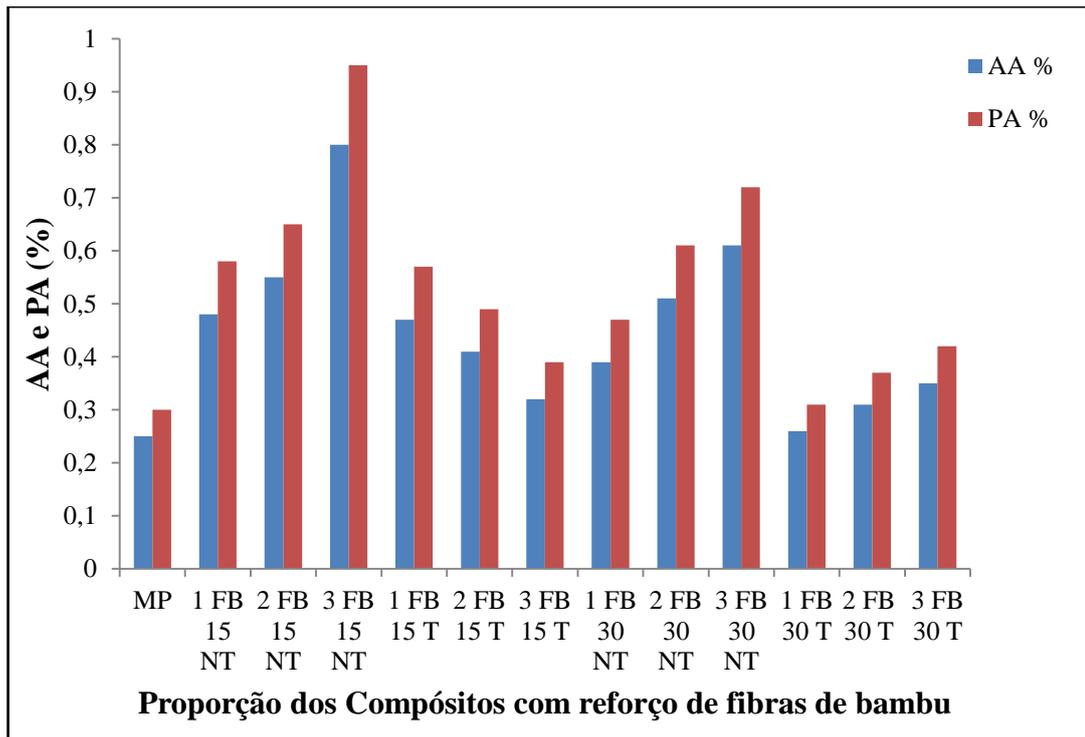
Fração mássica dos reforços (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
MP	0,25	0,30	1,20
1 FB 15 NT	0,48	0,58	1,19
2 FB 15 NT	0,55	0,65	1,19
3 FB 15 NT	0,80	0,95	1,18
1 FB 15 T	0,47	0,57	1,20
2 FB 15 T	0,41	0,49	1,20
3 FB 15 T	0,32	0,39	1,20
1 FB 30 NT	0,39	0,47	1,19
2 FB 30 NT	0,51	0,61	1,19
3 FB 30 NT	0,61	0,72	1,19
1 FB 30 T	0,26	0,31	1,20
2 FB 30 T	0,31	0,37	1,20
3 FB 30 T	0,35	0,42	1,20

Fonte: Autor (2018).

Analisar a absorção de água nos compósitos com reforço de fibras vegetal é um fator complexo, pois envolve diferentes variáveis a serem analisadas como, por exemplo, morfologia das células, variação entre células abertas e células fechadas, densidade da fibra e do compósito e características das fibras, tais como tamanho, teor, composição química e influência de tratamentos químicos nas fibras vegetais. Observando os resultados mostrados na Tabela 5.8, nota-se que ocorre um aumento da absorção de água com o aumento do teor de fibra na matriz, ratificando que a absorção está diretamente ligada ao teor de fibra. A água é capaz de percolar a fibra e a matriz em velocidades diferentes; pode também interferir na interface fibra/matriz (onde pode provocar um descolamento da mesma). Este mecanismo de absorção de água é esperado em fibras naturais, pois as mesmas possuem características

hidrofílicas. Em relação à porosidade aparente do compósito, observa-se um aumento da porosidade à medida que é aumentado o teor de fibras no compósito, o que pode ser justificado pela influência das fibras na matriz polimérica. É nítido que as fibras tratadas quimicamente têm uma redução na absorção de água e porosidade aparente quando comparadas com as fibras não tratadas, uma justificativa pode ser o tratamento químico nas fibras, pois o mesmo remove alguns componentes hidrófilos da fibra, como, por exemplo, a lignina. Já quando observa-se a massa específica aparente do compósito em relação a matriz plena, não há diferenças significativas, o que pode ser explicado pela baixa massa específica da fibra, não provocando modificação expressiva na massa específica aparente do compósito. O gráfico da Figura 5.17 mostra um comparativo entre os resultados encontrados da matriz polimérica plena e compósitos poliméricos com reforço de fibras de bambu.

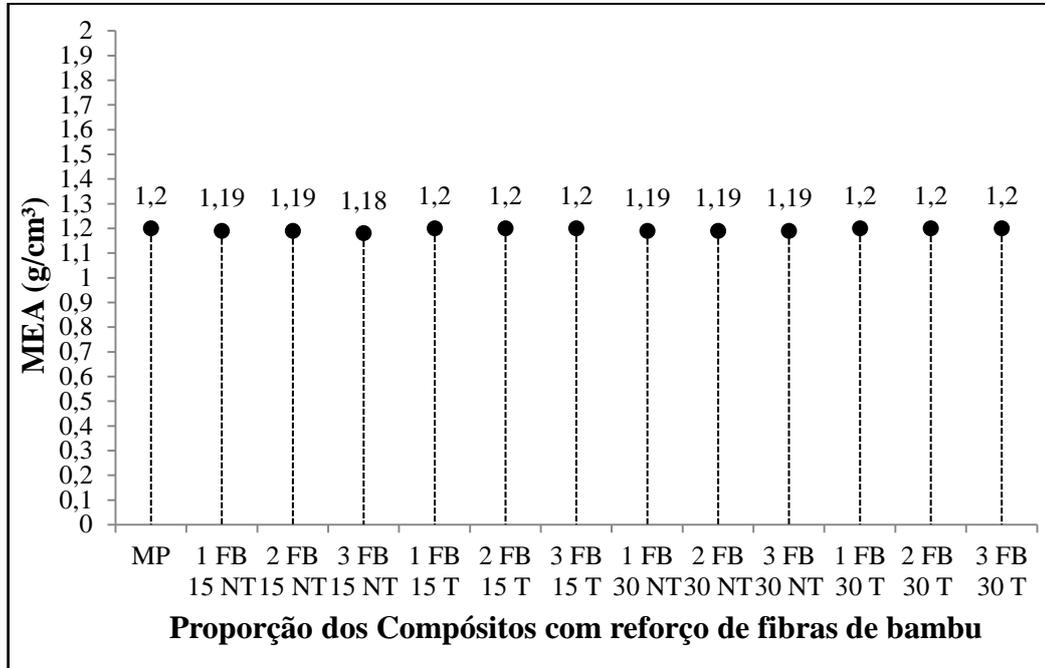
Figura 5.17: Gráfico AA e PA versus proporções de compósitos com reforço de fibras de bambu.



Fonte: Autor (2018).

O Gráfico da Figura 5.18 mostra um comparativo entre os resultados encontrados de MEA para os compósitos estudados.

Figura 5.18: Gráfico MEA versus proporções de compósitos com reforço de fibras de bambu.



Fonte: Autor (2018).

- Matriz sem Carga e Híbridos

A Tabela 5.9 mostra os resultados determinados através dos ensaios de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) da matriz plena e dos compósitos híbridos.

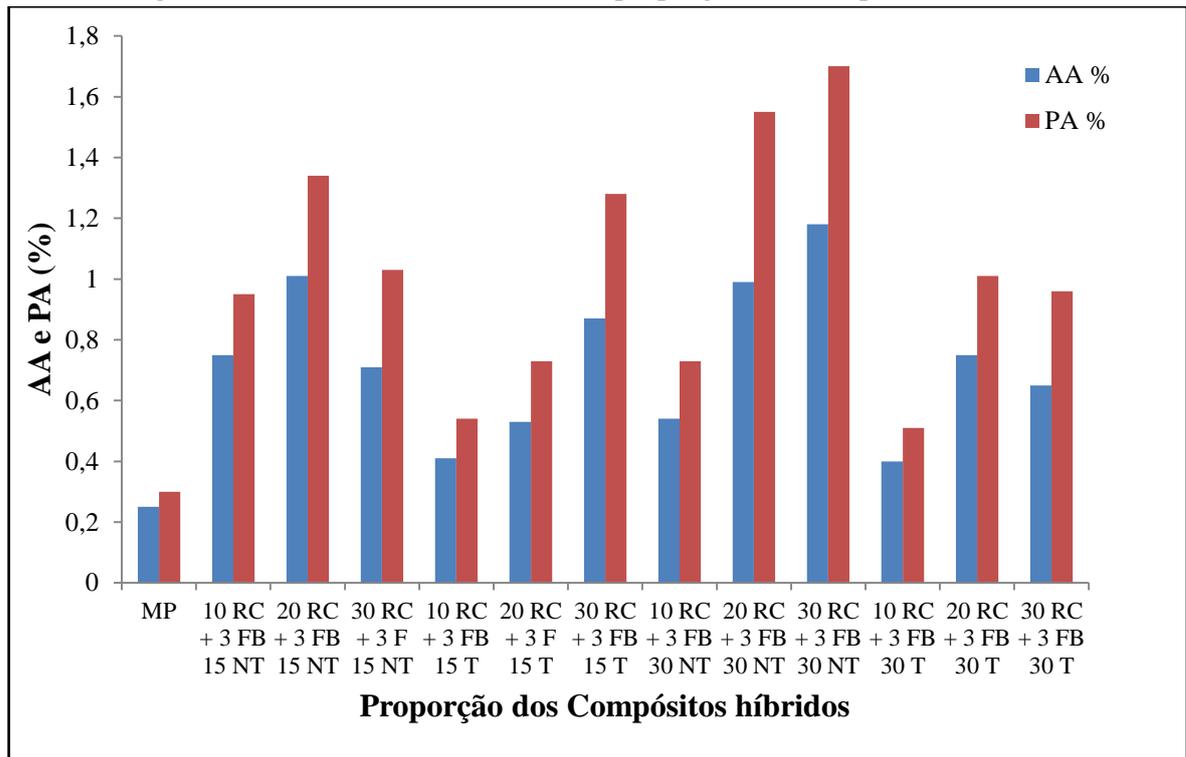
Tabela 5.9: Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA.

Fração mássica dos reforços (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
MP	0,25	0,30	1,20
10 RC + 3 FB 15 NT	0,75	0,95	1,26
20 RC + 3 FB 15 NT	1,01	1,34	1,31
30 RC + 3 FB 15 NT	0,71	1,03	1,45
10 RC + 3 FB 15 T	0,41	0,54	1,34
20 RC + 3 FB 15 T	0,53	0,73	1,37
30 RC + 3 FB 15 T	0,87	1,28	1,47
10 RC + 3 FB 30 NT	0,54	0,73	1,36
20 RC + 3 FB 30 NT	0,99	1,55	1,56
30 RC + 3 FB 30 NT	1,18	1,70	1,43
10 RC + 3 FB 30 T	0,40	0,51	1,28
20 RC + 3 FB 30 T	0,75	1,01	1,35
30 RC + 3 FB 30 T	0,65	0,96	1,48

Fonte: Autor (2018).

Analisando os resultados demonstrados na Tabela 5.9, pelo que já foi discutido dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre e compósitos com reforço de fibras de bambu, com os compósitos híbridos, não ocorreu de maneira diferente, sendo estes (MEA, AA e PA) influenciados diretamente pela incorporação dos resíduos e das fibras, aumentando as propriedades físicas dos compósitos confeccionados. Quando se observa a absorção de água e porosidade aparente ocorre um aumento dos mesmos influenciados pelas fibras de bambu, já a massa específica aparente sofre influência direta dos resíduos de cobre, provocando o aumento da MEA quando comparada com a matriz plena. O gráfico da Figura 5.19 mostra um comparativo entre os resultados encontrados da matriz polimérica plena e compósitos híbridos.

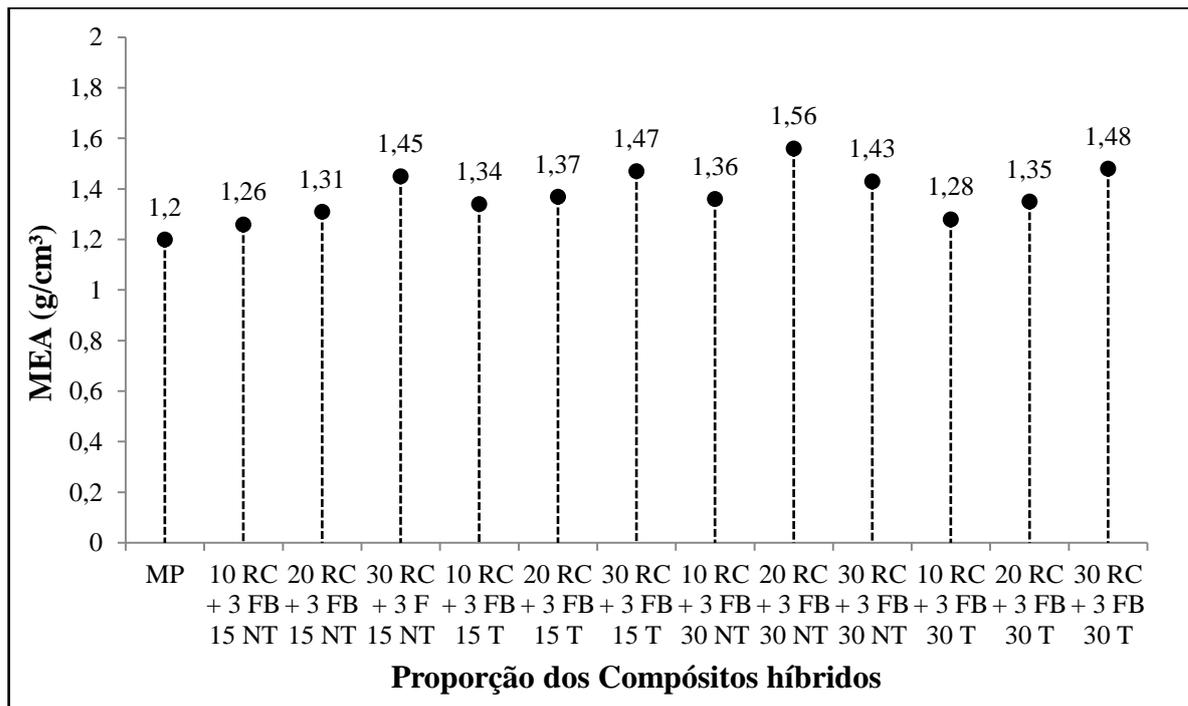
Figura 5.19: Gráfico AA e PA versus proporções de compósitos híbridos.



Fonte: Autor (2018).

O Gráfico da Figura 5.20 mostra um comparativo entre os resultados encontrados de MEA para os compósitos estudados.

Figura 5.20: Gráfico MEA versus proporções de compósitos híbridos.



Fonte: Autor (2018).

5.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

5.3.1 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos com Incorporação de Resíduo de Cobre

Os compósitos poliméricos com incorporação de resíduo de cobre foram avaliados quanto a sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados conforme a Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Resultados do ensaio de tração dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre.

Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração		Módulo de Elasticidade (GPa)
		(MPa)	(Desvio Padrão)	
Matriz Plena Resíduo Industrial de Cobre	0	19,54	(± 3,05)	4,84
	10 RC	25,38	(± 1,45)	4,63
	20 RC	25,18	(± 1,84)	4,78
	30 RC	32,83	(± 2,81)	5,12
	40 RC	40,25	(± 1,88)	5,46
	50 RC	28,71	(± 4,06)	4,53

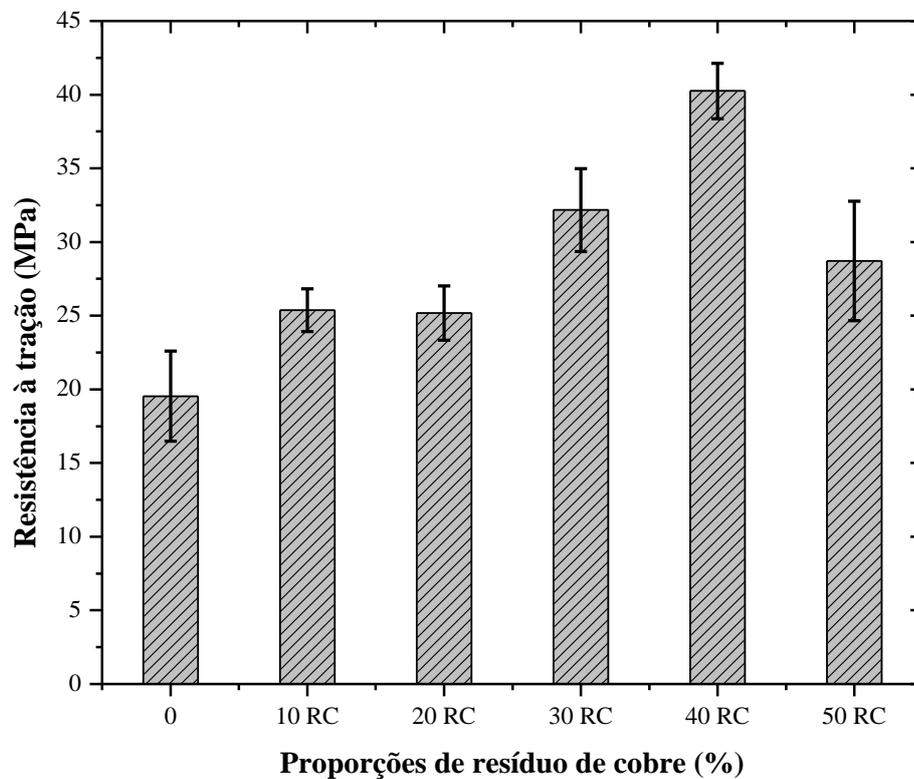
Fonte: Autor (2018).

Observa-se através dos resultados da Tabela 5.10, que a resistência à tração dos compósitos poliméricos com adição de resíduo de cobre, apresentam um aumento à medida que é aumentado a proporção de resíduo de cobre na matriz polimérica até a fração de resíduo de cobre 40 %, onde este apresentou o resultado de resistência à tração de 40,25 MPa, continuando adicionando resíduo a matriz polimérica, nota-se uma diminuição da resistência à tração do compósito, como pode ser observado na fração de 50 % de resíduo de cobre. À medida que se aumenta a proporção de resíduo de cobre na matriz, tem-se uma melhor distribuição do resíduo dentro da matriz, melhorando a sua distribuição dentro da matriz, ocorre uma melhor homogeneização e uma melhor compactação, até a fração de 40 % de resíduo, pois quando atinge a fração de 50 % de resíduo, ocorre uma diminuição da resistência, onde poderá ter uma má distribuição do resíduo, formação de bolhas dentre outros defeitos onde os mesmos têm influenciado na diminuição da resistência. Quando se observa o módulo de elasticidade, nota-se que houve um aumento nos compósitos quando comparado com a matriz plena, aumentando a rigidez dos compósitos com incorporação de resíduo de

cobre. Fazendo uma comparação com trabalhos da literatura pesquisada: COSTA (2016), trabalhando com carga mineral de caulim encontrou uma resistência à tração de 20,13 MPa, já CUNHA (2015) trabalhando com lama vermelha, determinou uma resistência à tração de 29,45 MPa, enquanto que EL BANNA (2017) trabalhando com resíduo de cobre encontrou uma resistência à tração 34,28 MPa.

A Figura 5.21 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos com adição de resíduo de cobre nas frações de 10 RC, 20 RC, 30 RC, 40 RC e 50 RC quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.21: Comportamento de resistência à tração material compósito em função dos resíduos de cobre.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparações entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz plena e as frações do resíduo de cobre (10 RC, 20 RC, 30 RC, 40 RC e 50 RC). Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se

H_0 . A Tabela 5.11 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos com inserção de resíduo de cobre.

Tabela 5.11: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com inserção de resíduo de cobre.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	1008,899	5	201,7799	3,7767	0,011	2,6206
Dentro do Grupo	1282,232	24	53,42633			
Total	2291,131	29				

Fonte: Autor (2018)

Como o $F_{\text{calculado}}$ (3,77) foi superior ao F_{tabelado} (2,62) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P- valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.12 apresenta os resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC, 20 RC, 30 RC, 40 RC e 50 RC.

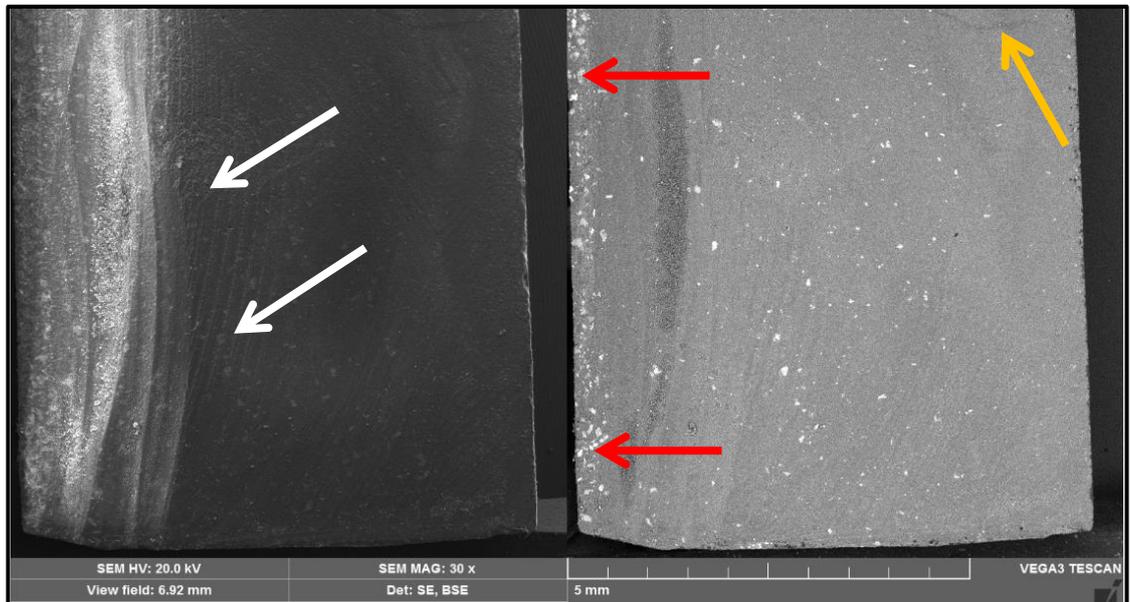
Tabela 5.12: Resultado do Teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC, 20 RC, 30 RC, 40 RC e 50 RC.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
10RC-MP	-1,378	-15,671	12,915	0,999
20RC-MP	6,084	-8,209	20,377	0,773
30RC-MP	15,156	0,862	29,449	0,033
40RC-MP	11,172	-3,121	25,465	0,190
50RC-MP	5,128	-9,165	19,421	0,872
20RC-10RC	7,462	-6,831	21,755	0,597
30RC-10RC	16,534	2,240	30,827	0,016
40RC-10RC	12,55	-1,743	26,843	0,108
50RC-10RC	6,506	-7,787	20,799	0,722
30RC-20RC	9,072	-5,221	23,365	0,391
40RC-20RC	5,088	-9,205	19,381	0,876
50RC-20RC	-0,956	-15,249	13,337	0,999
40RC-30RC	-3,984	-18,277	10,309	0,951
50RC-30RC	-10,028	-24,321	4,265	0,287
50RC-40RC	-6,044	-20,337	8,249	0,778

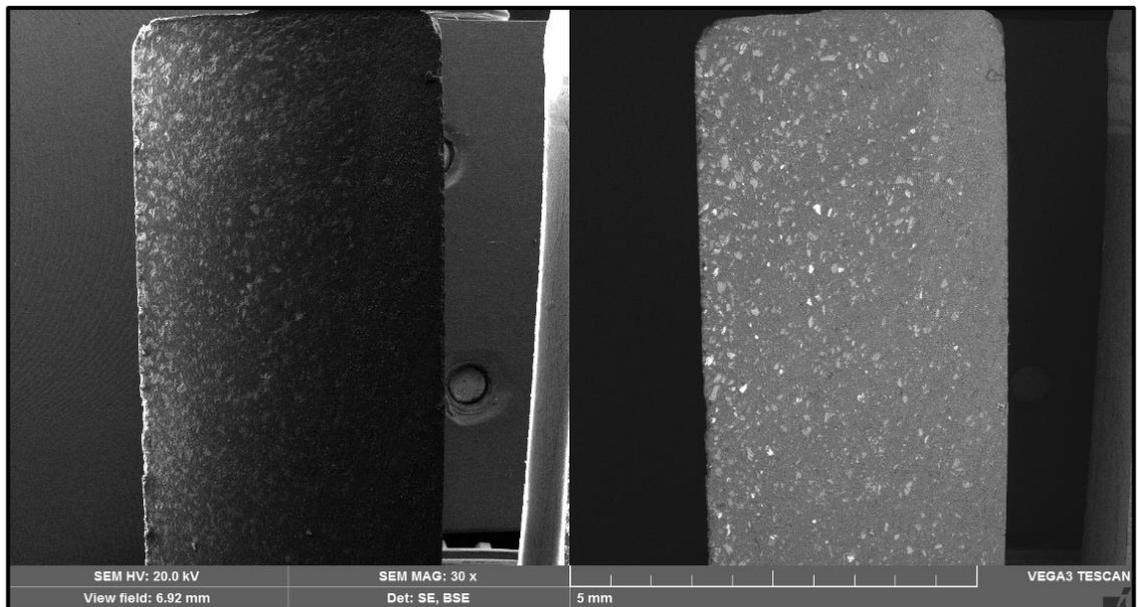
Fonte: Autor (2018).

A Figura 5.22 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com inserção de resíduo de cobre.

Figura 5.22: Microscopia eletrônica de varredura: Compósito com inserção de resíduo de cobre: (a) 10 RC e (b) 40 RC.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018).

As superfícies de fratura da Figura 5.22 (a) do compósito com 10 % de resíduo de cobre mostra uma superfície com poucos defeitos, vazios (seta alaranjada), observam-se ainda algumas imperfeições como algumas irradiações (seta branca) na superfície de fratura. Nota-se ainda uma distribuição desigual do resíduo onde percebe-se uma concentração do resíduo nas extremidades da matriz (seta vermelha). Na Figura 5.22 (b) nota-se que já há uma distribuição regular dos resíduos na matriz, não se observa defeitos, que podem ser de confecção do compósito ou outros tipos. Nota-se também uma boa aderência matriz e carga, proporcionando melhoras nas propriedades mecânicas.

5.3.2 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos com Reforço de Fibras de Bambu de 15 mm Não Tratadas

Os compósitos poliméricos com reforço de fibras de bambu 15 mm não tratados foram avaliados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados conforme a Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibras de bambu 15 mm sem tratamento.

Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Deformação na Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0	19,54 (\pm 3,05)	4,84	0,81
Fibras de Bambu de 15 mm Não Tratadas.	1 FB	14,20 (\pm 1,68)	3,26	0,72
	2 FB	19,69 (\pm 1,99)	3,93	0,86
	3 FB	20,56 (\pm 1,50)	4,21	0,86

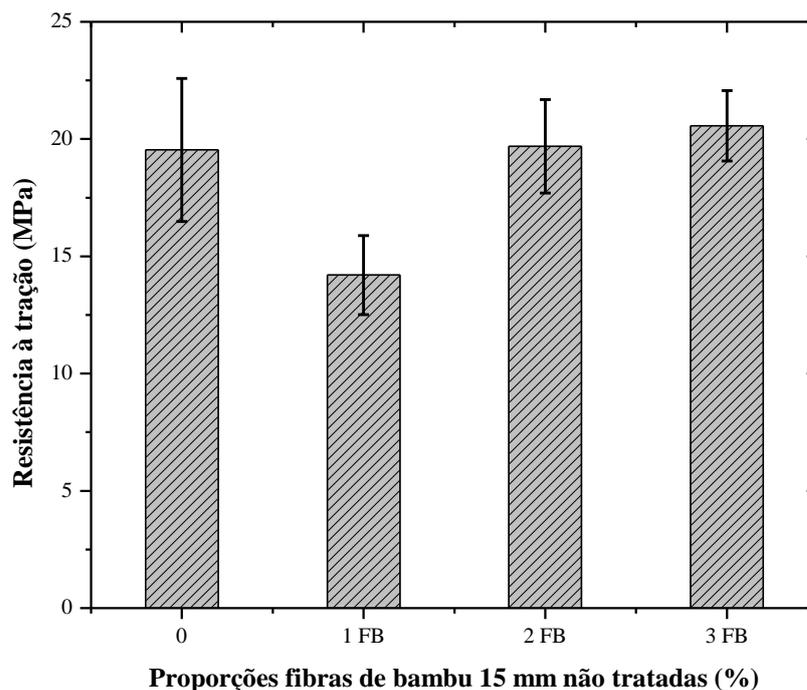
Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 5.13, observa-se quando se adiciona fibras na fração de 1 % na matriz polimérica nota-se uma gradativa diminuição da resistência à tração, continuando adicionando fibras na matriz observa-se uma sensível melhora na resistência a tração até a fração de 3 % de fibras, provavelmente a diminuição de resistência à tração na fração de 1 % de fibra, é que na porcentagem de 1 % as fibras de bambu encontram-se em menor quantidade na matriz estando as mesmas bastante dispersas em alguns pontos da matriz e em outros pontos podem estarem ocasionando uma certa concentração de fibras, gerando com isso uma má distribuição de fibras, influenciando negativamente na resistência do compósito, já quando a matriz

possui fração mássica de 2 % e 3 % há uma certa diminuição de concentração de fibras em certos pontos, provocando uma melhor distribuição de fibras na matriz ocasionando um gradativo aumento da sua resistência. Quando se observa o módulo de elasticidade do compósito com reforço de fibras de bambu, há um pequeno aumento em relação à matriz sem carga, denotando a fragilidade do compósito. Fazendo uma comparação com trabalhos da literatura: COSTA (2016), trabalhando com fibras de bambu encontrou uma resistência à tração de 24, 05 MPa, já SANTOS (2015), trabalhando com fibras de palha da costa encontrou uma resistência à tração de 10,07 MPa.

A Figura 5.23 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos com reforço de fibras de bambu nas frações de 1 FB, 2 FB e 3 FB 15 mm não tratadas, quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.23: Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 15 mm não tratadas.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparações entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz plena e as frações do reforço de fibras de bambu 1 FB, 2 FB e 3 FB. Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . A

Tabela 5.14 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos com o reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas.

Tabela 5.14: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	191,6	3	63,8666	5,7791	0,0071	3,2388
Dentro do Grupo	176,8209	16	11,0513			
Total	368,4209	19				

Fonte: Autor (2018).

Como o $F_{\text{calculado}}$ (5,77) foi superior ao F_{tabelado} (3,23) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P- valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.15 apresenta o resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 15 mm não tratada.

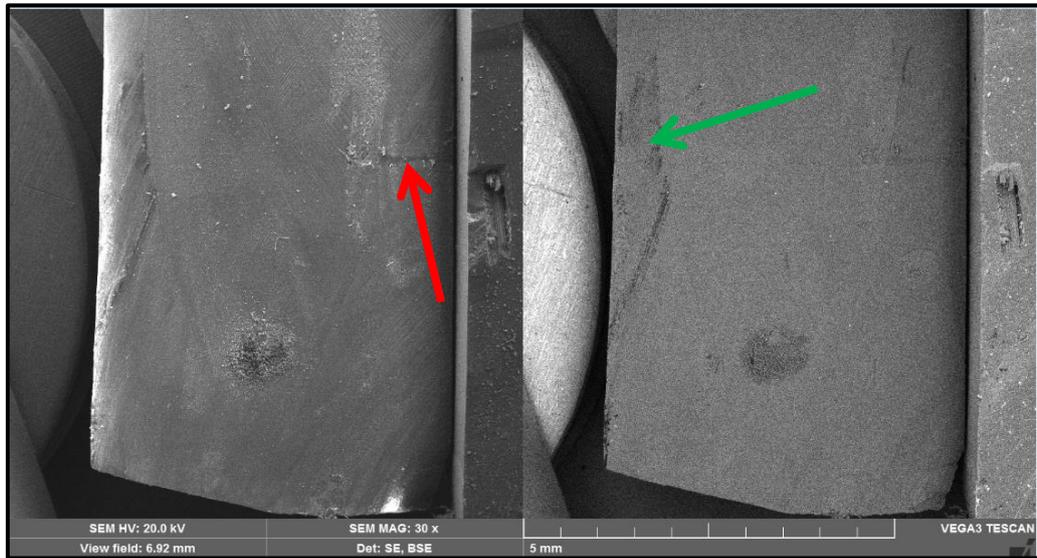
Tabela 5.15: Resultado do Teste de Tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 15 mm não tratadas.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
2FB-1FB	6,254	0,238	12,269	0,040
3FB-1FB	7,244	1,228	13,259	0,015
MP-1FB	7,654	1,638	13,669	0,010
3FB-2FB	0,99	-5,025	7,005	0,964
MP-2FB	1,4	-4,615	7,415	0,908
MP-3FB	0,41	-5,605	6,425	0,997

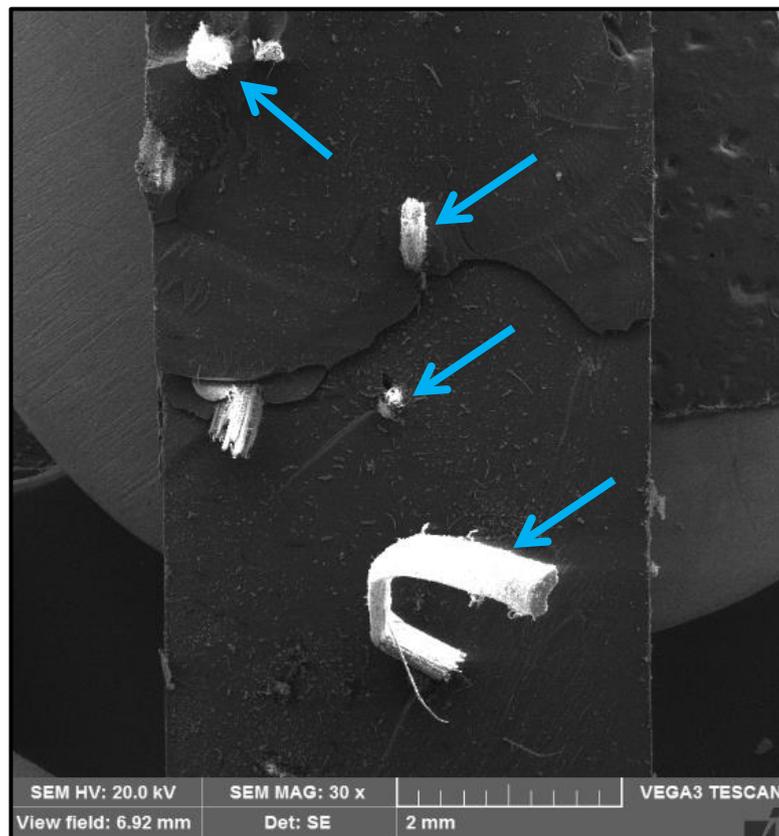
Fonte: Autor (2018).

A Figura 5.24 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm não tratada.

Figura 5.24: Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas: (a) 1 FB e (b) 3 FB.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 5.24 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito com reforço de fibra de bambu 1 % 15 mm não tratadas, onde nota-se uma superfície lisa e plana com uma ausência de fibras na superfície da amostra, há ainda a presença de fratura na extremidade da

matriz (seta verde) demonstrando que pode estar ocorrendo uma fraca adesão fibra/matriz, nota-se também fibras sendo descolada da matriz (seta vermelha) fatos que podem estarem influenciando de forma negativa nas propriedades mecânicas. A Figura 5.24 (b) mostra a superfície de fratura dos compósitos com reforço de fibras de bambu 3 % 15 mm não tratadas, onde observa-se algumas fibras sendo rompidas (seta azul) e estando dispostas na direção paralela em que o carregamento foi solicitado, fatores que podem estarem colaborando com uma melhora na resistência mecânica do compósito.

5.3.3 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos com Reforço de Fibras de Bambu de 15 mm Tratadas

Os compósitos poliméricos com reforço de fibras de bambu 15 mm tratados foram avaliados quanto a sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados segundo a Tabela 5.16.

Tabela 5.16: Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibras de bambu 15 mm com tratamento.

Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Deformação na Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Sem Carga	0	19,54 (\pm 3,05)	4,84	0,81
Fibras de Bambu de 15 mm Tratadas.	1 FB	20,34 (\pm 2,69)	4,97	0,76
	2 FB	29,56 (\pm 3,71)	4,82	1,16
	3 FB	33,05 (\pm 4,07)	5,58	1,15

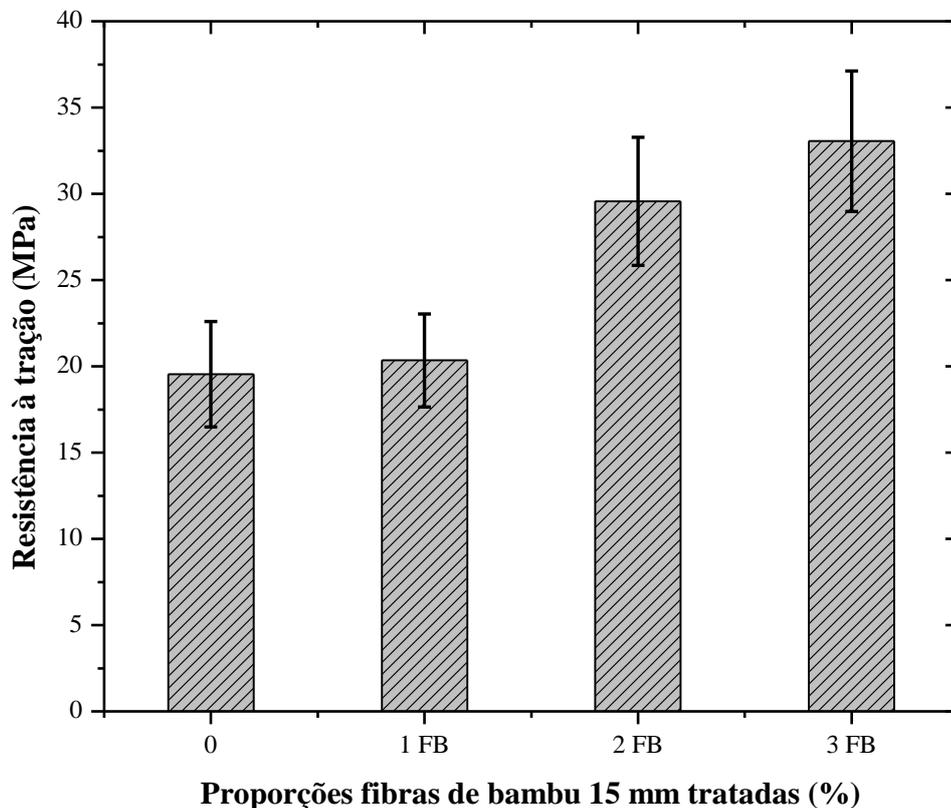
Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 5.16 nota-se um aumento de resistência à tração do compósito com reforço de fibras de bambu 15 mm, quando as mesmas são tratadas quimicamente. O tratamento alcalino causa o inchaço das fibras, remoção parcial da hemicelulose e da lignina, o que promove um melhor empacotamento das cadeias de celulose, que são responsáveis pela cristalinidade da fibra, Com relação às propriedades mecânicas, verifica-se aumento da resistência à tração e do módulo de elasticidade e aumento do alongamento. Obviamente, o comportamento da fibra depende primariamente das condições do tratamento (concentração, tempo e temperatura), (BLEDZIK; GASSAN, 1999). Com o tratamento alcalino nas fibras de

bambu, ocorreu a retirada de impurezas das fibras, remoção de componentes hidrófilos das fibras diminuindo seu caráter hidrófilo, gerando com isso uma melhor interação na interface matriz/fibras provocando um aumento da resistência à tração dos compósitos, onde observou-se que o compósito com fração de reforço de fibra de bambu 3 % apresentou uma resistência à tração de 33,05 MPa.

A Figura 5.25 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz sem carga e dos compósitos com reforço de fibras de bambu nas frações de 1 FB, 2 FB e 3 FB 15 mm tratadas, quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.25: Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 15 mm tratadas.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparações entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz plena e as frações do reforço de fibras de bambu (1 FB, 2 FB e 3 FB). Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . A

Tabela 5.17 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos com o reforço de fibras de bambu 15 mm tratadas.

Tabela 5.17: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm tratadas.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	442,0494	3	147,3498	5,3260	0,0097	3,2388
Dentro do Grupo	442,6568	16	27,66605			
Total	884,7062	19				

Fonte: Autor (2018).

Como o $F_{\text{calculado}}$ (5,32) foi superior ao F_{tabelado} (3,23) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P-valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.18 apresenta o resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 15 mm tratada.

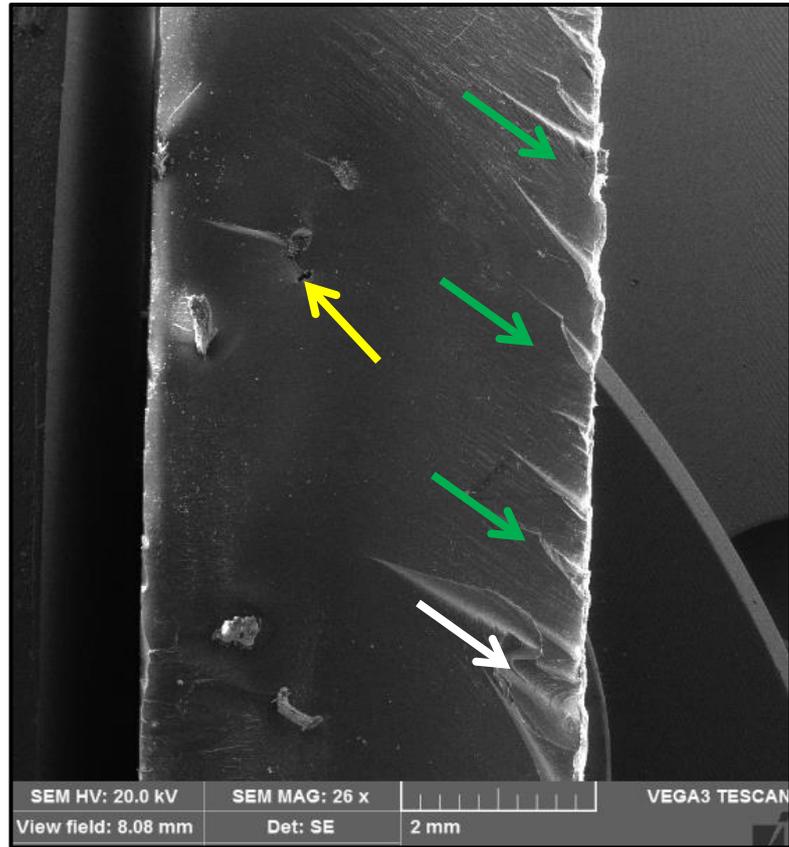
Tabela 5.18: Resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 15 mm tratadas.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
2FB-1FB	10,882	1,364	20,399	0,022
3FB-1FB	11,204	1,686	20,721	0,018
MP-1FB	4,294	-5,223	13,811	0,581
3FB-2FB	0,322	-9,195	9,839	0,999
MP-2FB	-6,588	-16,105	2,929	0,235
MP-3FB	-6,91	-16,427	2,607	0,202

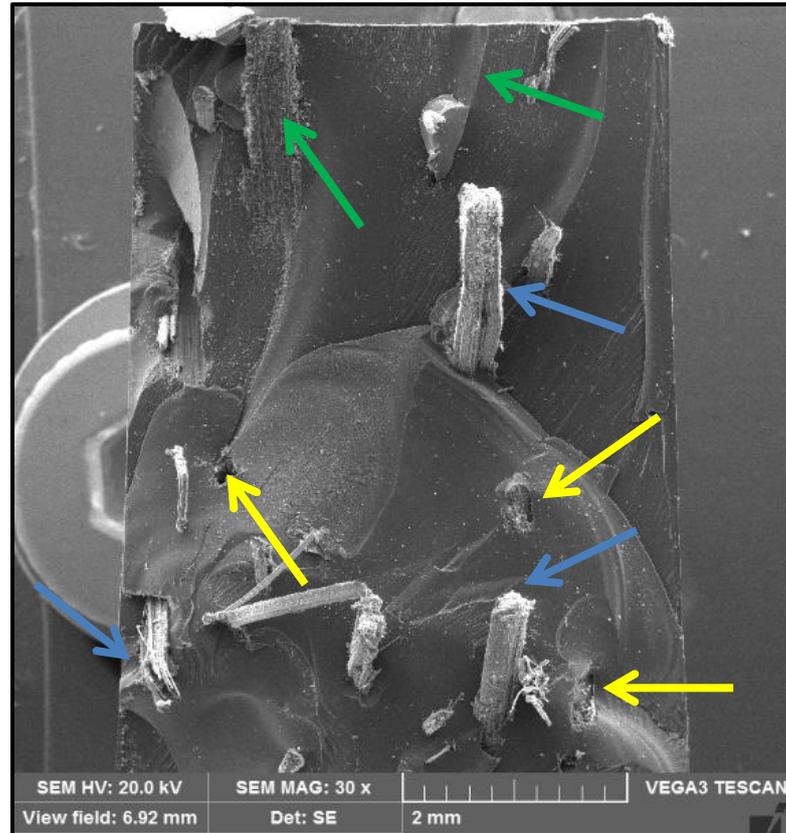
Fonte: Autor (2018).

A Figura 5.26 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm tratada.

Figura 5.26: Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 15 mm tratada: (a) 1 FB e (b) 3 FB.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 5.26 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito com reforço de fibra de bambu 1 % 15 mm tratado, onde nota-se uma fratura (trincamento) na superfície da matriz (seta branca), observa-se também algumas imperfeições nas extremidades da matriz (seta verde), há ainda a presença de fibras sendo sacadas, *pull out* (seta amarela), fatores estes podem estarem influenciando negativamente resistência do compósito. A figura 5.26 (b) mostra a superfície de fratura dos compósitos com reforço de fibras de bambu 3 %, 15 mm tratadas, onde percebe-se fibras sendo sacadas, *pull out* (seta amarela), algumas fibras descoladas (seta verde), observa-se também fibras rompidas (seta azul) e arrançadas na direção em que o carregamento foi solicitado, fatores que podem justificar o aumento de sua resistência mecânica quando comparada com a compósito com reforço de fibras de bambu 1 %, 15 mm tratadas quimicamente.

5.3.4 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos com Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm Não Tratadas

Na Tabela 5.19, mostram-se os resultados obtidos dos ensaios de tração feitos com compósitos reforçados com as fibras de bambu sem tratamento químico com o comprimento de 30 mm.

Tabela 5.19: Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibras de bambu 30 mm sem tratamento.

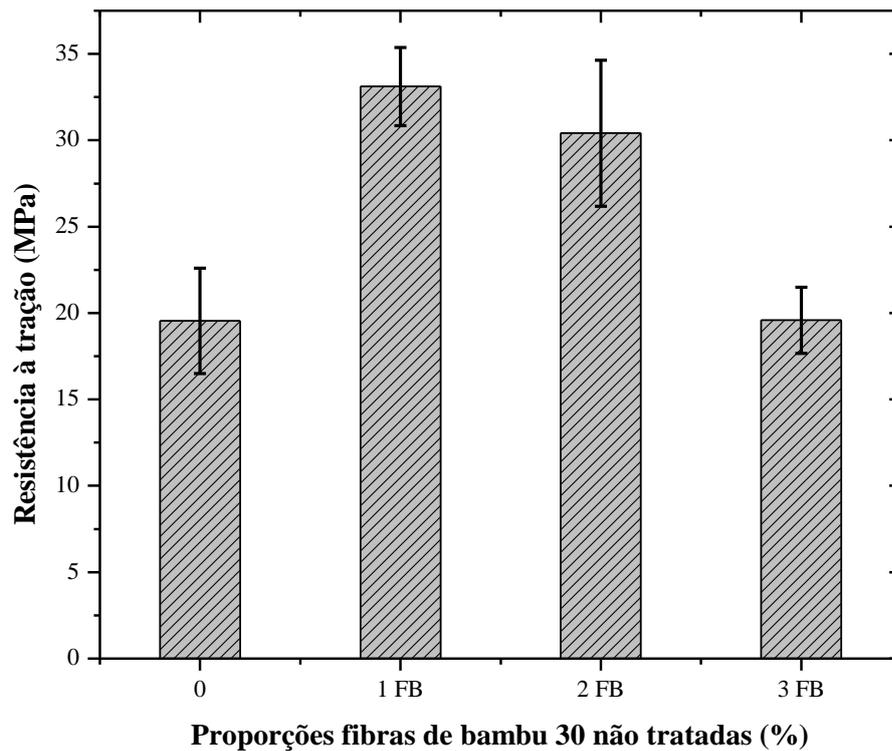
Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Deformação na Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Sem Carga	0	19,54 (\pm 3,05)	4,84	0,81
Fibras de Bambu de 30 mm Não Tratadas.	1 FB	33,11 (\pm 2,26)	5,91	1,09
	2 FB	30,41 (\pm 4,23)	5,90	1,08
	3 FB	19,58 (\pm 1,92)	4,76	0,83

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 5.19 observa-se o aumento do limite de resistência a tração quando ocorre a inserção na matriz polimérica das fibras de bambu nos comprimentos de 30 mm sem tratamento químico nas frações de 1 % e 2 %, fato este ocorrido devido a uma melhor distribuição das fibras no sentido do carregamento das forças atuantes no compósito. Contudo continuando adicionando fibras a matriz nota-se uma diminuição da resistência chegando a resistência a ficar praticamente a mesma da matriz sem carga, onde pode ter ocorrido uma concentração de fibras em alguns pontos da matriz gerando zonas concentrações de trincas provocando fratura na matriz enquanto que em outras partes da matriz ocorre um vazio “nuvem” de fibras, gerando com isso uma certa diminuição da resistência do compósito com adição de fibras de bambu.

A Figura 5.27 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz sem carga e dos compósitos com reforço de fibras de bambu nas frações de 1 FB, 2 FB e 3 FB 30 mm não tratadas, quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.27: Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 30 mm não tratadas.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparações entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz plena e as frações do reforço de fibras de bambu 1 FB, 2 FB e 3 FB. Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . A Tabela 5.20 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratadas.

Tabela 5.20: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratadas.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	606,2339	3	202,078	15,6467	5,12E-05	3,2388
Dentro do Grupo	206,6397	16	12,91498			
Total	812,8736	19				

Fonte: Autor (2018).

Como o $F_{\text{calculado}}$ (15,64) foi superior ao F_{tabelado} (3,23) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P-valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.21 apresenta o resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 30 mm não tratada.

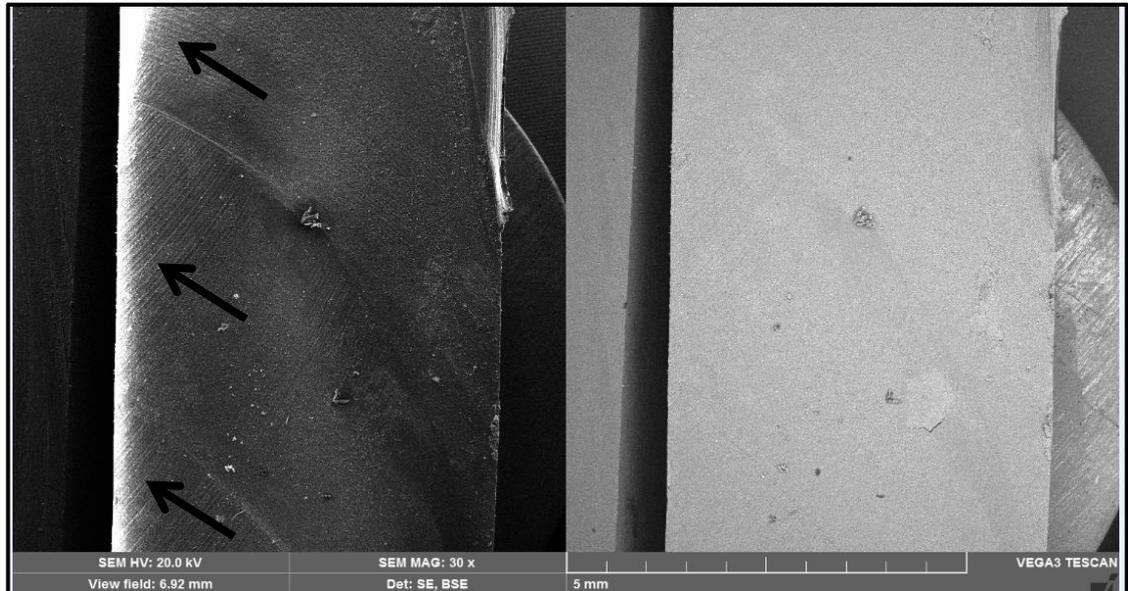
Tabela 5.21: Resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 30 mm não tratadas.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
2FB-1FB	-3,81	-10,312	2,692	0,367
3FB-1FB	-13,498	-20,001	-6,995	0,001
MP-1FB	-11,472	-17,974	-4,969	0,001
3FB-2FB	-9,688	-16,190	-3,185	0,003
MP-2FB	-7,662	-14,164	-1,159	0,018
MP-3FB	2,026	-4,476	8,528	0,809

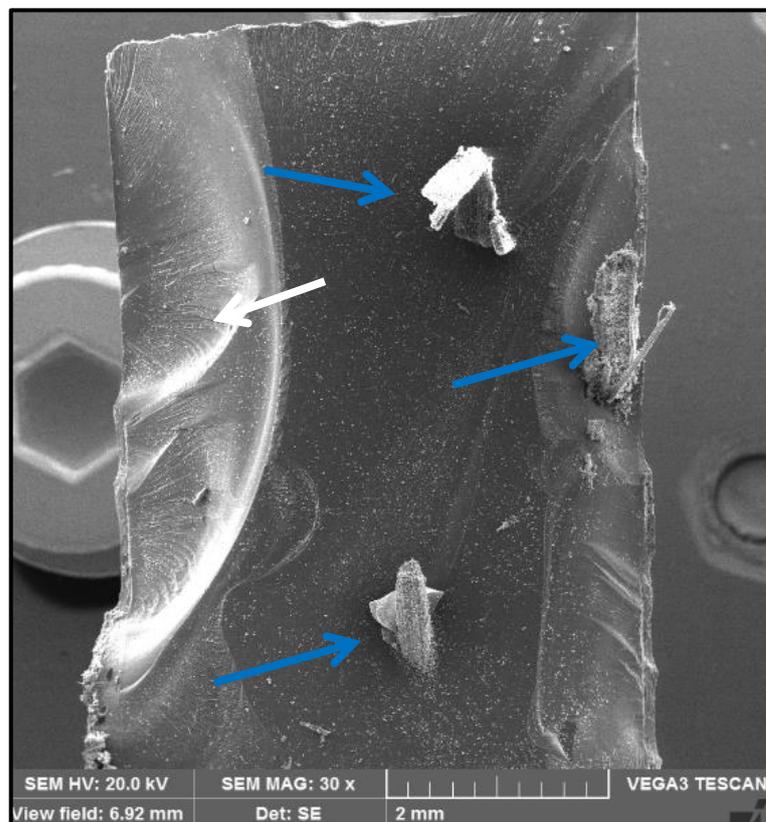
Fonte: Autor (2018).

A Figura 5.28 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratada.

Figura 5.28: Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratada: (a) 3 FB e (b) 1 FB.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 5.28 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito com reforço de fibra de bambu 3 % 30 mm não tratada, onde pode-se observar ranhuras na superfície de fratura (seta preta), ausência de fibras, demonstrando uma fraca adesão fibra/matriz, evidências que influenciam negativamente propriedades mecânicas do compósito. A figura 5.28 (b) mostra a superfície de fratura dos compósitos com reforço de fibras de bambu 3 % 30 mm não tratadas, onde percebe-se fibras sendo rompidas (seta azul) demonstrando uma boa aderência fibra / matriz e as fibras estando dispostas na direção em que o carregamento foi solicitado, nota-se também uma fratura na extremidade da matriz (seta branca), fatos que contribuem para uma melhora nas propriedades mecânicas do compósito.

5.3.5 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos com Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm Tratadas

Na Tabela 5.22, mostram-se os resultados obtidos dos ensaios de tração feitos com compósitos reforçados com as fibras de bambu com tratamento químico com o comprimento de 30 mm.

Tabela 5.22: Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibra de bambu 30 mm com tratamento.

Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Deformação na Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Sem Carga	0	19,54 (\pm 3,05)	4,84	0,81
Fibras de Bambu de 30 mm Tratadas.	1 FB	22,56 (\pm 3,23)	4,12	0,94
	2 FB	28,20 (\pm 3,73)	4,87	0,92
	3 FB	32,14 (\pm 3,71)	5,50	1,11

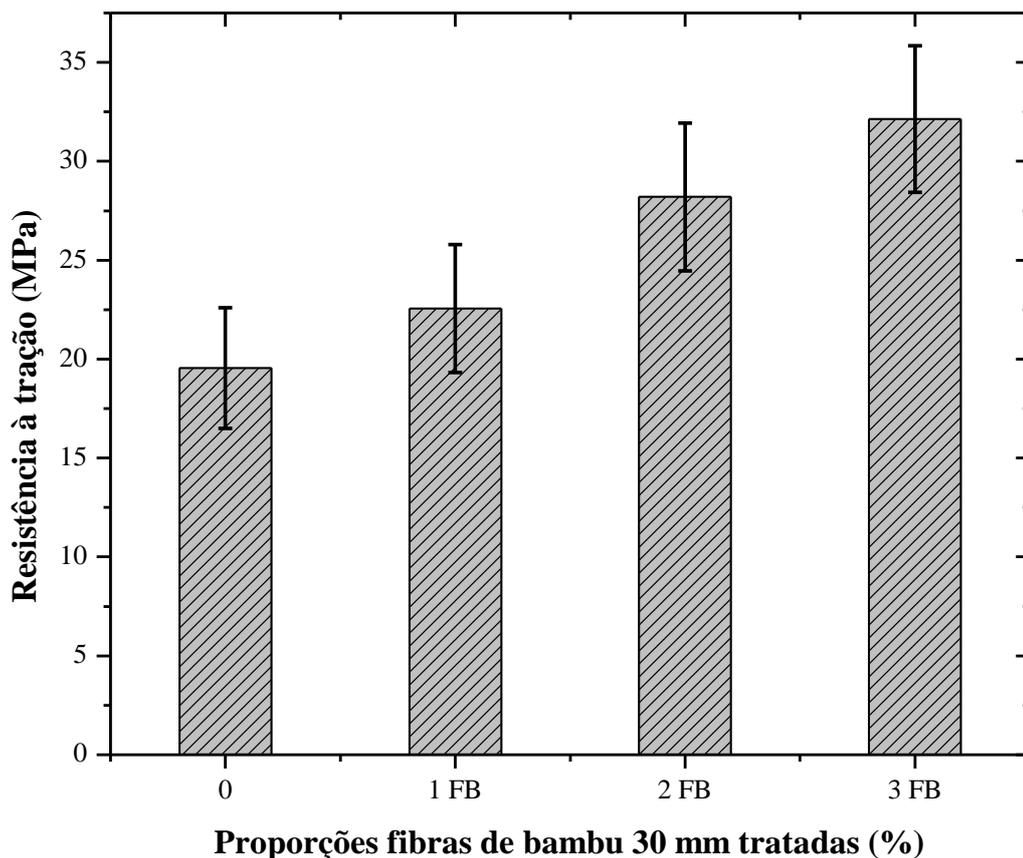
Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 5.22, observa-se um aumento de resistência à tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas quimicamente, nota-se que adicionando fibras de bambu nas frações 1 %, 2 % e 3 %, ocorre de forma diretamente proporcional o aumento da resistência a tração dos compósitos quando comparados com a matriz sem carga, fato este ocorrido por haver uma melhor interação na interface matriz/fibra, com o tratamento químico, onde ocorre uma diminuição gradativa da lignina e da hemicelulose nas fibras, uma melhora

na rugosidade da fibra, eliminação de impurezas da mesma ocasionando com isso melhoras nas propriedades mecânicas do compósito, as fibras podem estar direcionadas no sentido do carregamento da solicitação força ocasionando um aumento da resistência à tração. Fazendo uma comparação com trabalhos da literatura pesquisada: PIRES (2009), trabalhando com compósitos reforçados com fibras de Juta tratada quimicamente com hidróxido de sódio (NaOH) em matriz epoxy, encontrou uma resistência a tração de 51,35 MPa.

A Figura 5.29 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz sem carga e dos compósitos com reforço de fibras de bambu nas frações de 1 FB, 2 FB e 3 FB 30 mm tratadas, quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.29: Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 30 mm tratadas.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparações entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz sem carga e as frações do reforço de fibras de bambu (1 FB, 2 FB, 3 FB). Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA:

único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . A Tabela 5.23 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas.

Tabela 5.23: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	307,8724	3	102,6241	6,45737	0,004	3,2388
Dentro do Grupo	254,2809	16	15,8925			
Total	562,1533	19				

Fonte: Autor (2018).

Como o $F_{\text{calculado}}$ (6,45) foi superior ao F_{tabelado} (3,23) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P - valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.24 apresenta o resultado do teste de tukey para os tratamentos MSC, F 1, F 2 e F 3 30 mm tratada.

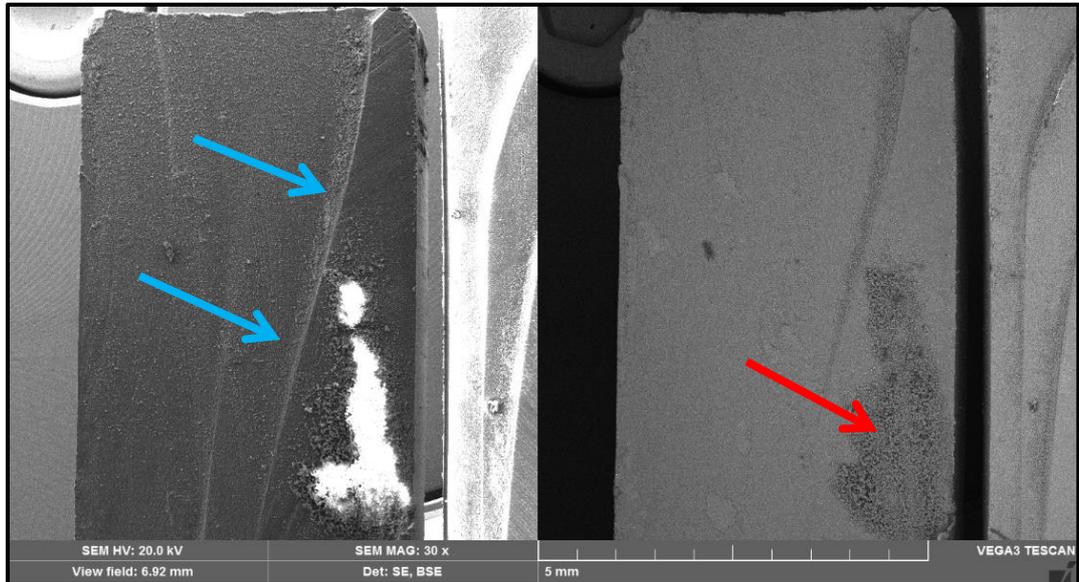
Tabela 5.24: Resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 1 FB, 2 FB e 3 FB 30 mm tratadas.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
FB2-FB1	3,246	-3,967	10,459	0,583
FB3-FB1	8,496	1,282	15,709	0,018
MSC-FB1	-1,838	-9,051	5,375	0,884
FB3-FB2	5,25	-1,963	12,463	0,200
MSC-FB2	-5,084	-12,297	2,129	0,223
MSC-FB3	-10,334	-17,547	-3,120	0,004

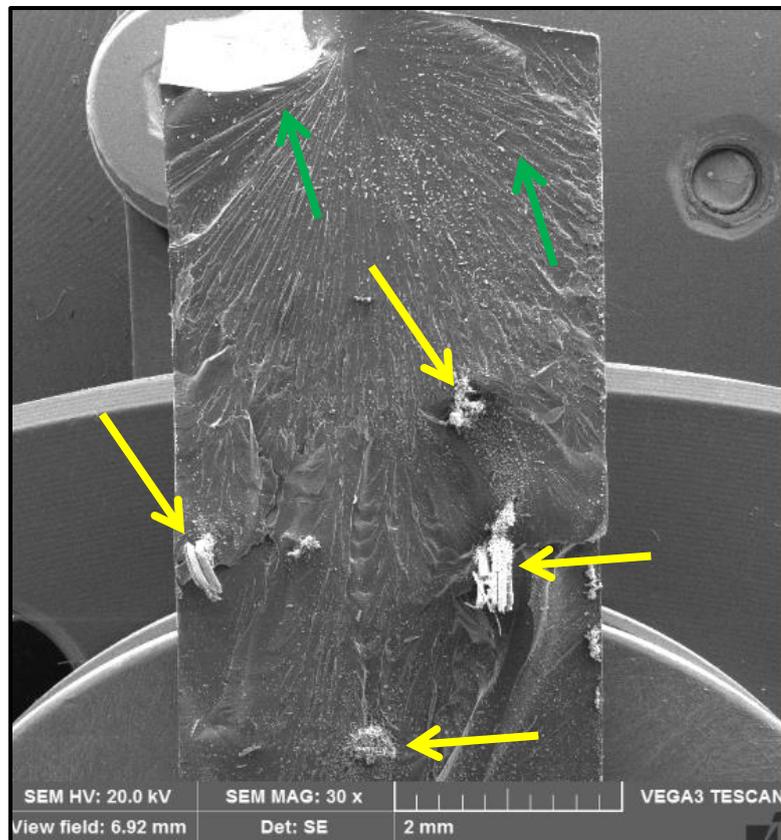
Fonte: Autor (2018).

A Figura 5.30 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm tratada.

Figura 5.30: Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas: (a) 1 FB e (b) 3 FB.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 5.30 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito com reforço de fibra de bambu 1 % 30 mm tratadas, onde pode-se notar uma ausência de fibras na matriz, demonstrando uma fraca adesão fibra/matriz, algumas imperfeições na matriz (seta azul) nota-se também a presença impurezas na superfície da matriz (seta vermelha) nas extremidades da superfície do compósito (seta vermelha), fatores que contribuem para a redução do desempenho do compósito. A figura 5.30 (b) mostra a superfície de fratura dos compósitos com reforço de fibras de bambu 3 % 30 mm tratadas, onde percebe-se fibras sendo rompidas (seta amarela) demonstrando uma boa adesão fibra/matriz e dispostas na direção em que o carregamento foi solicitado, percebe-se também a presença de irradiações (seta verde), detalhes que podem estarem atuando de forma positivamente na resistência do compósito.

5.3.6 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Híbridos com Incorporação de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu de 15 mm Não Tratadas

Os compósitos poliméricos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas foram avaliados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados conforme a Tabela 5.25.

Tabela 5.25: Resultados do ensaio de tração de compósitos híbrido com inserção de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 15 mm sem tratamento.

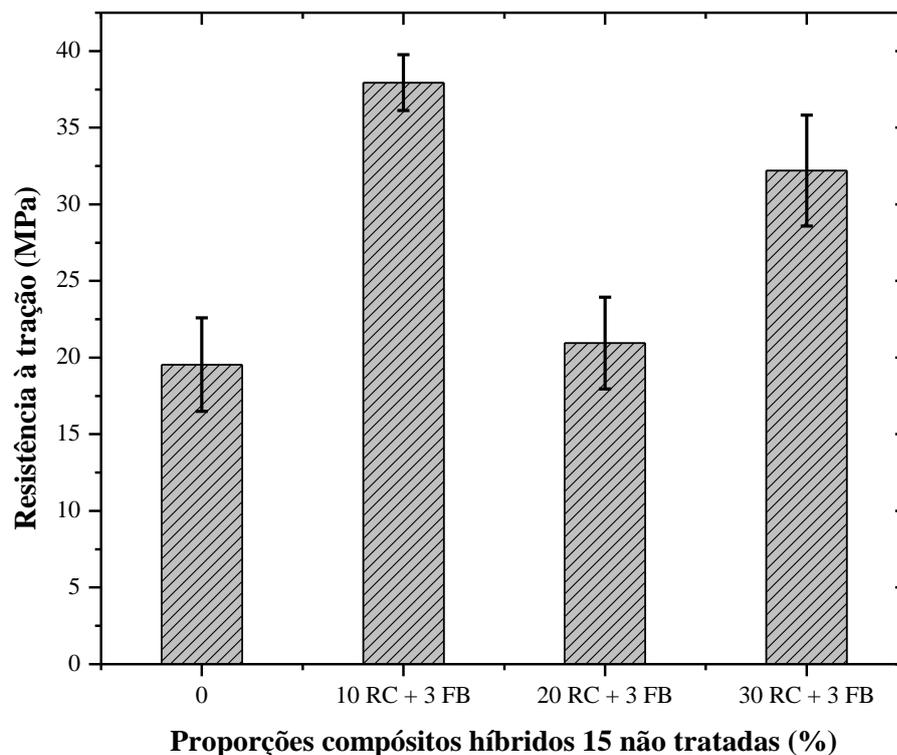
Tipo de Amostra	Fração Mássica (FM) (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Deformação na Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Plena	0	19,54 (\pm 3,05)	4,84	0,81
Resíduo de Cobre + Fibras de Bambu de 15 mm Não Tratadas.	10 RC + 3 FB	37,94 (\pm 1,82)	6,44	1,25
	20 RC + 3 FB	20,95 (\pm 2,99)	4,72	0,94
	30 RC + 3 FB	32,20 (\pm 3,61)	5,42	1,22

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 5.25, observa-se um aumento da resistência a tração no compósito híbrido com 10 RC + 3 FB quando comparado com a matriz plena, enquanto que no compósito híbrido com 20 RC + 3 FB percebe-se uma resistência a tração semelhante a matriz plena e no compósito híbrido com 30 RC + 3 FB um aumento de sua resistência a tração, observa-se também que todos os compósito híbridos apresentaram módulo de elasticidade superior ao da matriz plena. Nota-se que os compósitos híbridos com 10 RC + 3 FB e 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB apresentaram as maiores resistência à tração e módulos de elasticidade. Fazendo uma comparação com trabalhos da literatura, OLIVEIRA (2016), trabalhando com compósitos híbridos resíduo de cobre e fibras de juta obteve uma resistência à tração de 22,22 MPa, já EL BANNA (2017), trabalhando com compósitos híbridos resíduo de cobre e fibras de bananeira encontrou uma resistência à tração de 32,68 MPa.

A Figura 5.31 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre nas frações de 10 RC, 20 RC, 30 RC e reforço de fibras de bambu na fração 3 FB 15 mm não tratadas, quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.31: Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 15 mm não tratadas.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparações entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz sem carga e as frações do compósito híbrido resíduo de cobre (10 RC, 20 RC, 30 RC) e fibras de bambu (3 FB). Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . A Tabela 5.26 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos híbridos com inserção de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas.

Tabela 5.26: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos híbridos com inserção de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	642,8405	3	214,2802	8,7885	0,0011	3,2388
Dentro do Grupo	390,1087	16	24,3817			
Total	1032,949	19				

Fonte: Autor (2018).

Como o $F_{\text{calculado}}$ (8,78) foi superior ao F_{tabelado} (3,23) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P - valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.27 apresenta o resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 15 mm não tratada.

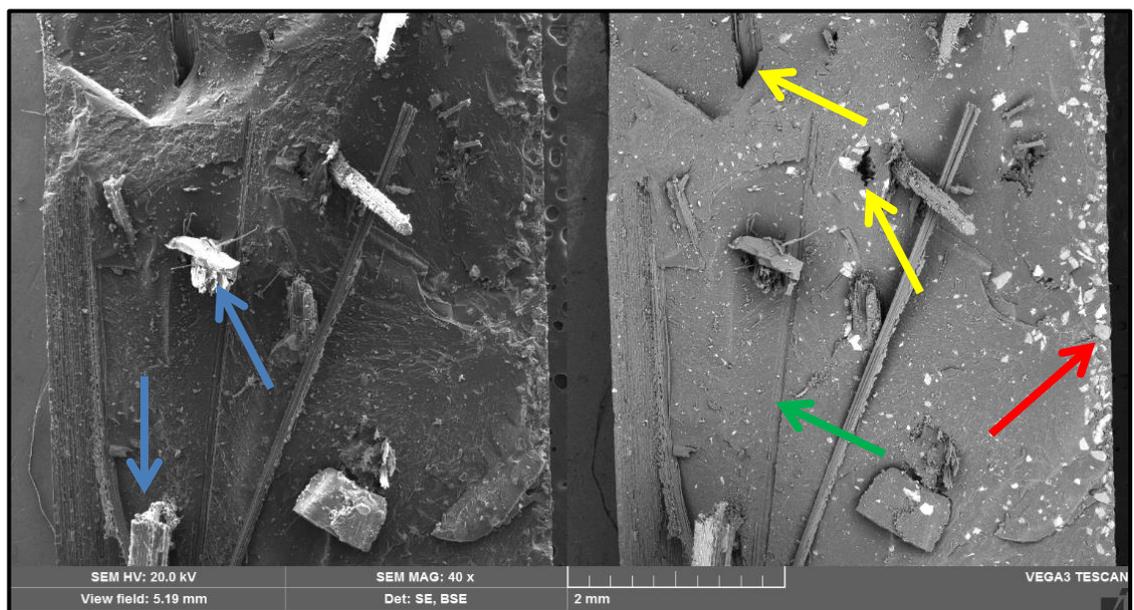
Tabela 5.27: Resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 15 mm não tratadas.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
10RC+3FB-MP	10,308	1,373	19,242	0,021
20RC+3FB-MP	-2,46	-11,394	6,474	0,858
30RC+3FB-MP	9,62	0,685	18,554	0,032
20RC+3FB- 10RC+3FB	-12,768	-21,702	-3,833	0,004
30RC+3FB- 10RC+3FB	-0,688	-9,622	8,246	0,996
30RC+3FB- 20RC+3FB	12,08	3,145	21,014	0,006

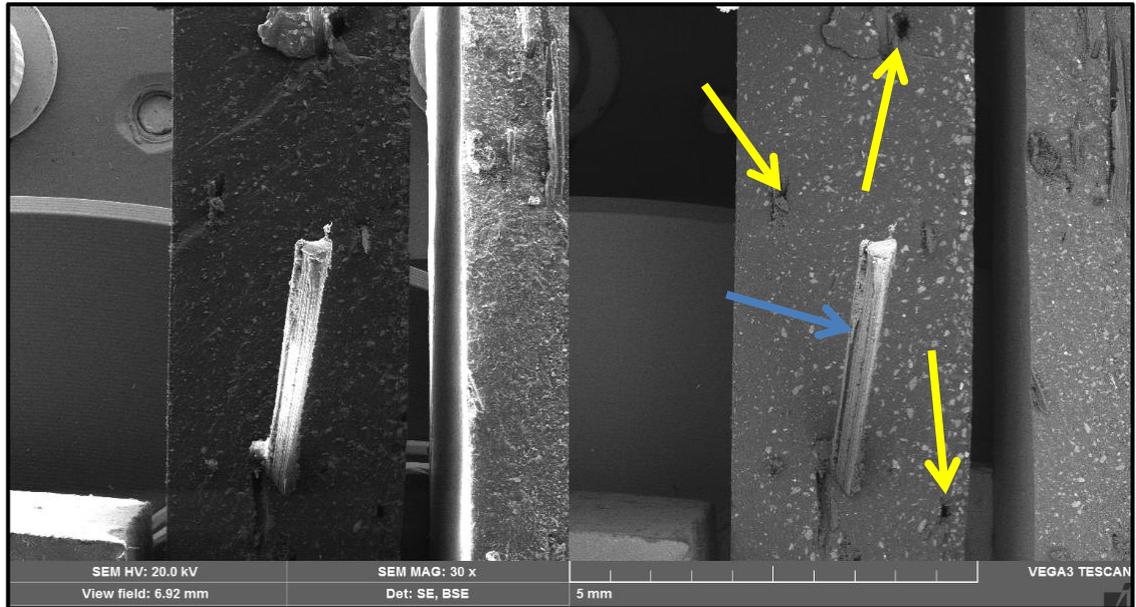
Fonte: Autor (2018).

A Figura 5.32 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos 15 mm não tratada.

Figura 5.32: Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 15 mm não tratado: (a) 20 RC + 3 FB e (b) 10 RC + 3 FB.



(a)



(b)

Na Figura 5.32 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido RC 20 % e F 3 % 15 mm não tratado, onde pode-se notar a presença de fibras dispostas na matriz transversalmente à direção do carregamento, os mecanismos de falha identificado no compósito são o descolamento das fibras da matriz (seta verde), fibras sendo rompidas, (seta azul), fibras sendo sacadas, *pull out* (seta amarela) observa-se também uma total sedimentação do resíduo de cobre na superfície da matriz, (seta vermelha) alguns defeitos de confecção do compósito fatores que ocasionam negativamente o desempenho do compósito. A figura 5.32 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido RC 10 % e F 3 % 15 mm não tratado, onde percebe-se fibras sendo arrancadas (seta amarela) e fibras rompidas e dispostas na direção em que o carregamento foi solicitado, o resíduo de cobre apresenta uma distribuição mais homogênea na matriz provocando uma melhora nas propriedades mecânicas.

5.3.7 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Híbridos com Incorporação de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu de 15 mm Tratadas

Os compósitos poliméricos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm tratados foram avaliados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados conforme a Tabela 5.28.

Tabela 5.28: Resultados do ensaio de tração de compósitos híbrido com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 15 mm com tratamento.

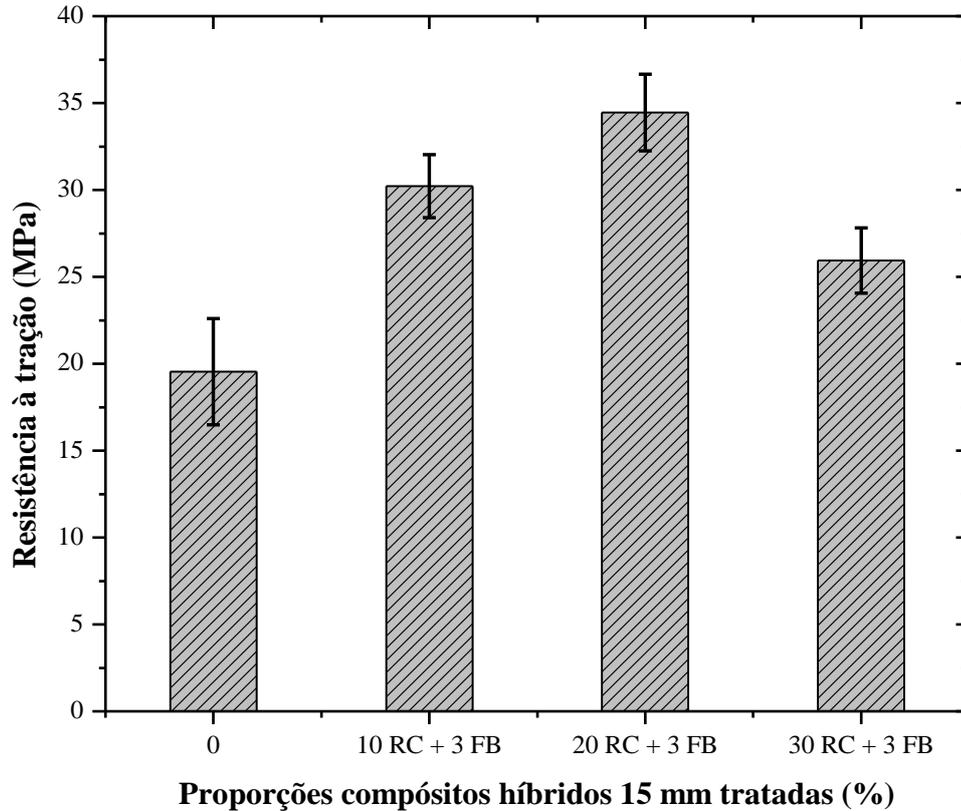
Tipo de Amostra	Fração Mássica (FM) (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Deformação na Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Sem Carga	0	19,54 (\pm 4,05)	4,84	0,81
Resíduo de Cobre + Fibras de Bambu de 15 mm Tratadas.	10 RC + 3 FB	30,22 (\pm 1,82)	5,02	1,23
	20 RC + 3 FB	34,46 (\pm 2,21)	5,59	1,26
	30 RC + 3 FB	25,94 (\pm 1,88)	4,98	1,04

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 5.28 é mostrado os resultados de resistência à tração da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com inserção de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm tratadas, onde observou-se que no geral houve um aumento da resistência à tração, com exceção dos compósitos com fração de resíduo de cobre 30 RC, que ocorreu uma diminuição da resistência à tração, contudo todos os compósitos obtiveram valores de seus módulos de elasticidade superiores ao módulo de elasticidade da matriz sem carga.

A Figura 5.33 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre nas frações de 10 RC, 20 RC, 30 RC e reforço de fibras de bambu na fração 3 FB 15 mm tratadas, quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.33: Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 15 mm tratadas.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparação entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz sem carga e as frações do compósito híbrido resíduo de cobre (10 RC, 20 RC, 30 RC) e fibras de bambu (3 FB). Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . A Tabela 5.29 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos com Inserção de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu de 15 mm Tratadas.

Tabela 5.29: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos híbrido com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 15 mm tratadas.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	413,6267	3	137,8756	12,0136	0,0002	3,2388
Dentro do Grupo	183,626	16	11,4766			
Total	597,2527	19				

Fonte: Autor (2018).

Como o $F_{\text{calculado}}$ (12,01) foi superior ao F_{tabelado} (3,23) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P- valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.30 apresenta o resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 15 mm tratada.

Tabela 5.30: Resultado do Teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 15 mm tratadas.

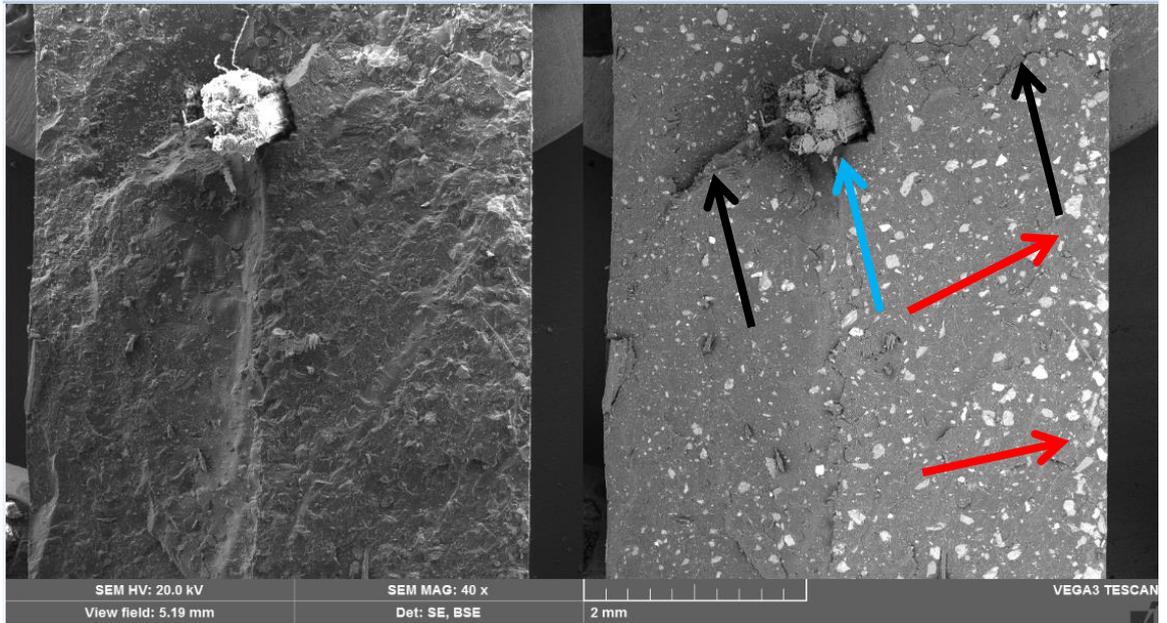
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
10RC+3FB-MP	5,36	-0,769	11,489	0,097
20RC+3FB-MP	12,194	6,064	18,323	0,001
30RC+3FB-MP	2,582	-3,547	8,711	0,632
20RC+3FB- 10RC+3FB	6,834	0,704	12,963	0,026
30RC+3FB- 10RC+3FB	-2,778	-8,907	3,351	0,578
30RC+3FB- 20RC+3FB	-9,612	-15,741	-3,482	0,001

Fonte: Autor (2018).

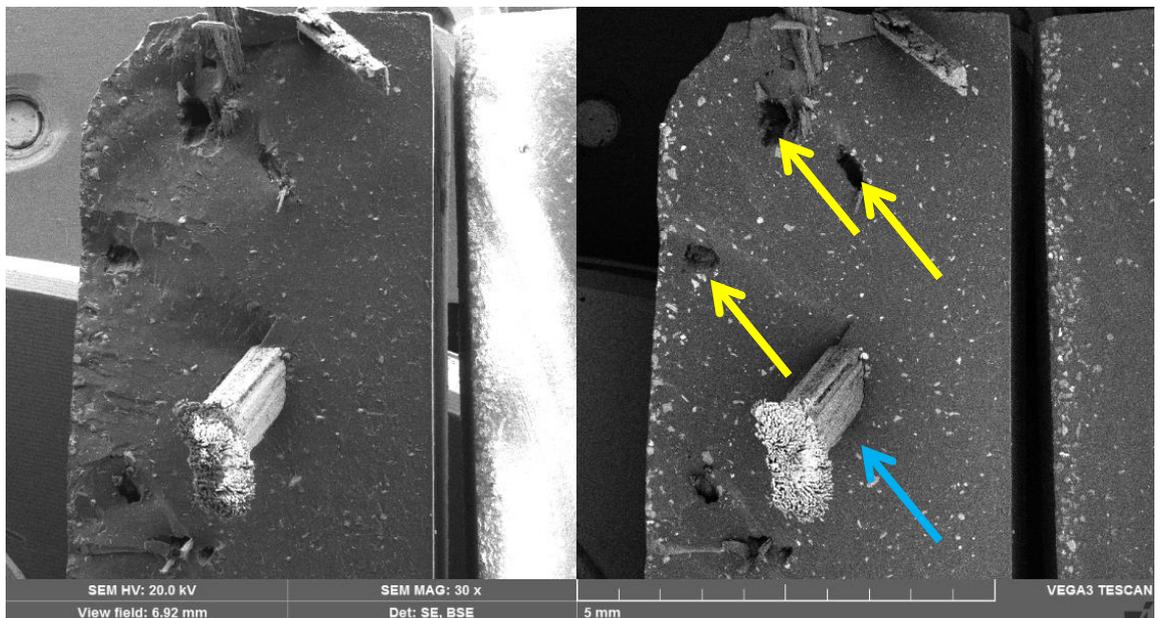
A Figura 5.34 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos 15 mm tratada.

Figura 5.34: Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 15 mm tratada:

(a) 10 RC + 3 FB e (b) 20 RC + 3 FB.



(a)



(b)

Na Figura 5.34 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido RC 10 % e F 3 % 15 mm tratado, onde pode-se notar a presença de fibras rompidas (seta azul), presença de trincas na matriz (seta preta), observa-se também uma total sedimentação do resíduo de cobre (seta vermelha) na superfície da matriz, nota-se ainda uma fraca adesão fibra/matriz fatores que ocasionam de forma negativa o desempenho do compósito. A figura 5.34 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido RC 20 % e F 3 % 15 mm tratado, onde percebe-se fibras sendo arrancadas (seta amarela) e fibras rompidas (setas azuis), onde o mecanismo de falha dominante foi de fibras rompidas (seta azul), confirmando assim a boa adesão fibra/matriz, o resíduo de cobre apresenta uma distribuição mais homogênea na matriz provocando uma melhora positiva nas propriedades mecânicas.

5.3.8 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Híbridos com Incorporação de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm Não Tratadas

Os compósitos poliméricos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm não tratados foram avaliados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados conforme a Tabela 5.31.

Tabela 5.31: Resultados do ensaio de tração de compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 30 mm sem tratamento

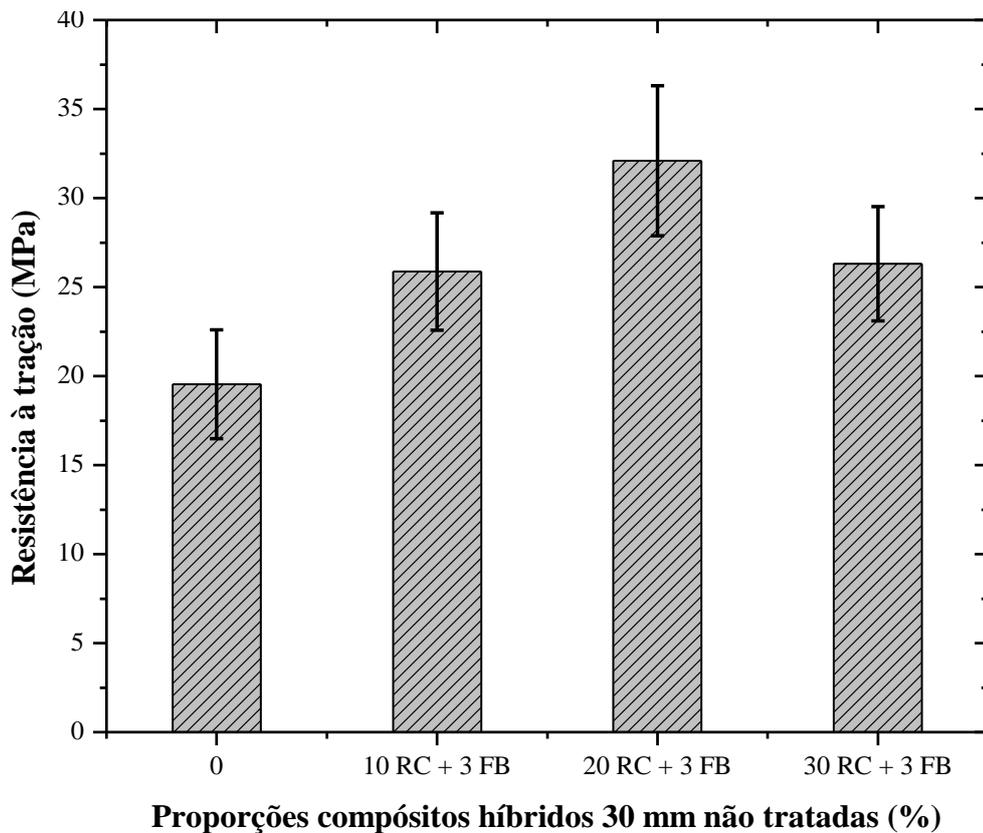
Tipo de Amostra	Fração Mássica (FM) (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Deformação na Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Sem Carga	0	19,54 (\pm 4,05)	4,84	0,81
Resíduo de Cobre + Fibras de Bambu de 30 mm Não Tratadas.	10 RC + 3 FB	25,87 (\pm 3,30)	4,94	1,05
	20 RC + 3 FB	32,10 (\pm 4,21)	5,41	1,28
	30 RC + 3 FB	26,31 (\pm 3,22)	6,24	0,88

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 5.31 é mostrado os resultados de resistência à tração da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm não tratadas, onde observou-se que a medida que aumenta a fração de resíduo de cobre ocorre um aumento da resistência à tração, com exceção dos compósitos com fração de resíduo de cobre 30 RC, onde ocorre uma diminuição da resistência à tração, entretanto observa-se também que os compósitos híbridos tiveram a sua rigidez aumentada nas frações de 10 RC e 20 RC quando comparado com a matriz plena.

A Figura 5.35 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos híbridos com inserção de resíduo de cobre nas frações de 10 RC, 20 RC, 30 RC e reforço de fibras de bambu na fração 3 FB 30 mm não tratadas, quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.35: Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da Inserção de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm não tratadas.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparação entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz sem carga e as frações do compósito híbrido resíduo de cobre (10 RC, 20 RC, 30 RC) e fibras de bambu (3 FB). Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . A Tabela 5.32 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos com inserção de resíduo de cobre.

Tabela 5.32: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com inserção de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm não tratadas.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	298,2519	3	99,4173	5,1839	0,010	3,2388
Dentro do Grupo	306,8451	16	19,1778			
Total	605,0971	19				

Fonte: Autor (2018).

Como o $F_{\text{calculado}}$ (5,18) foi superior ao F_{tabelado} (3,23) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P - valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.33 apresenta o resultado do Teste de tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 30 mm não tratada.

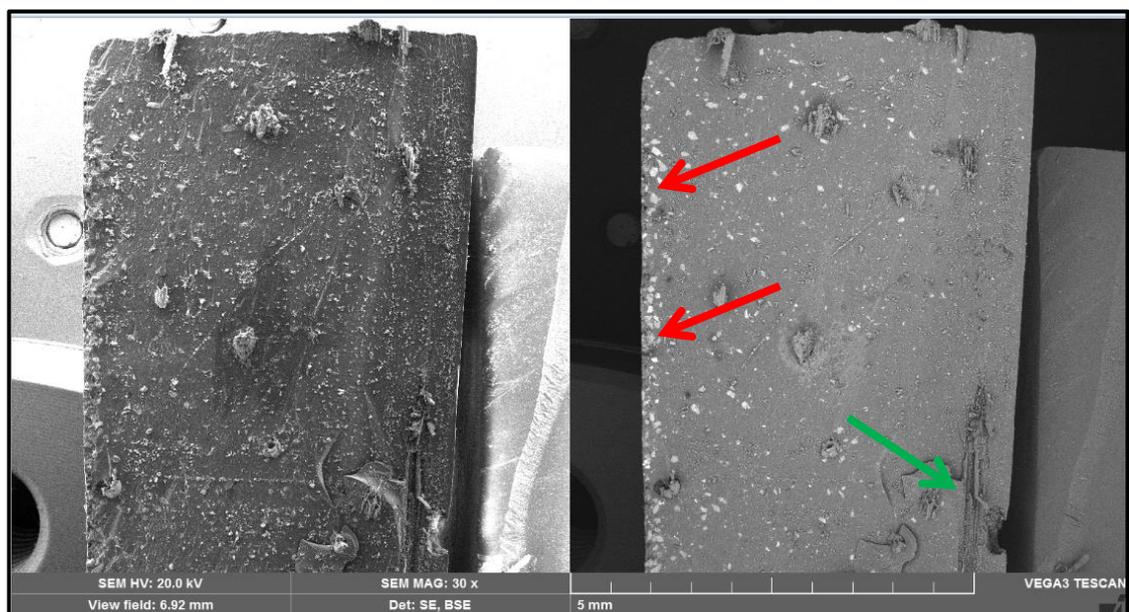
Tabela 5.33: Resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 30 mm não tratada.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
10RC+3FB-MP	-0,146	-8,070	7,778	0,999
20RC+3FB-MP	9,234	1,309	17,158	0,019
30RC+3FB-MP	4,618	-3,306	12,542	0,371
20RC+3FB-	9,38	1,455	17,304	0,017
10RC+3FB				
30RC+3FB-	4,764	-3,160	12,688	0,346
10RC+3FB				
30RC+3FB-	-4,616	-12,540	3,308	0,372
20RC+3FB				

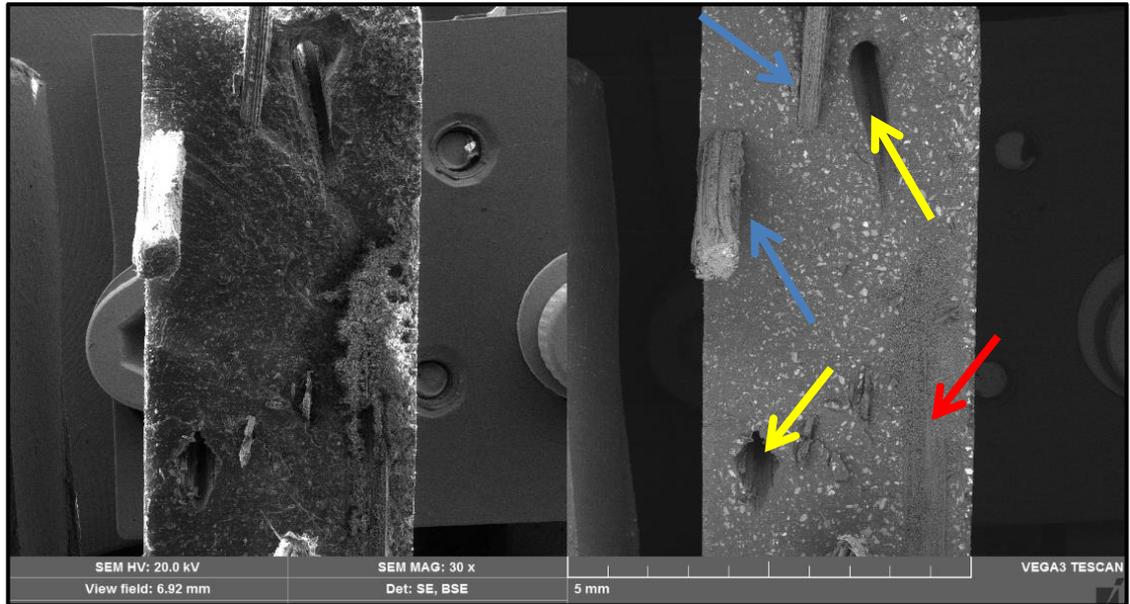
Fonte: Autor (2018).

A Figura 5.36 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos 30 mm não tratada.

Figura 5.36: Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 30 mm não tratada: (a) 30 RC + 3 FB e (b) 20 RC + 3 FB.



(a)



(b)

Na Figura 5.36 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido RC 30 % e F 3 % 30 mm não tratada, onde pode-se notar a presença de fibras descoladas (seta verde) e dispostas na matriz transversalmente à direção do carregamento, uma fraca adesão fibra/matriz, observa-se também uma concentração do resíduo de cobre na superfície da matriz, alguns defeitos de confecção do compósito fatores que ocasionam negativamente o desempenho do compósito. A figura 5.36 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido RC 20 % e F 3 % 30 mm não tratada, onde nota-se fibras sendo arrancadas (seta amarela), fibras descoladas (seta vermelha) e fibras rompidas (seta azul) e dispostas na direção em que o carregamento foi solicitado, o resíduo de cobre apresenta uma distribuição mais homogênea na matriz ocasionando uma melhora nas propriedades mecânicas.

5.3.9 Resultados de Resistência à Tração dos Compósitos Híbridos com Incorporação de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm Tratadas

Os compósitos poliméricos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm tratados foram avaliados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados conforme a Tabela 5.34.

Tabela 5.34: Resultados do ensaio de tração de compósitos híbrido com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 30 mm com tratamento.

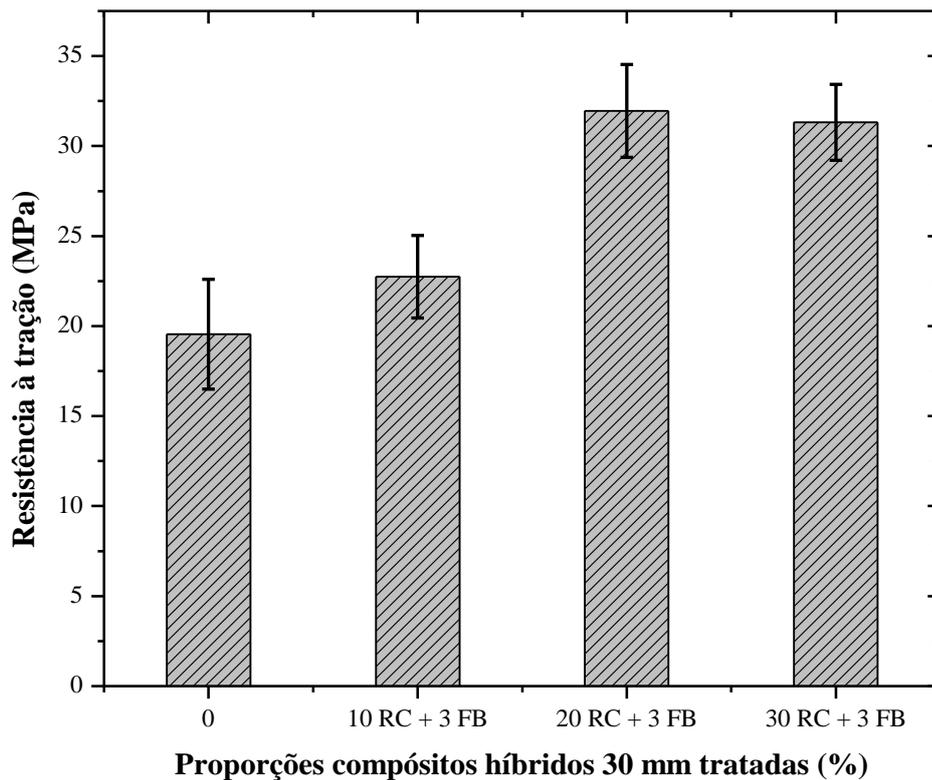
Tipo de Amostra	Fração Mássica (FM) (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Deformação de Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Sem Carga	0	19,54 (\pm 4,05)	4,84	0,81
Resíduo de Cobre + Fibras de Bambu de 30 mm Tratadas.	10 RC + 3 FB	22,74 (\pm 2,30)	6,21	0,93
	20 RC + 3 FB	31,96 (\pm 2,58)	5,35	1,25
	RC 30 + F 3%	31,31 (\pm 2,11)	5,60	1,18

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela 5.34 são mostrados os resultados de resistência à tração da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas, onde observou-se que na fração RC 10 do compósito híbrido a propriedade analisada (Resistência à tração) não apresentou um aumento significativo, enquanto que nas frações de RC 20 e RC 30 do compósito híbrido teve um aumento significativo da resistência a tração do compósito quando comparado a matriz sem carga e nota-se também um aumento dos módulos de elasticidades dos compósitos híbridos comparados com a matriz sem carga.

A Figura 5.37 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre nas frações de 10 RC, 20 RC, 30 RC e reforço de fibras de bambu na fração 3 FB 30 mm tratadas, quanto as suas resistências à tração.

Figura 5.37: Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 30 mm tratadas.



Fonte: Autor (2018).

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey foram realizadas comparação entre os materiais estudados com o intuito de evidenciar diferenças significativas entre as resistências à tração, entre a matriz sem carga e as frações do compósito híbrido resíduo de cobre (10 RC, 20 RC, 30 RC) e fibras de bambu (3 FB). Utilizando o *software* EXCEL, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela de análise de variância. Foi realizada ANOVA ao (α) de 5%. Tendo como H_0 – equivalência entre médias; na qual para P – valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . A Tabela 5.35 apresenta os dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com inserção de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas.

Tabela 5.35: Dados gerados pela ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos com inserção de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas.

Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre Grupos	623,8398	3	207,9466	8,8856	0,010	3,2388
Dentro do Grupo	374,4386	16	23,4024			
Total	998,2784	19				

Fonte: Autor (2018).

Como o $F_{\text{calculado}}$ (8,88) foi superior ao F_{tabelado} (3,23) ao nível de significância 5 %, mostrando com isso uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese nula H_0 , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (Resistência à tração) com grau de confiança superior a 95 % de probabilidade. Pelo P-valor $< \alpha$ constata-se que os tratamentos das frações de resíduo de cobre foram significativos na tração. Como H_0 (Hipótese Nula) foi rejeitada, pode se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma. A Tabela 5.36 apresenta o resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 30 mm tratada.

Tabela 5.36: Resultado do teste de Tukey para os tratamentos MP, 10 RC + 3 FB, 20 RC + 3 FB e 30 RC + 3 FB 30 mm tratada.

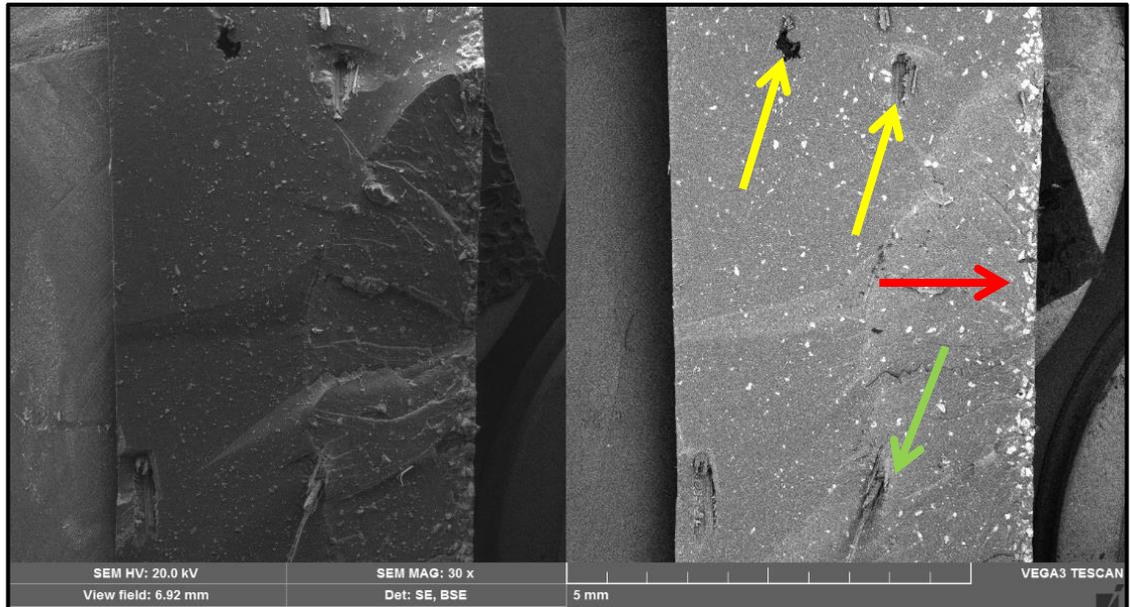
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
10RC+3FB-MP	-5,218	-13,971	3,535	0,353
20RC+3FB-MP	10,204	1,450	18,957	0,019
30RC+3FB-MP	3,17	-5,583	11,923	0,731
20RC+3FB- 10RC+3FB	15,422	6,668	24,175	0,001
30RC+3FB- 10RC+3FB	8,388	-0,365	17,141	0,062
30RC+3FB- 20RC+3FB	-7,034	-15,787	1,719	0,139

Fonte: Autor (2018).

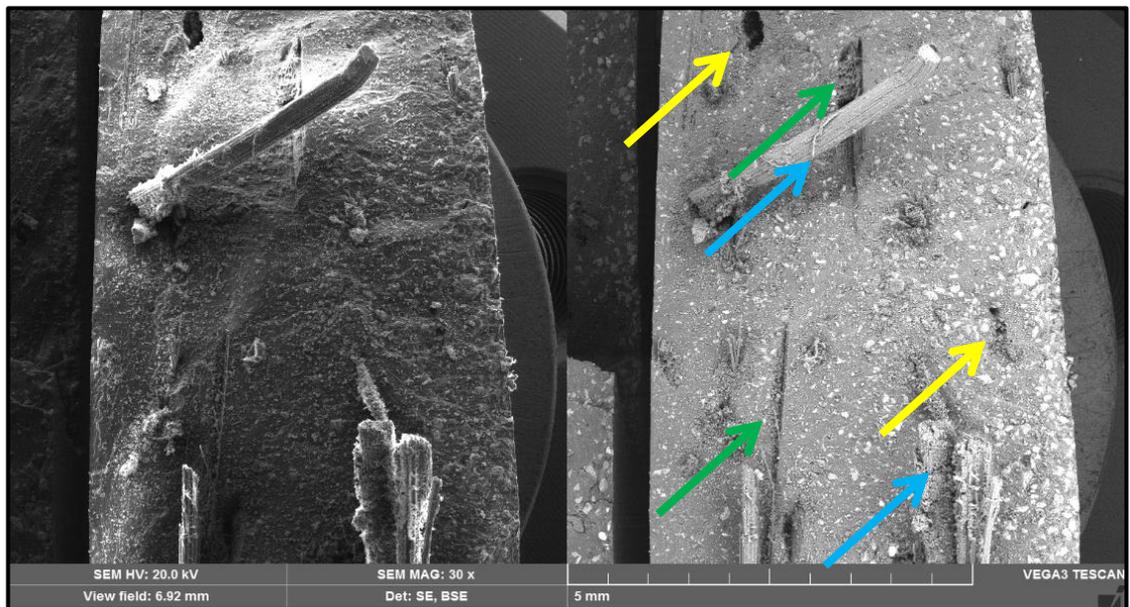
A Figura 5.38 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos 15 mm não tratada.

Figura 5.38: Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 30 mm tratada:

(a) 10 RC + 3 FB e (b) 20 RC + 3 FB.



(a)



(b)

Na Figura 5.38 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido RC 10 % e F 3 %, onde se pode notar a presença de fibras arrancadas *pull out* (seta amarela), pequenas fissuras na matriz (seta branca), observa-se também uma concentração do resíduo de cobre na superfície da matriz (setas vermelhas), fatores que ocasionam negativamente o desempenho do compósito. A figura 5.38 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido RC 20 % e F 3 %, onde nota-se fibras sendo arrancadas *pull out* (seta amarela), fibras descoladas (seta verde) e fibras rompidas (seta azul) e dispostas na direção em que o carregamento foi solicitado, o resíduo de cobre apresenta uma distribuição homogênea na matriz fatores que ocasionam uma melhora nas propriedades mecânicas do compósito.

6 CONCLUSÕES

O tratamento químico com NaOH a 5 % v/v, nas fibras de bambu provocou um aumento da resistência à tração dos compósitos produzidos com reforços dessas fibras, quando comparados com os compósitos com reforço de fibras de bambu não tratadas quimicamente.

As propriedades físicas, absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) apresentaram aumento gradativo com inclusão das fibras e os resíduos junto a matriz. Com relação à MEA não houve mudanças significativas com inclusão de fibras, porém, com a inclusão de resíduos houve um aumento expressivo.

Os compósitos fabricados com resíduo de cobre tiveram um aumento no seu limite de resistência a tração até a fração volumétrica de 40 %, onde o compósito atingiu um limite de resistência a tração de 40,25 MPa. Denotando a utilização até esse valor, o resíduo pode ser considerado como reforço efetivo na matriz.

Compósitos que tiveram a inserção de fibras de 15 mm não tratadas tiveram um comportamento mecânico de resistência à tração similar a da matriz sem carga.

Já os compósitos com inserção de fibras de bambu de 15 mm tratadas com NaOH, chegaram a um limite de resistência de 33,05 MPa, com fração de 3 % de fibras.

Quando inseridas fibras de 30 mm de bambu não tratadas, com fração de 1 %, os compósitos chegaram num valor de resistência a tração de 33,11 MPa.

Quando a inserção de fibras de 30 mm de bambu tratadas quimicamente, o compósito com fração de 3 %, apresentou um valor de resistência a tração de 32,14 MPa.

Já para os compósitos híbridos, os que apresentaram melhor resistência à tração foram os compósitos 10 RC + 3 F 15 mm não tratadas quimicamente obtendo um valor de 37,94 MPa, enquanto que os compósitos híbridos 20 RC + 3 F 30 mm não tratada obteve uma resistência de 32,10 MPa.

As análises das superfícies de fratura demonstraram que os mecanismos de falhas predominantes nos compósitos de maiores resistências foram o rompimento das fibras. E para os compósitos de menores resistências os mecanismos de falhas predominantes foram o *pull out* (arrancamento das fibras), descolamento de fibras da matriz e imperfeições na matriz.

No Geral, as séries ensaiadas que apresentaram os melhores resultados foram os compósitos com inserção de resíduo de cobre onde obteve um valor de 40,25 MPa e compósitos híbridos 10 RC + 3 F 15 mm não tratadas quimicamente obtendo um valor de 37,94 MPa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Utilizar outro tipo de matriz na confecção dos compósitos, como também outras fibras vegetais como reforço;
- ✓ Fabricar e analisar as propriedades das placas de materiais compósitos com outros tipos de resíduos industriais, variando tanto as proporções dos resíduos, como das fibras utilizadas dentro da matriz;
- ✓ Ensaaios Mecânicos (Flexão, Impacto) em Compósitos Reforçados com Fibras de Bambu e Resíduo Industrial de Cobre e seus Correlatos Fractográficos;
- ✓ Utilizar as fibras de bambu em forma de polpa como reforçamento dos compósitos verificando sua influência nas propriedades dos compósitos fabricados;
- ✓ Fabricar compósitos com reforço de fibras vegetais orientadas unidirecionalmente.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, T.L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3ª ed. Boca Raton: CRC Press. 640 p. 2004.

ASTM D 3039 - 08, "**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (Metric)**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM D1984 - 1969 (1992) e1, "**Standard Specification for Tall Oil Fatty Acids**", ASTM International, West Conshohocken, PA, 1992.

AZIZ, S. H. ANSELL M. P. CLARKE, J. C. PANTENY, S. R. Modified polyester resins for natural fibre composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, n. 3-4, p. 525-535, 2005.

BRASKEM. **Glossário de termos aplicados à Polímeros**. Boletim, n. 8 PVC, 2002.

BRANDÃO, A. T. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos de Polipropileno Reforçados com Fibras Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2015. 55f. Dissertação (mestrado), programa de mestrado profissional em materiais. Centro universitário de volta redonda. Volta Redonda – Rio de Janeiro, 2015.

BLEDZKI, A. K. REIHMANE, S. GASSAN, J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. **Journal of Applied Polymer Science** 59:1329–1336, 1999.

BLEDZKI, A. K. GASSAN, J. Composites Reinforced with cellulose based fibres, **Progress Polymer. Science**, 24, p.221 - 274 (1999).

BURZIC, M. The Effect of fiber orientation on impact toughness and fracture properties of carbon fiber-epoxy composite. **In: CHARPY CENTENARY CONFERENCE, 2001, France. From charpy to present testing**. Amsterdam: Elsevier. p. 417-424 (ESIS Publication, 30), 2001.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARVALHO, L. H. de. **Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras Vegetais**. DEMa/CCT/UFCG. 2003.

CARVALHO, L. H. CAVALCANTI, W. S. - **Polímeros**, 16, p.33 (2006).

CANEVAROLO, Sebastião V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. Editora Artliber. São Paulo, 2007.

COSTA, D. S. da, **Estudo da Influência de Resíduos Gerados pela Indústria de Mineração nas Propriedades de Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados com Fibras Naturais**. 2016. 229 p. Tese (Doutorado), (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém. 2016.

CUNHA, E. J. S. **Influência do uso de Resíduo do Processo Bayer nas Propriedades Térmicas e Mecânicas de Compósitos de Base Polimérica Reforçados com Fibra de Curauá (*Ananas lucidus*. Mill)**. 2014, 152 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais - PRODERNA), Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2014.

CHUNG, D. D. L. **Composite materials**. 2. ed. Berlin: Springer, 2010.

DANIEL, I.M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford University Press, New York: 2006.

EL BANNA, W. H. **Influência do Resíduo de Flotação de Minério de Cobre nas Propriedades Físicas Mecânicas de Compósitos de Matriz Termofixa e Fibras de Bananeira (*Musacae*)**. 2017. 166 p. Tese (Doutorado), (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém. 2017.

FERREIRA, C. A.; BORGES, S. G.; CARNEIRO, P. S.; TRINDADE, R. S.; LEITE, P. A. M. Avaliação da influência de diferentes cargas no tempo de cura e temperatura de cura de resinas poliéster insaturadas por intermédio de curvas exotérmicas. **17º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, pp. 3833-3842, 2006.

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

FLUMIGNAN, I. **A Cultura do bambu como um produto que pode ajudar a curar o planeta do efeito estufa**. Repositório de informações sobre o aquecimento global. Abril, 2015.

GRECO, T.; CROWBERG, M. **Bambu: Cultivo e Manejo**, Florianópolis 2011. Ed. Insular

GHAVAMI, K. Application of bamboo as a low-cost construction material. **Proceedings of the Int'I Bamboo**, Workshop, nov. 1988.

GROSSER, D.; LIESE, W. Distribution of vascular bundles and cell types in the culm of various bamboo species. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.32, p.473-482, 1974.

JESSOP, J. THOMPSON, M. **The international Copper Industry**, Wood Headb Publishing, 1st., Cambridge, England, 2002.

KIGOMO, B. **Guidelines for growing bamboo**. Guideline, Series: n.4. Kenya Forestry Research Institute - KEFRI. Nairobi, Kenya, 2007.

LEÃO, R. M. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno**. 2012. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânica)-Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blucher, 2006.

LEWIN, M.; MEY-MAROM, A.; FRANK, R. Surface free energies of polymeric materials, additives and minerals. **Polymers for Advanced Technologies**, New York, v. 16, n. 6, p. 429-441, 2005.

LIMA, A. B. T. **Aplicações de Cargas Minerais em Polímeros**. 2007. 87f. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LÓPES O. H. **Manual de Construcción con Bambú**. Ed. Estudios Técnicos Colombianos, 2003.

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D. Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, p. 92-99, 2008.

MARTINS NETO, J. A. **Desempenho Mecânico de Compósitos Híbridos de Fibras Naturais e Poliéster não Saturado**. 2010. 89 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.

MARTINS NETO, J. A. **Obtenção, Caracterização e Utilização de um Compósito com Matriz de Resina Poliéster e Carga de Fibras de Sisal**. 2016. 101 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. 3rd. ed. Dearborn: University of Michigan-Dearborn, 2007.

MOURA, W. A., DAL MOLIN, D. C. C., **Influência da adição de escória de cobre em características relacionadas à durabilidade do concreto**, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 41-56, abr./jun. 2004.

NASCIMENTO, J. C., CORDEIRO, H. C., CORAL, N. F. A. F., CORRÊA, J. A. M., MOREIRA, S. G. C., RODRIGUES, E. M. S., **Caracterização de resíduos sólidos da barragem de rejeitos da mina do sossego (Canaã dos Carajás-PA)**, XX COBEQ, 2014. Florianópolis-SC.

OLIVEIRA, L. S.; COSTA, D. S.; MOREIRA, H. C.; SOUZA, J. A. S. **Análise da Influência do Resíduo de Cobre e Fibra de Juta (em fios) nos Ensaios de Tração e Flamabilidade Aplicados em Compósitos**. XXI – Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ 2016.

OLIVEIRA, M. J. A. **Efeito da Adição de Lama Vermelha como Carga nas Propriedades Mecânicas de Compósitos de Poliéster Insaturado Reforçado com Fibra Natural de Curauá (*Ananas erectifolius*)**. 2013. 67 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

PAULA, G. P. **Formulação e Caracterização de Compósitos com Fibras Vegetais e Matriz Termoplástica**. 2011. 102 p. Dissertação (Mestrado), (Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2011.

RABELLO, M.S. **Aditivos de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2000.

RAZERA, I. A. T. FROLLINI, E. - Composites based on jute fibers and phenolic matrices: Properties of fibers and composites. **Journal of Applied Polymer Science**, 91, p.1077 – 1085, 2004.

RICHARDSON, H. W., 1997, **Handbook of Copper Compounds and Application**, CRC, 1st. ed., USA, 1997.

ROCHA, I. G. da, **Influência Do Retardante de Chamas nas Propriedades Mecânicas e Flamabilidade em Compósitos Poliméricos de Epóxi/Fibra de Curauá**. 2015. 82 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015.

SARANDI, A. R. **Natural Fiber Thermoplastic Composites: a Review**. In: Leão, A. L., 2002,

SANTOS, A. J. G. **Compósitos de Matriz Poliéster com Reforços Híbridos de Fibras de Piaçava, Sisal, Palha da Costa E Juta: Comportamento em Tração e Aspectos Fractográficos**. 2015. 126 p. Dissertação (Mestrado), (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Pará, Belém. 2015.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2.ed. Edgard Blücher, 408 p. v. 1, 1989.

SAROJA D, M.; MURUGESAN, V.; RENGARAJ, K.; ANAND, P. Utilization of flyash as filler for unsaturated polyester resin. **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 69, nº 7, p. 1385-1391, 1998.

SCHLESINGER, M. E., KING, M. J., SOLE, K. C., DAVENPOR, W. G., 2011, **Extractive Metallurgy of Copper**, Elsevier B.V, 5st ed., Amsterdam, The Netherlands.

SILAEX, POLIESTER INSATURADO:

Disponível em: <www.silaex.com.br/poliester.htm> Acesso em: 28 Outubro 2017.

SILVA, R, V. **compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 F. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, H. S. P. da, **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Curauá e Híbridos com Fibras de Vidro**. 2010. 86 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

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

SOUZA, J. A. S., **Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil**. 2010. 154 p. Tese (Doutorado), (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém. 2010.

TARGA, G. N., PIRES, E. N., AL-QURESHI, H. A., BARRA, G. M. O., 2009, *Produção e caracterização de um compósito de fibra de juta e resina de poliéster insaturado*, **In: 10º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

TORRES, R. B. **Desenvolvimento de compósito híbrido de fibra de vidro e micropartículas de sílica e cimento para uso em caneleiras**. 2013. 70 F. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) - Universidade Federal de São João Del-Rei, MG, 2013.

THOMAS, N.I.R. **Influência de tratamentos superficiais em fibras de Licuri na aderência interfacial do compósito com matriz poliéster**. Dissertação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

VINCENZINE, P. **Advanced structural fiber composites**. Itália: Techna Faenza, 1995, p. 623.

WERMUTH, D. P. **Análise das Propriedades Físicas do Compósito Cobre e Cinzas Leves de Carvão Produzido por Metalurgia do Pó**. 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós- Graduação em engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2015.

YU, Y. WANG, H. LU, F. TIAN, G. LIN, J. Bamboo fibers for composite applications: a mechanical and morphological investigation, **Jornal Materials Science**, Vol. 49, p. 2559–2566, 2014.