



**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO INCORPORADO COM
FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa Vulgaris*) E RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS
PARA UTILIZAÇÃO COMO COMPONENTE ESTRUTURAL PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Alessandro José Gomes dos Santos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito necessário à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

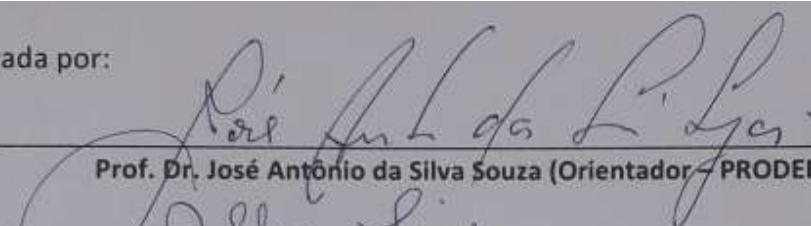
Belém-PA
Março de 2020

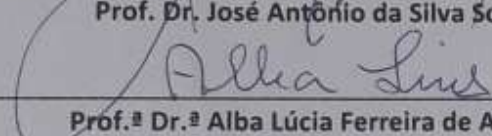
**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO INCORPORADO COM
FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa Vulgaris*) E RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS
PARA UTILIZAÇÃO COMO COMPONENTE ESTRUTURAL PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL**

ALESSANDRO JOSÉ GOMES DOS SANTOS

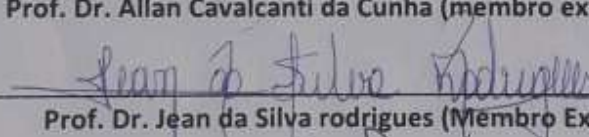
TESE DE DOUTORADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO NECESSÁRIO À
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

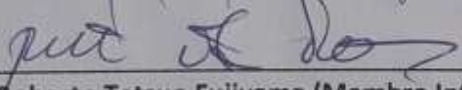
Aprovada por:

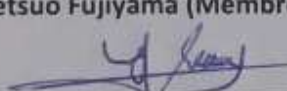

Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza (Orientador – PRODERNA/UFPA)


Prof.ª Dr.ª Alba Lúcia Ferreira de Almeida Lins (Membro Externo – MCTIC)

Prof. Dr. Allan Cavalcanti da Cunha (membro externo – UNIFAP)


Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues (Membro Externo – IFPA)


Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama (Membro Interno – PRODERNA/UFPA)


Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha (Examinador Externo ao Programa - UFPA)

Belém-PA

Março de 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) –
Biblioteca Central / UFPA, Belém – PA.

Santos, Alessandro José Gomes dos, 1987.

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO INCORPORADO COM FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS PARA UTILIZAÇÃO COMO COMPONENTE ESTRUTURAL PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL/ Alessandro José Gomes dos Santos. - 2020

Orientador Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza– 2020

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia-PRODERNA, Belém, 2020.

1. Materiais Compósitos – Comportamento Mecânico – Fractografia. 2. Engenharia de Materiais. 3. Compósitos. 4. Propriedades Mecânicas.

CDD – ed.

"Temos que perceber que a ciência é realmente uma faca de dois gumes. Uma parte da espada poderia reduzir a pobreza, o mal, as doenças e nos trazer mais democracias, mas o outro lado da espada poderia nos dar proliferação nuclear, biogênese e até as forças da escuridão"

Michio Kaku

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus (a Ele toda honra e toda glória) pela sabedoria e saúde a mim concedida para realizar minhas conquistas todos os dias da vida.

Agradeço a todos os meus familiares, em especial a minha Mãe Ana Carmen Gomes, ao meu Pai Manoel das Graças dos Santos e meus irmãos Alessandra das Graças Gomes dos Santos Felício e Adriano Júnior Gomes, os quais eu tenho certeza que são os principais pilares da minha vida.

Agradeço também a todos do PRODERNA, os quais contribuíram de alguma forma, desde o início do desenvolvimento deste trabalho.

Aos Orientadores responsáveis pela elaboração do trabalho teórico, tratamento e análise dos dados, em especial ao Professor Dr. José Antônio da Silva Souza e ao Professor Dr. Deibson da Silva Costa.

Agradeço a Universidade Federal do Pará (UFPA), pela oportunidade de ingresso de estudo a nível superior e todas as perspectivas para a continuação na área acadêmica. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA) por ajudar no desenvolvimento das pesquisas que foram proposta no desenvolvimento do trabalho; a disponibilidade dos equipamentos para o desenvolvimento dos ensaios do Laboratório de Materiais Porosos Sintetizados (LAMPS), da Usina de Materiais (USIMAT) do Laboratório de Engenharia Química (LEQ), do Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM), do Instituto federal do Pará (IFPA) *Campus Belém*, na Universidade Federal do Pará, *Campus Tucuruí* (CAMTUC), do Bosque da UFPA, localizado no Campus Profissional I, do Laboratório de Química, Celulose e Energia- LQCE- ESALQ- USP e do MUSEU EMÍLIO GOELDI, para o desenvolvimento das análises. E a CAPES pelo incentivo financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos alunos do curso de Ciência e Tecnologia, da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua (CAMPANANIN), os quais desenvolveram pesquisas e publicações que ajudaram na valorização do trabalho.

Aos amigos e amigas que sempre estão presente a dar os incentivos necessários para a obtenção de todas metas necessárias para o crescimento como profissional e como pessoa.

Também agradeço a banca composta para avaliação do trabalho por aceitarem o convite.

DEDICATÓRIA

*A toda a minha família, em especial a minha mãe Ana Carmen
Gomes e meu Pai Manoel das Graças dos Santos.*

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFGA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais. (Dr. Eng.)

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO INCORPORADO COM
FIBRAS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) E RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS
PARA UTILIZAÇÃO COMO COMPONENTE ESTRUTURAL PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL**

ALESSANDRO JOSÉ GOMES DOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais

Na indústria vem crescendo a produção de materiais que tragam menos impactos ambientais e que possuam alta sustentabilidade, principalmente no que se diz respeito a fibras vegetais e resíduos industriais. Neste trabalho foram confeccionadas matriz de poliéster insaturada isoftálica plena, compósitos com fibra vegetal de bambu, compósitos com resíduos industriais (lama vermelha, caulim e cobre) e compósitos híbridos com variação na proporção de resíduos e fibras. Os resíduos foram utilizados com granulometria de 100 MESH e as fibras nos comprimentos de 15 mm e 30 mm, dispostas randomicamente dentro da matriz. Estas fibras foram utilizadas *in natura* e tratadas com NaOH a 5% durante o período de 2 (duas) horas. As fibras foram caracterizadas quanto às suas propriedades físicas, mecânicas e morfológicas. Os compósitos foram confeccionados pelo processo manual (*hand lay-up*) na forma de placas retangulares em molde metálico e prensados. Variaram-se as proporções das frações mássicas dos resíduos em 10 %, 20%, 30% e 40%, já a fração mássica de fibras foi variada de 1 %, 2% e 3 %. Para a produção dos compósitos híbridos a variação ocorreu até o nível máximo de saturação da matriz, com a proporção de resíduos/fibras de 10%/3%, 20%/3%, 30%/3% e 40%/3%, respectivamente. As fibras de bambu foram caracterizadas quimicamente por meio de análise dos teores de extrativos, lignina e holocelulose. Já os resíduos foram caracterizados mineralogicamente por meio de Difração de Raios-X (DRX). Os compósitos foram caracterizados fisicamente (porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente), mecanicamente (tração, flexão e impacto), retardância à chama e morfológicamente

por meio de análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para as análises de caracterização física foram produzidos 10 corpos de prova (CP's) para cada série. Já nos ensaios mecânicos foram fabricados para os ensaios de tração 10 CP's, enquanto que para os ensaios de flexão e impacto foram 8 CP's para cada série. Esta mesma quantidade foi utilizada para os testes de retardância de chamas. Após os ensaios físicos foi observado uma pequena variação com adição de fibras e um aumento na Massa Específica Aparente com a adição dos resíduos e das fibras na matriz. Na análise por meio de caracterização mecânica de tração obtiveram-se os melhores resultados de limites de resistência nos valores de 33,05 MPa para compósitos com 3% de fibras de bambu tratadas com 15 mm de comprimento e 33,11 MPa com fibras de bambu com 30mm de comprimento sem tratamento. Já com a incorporação de resíduos chegou ao valor de 40,25 MPa. Nas frações híbridas o valor chegou a 41,07 MPa com adição de 20% de resíduo de caulim/3% de fibras de bambu nos comprimentos de 15mm com tratamento. Já nos ensaios de flexão os resultados foram de 150,94 MPa para a adição de fibras com 30mm tratadas, de 140,34 MPa para adição de 20% de resíduo de caulim e nos híbridos de 137,27 MPa para a adição de 30% de resíduo de caulim/3% de fibras de bambu com 30mm tratadas. Nos ensaios de impacto os melhores resultados foram de 23,02 kJ/m² para adição de 10% do resíduo de cobre e de 38,56 kJ/m² para a adição de 20% de resíduo de cobre/3% de fibras de bambu com 30 mm de comprimento tratadas.

Palavras-chave: Impactos ambientais; Recursos Naturais; Caracterização; Propriedades

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

**COMPOSITE MATERIAL INCORPORATED WITH BAMBOO (*Bambusa Vulgaris*)
FIBERS AND SOLID INDUSTRIAL WASTE FOR USE AS A STRUCTURAL
COMPONENT FOR CIVIL CONSTRUCTION**

Alessandro José Gomes dos Santos

Advisor: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Concentration area: Manufacturing process

In the industry, the production of materials that bring less environmental impacts and that have high sustainability has been growing, mainly with regard to vegetable fibers and industrial waste. In this work, full isophthalic unsaturated polyester matrix, composites with bamboo vegetable fiber, composites with industrial residues (red mud, kaolin and copper) and hybrid composites with variation in the proportion of residues and fibers were made. The residues were used with granulometry of 100 MESH and the fibers in the lengths of 15 mm and 30 mm, randomly arranged within the matrix. These fibers were used in natura and treated with 5% NaOH during the period of 2 (two) hours. The fibers were characterized in terms of their physical, mechanical and morphological properties. The composites were made by hand (hand lay-up) in the form of rectangular plates in metallic mold and pressed. The proportions of the mass fractions of the residues varied by 10%, 20%, 30% and 40%, whereas the mass fraction of fibers was varied by 1%, 2% and 3%. For the production of hybrid composites, the variation occurred up to the maximum saturation level of the matrix, with the proportion of residues / fibers of 10% / 3%, 20% / 3%, 30% / 3% and 40% / 3%, respectively. Bamboo fibers were chemically characterized by analyzing the levels of extractives, lignin and holocellulose. The residues were characterized mineralogically by means of X-Ray Diffraction (XRD). The composites were characterized physically (apparent porosity, water absorption and apparent specific mass), mechanically (traction, flexion and impact), flame retardancy and morphologically through Scanning Electron Microscopy

(SEM) analysis. For physical characterization analyzes, 10 specimens (CP's) were produced for each series. In the mechanical tests, 10 CP's were manufactured for the tensile tests, while for the flexion and impact tests, there were 8 CP's for each series. This same amount was used for the flame retardancy tests. After the physical tests, a small variation was observed with the addition of fibers and an increase in the Apparent Specific Mass with the addition of residues and fibers in the matrix. In the analysis by means of mechanical traction characterization, the best results of resistance limits in the values of 33.05 MPa were obtained for composites with 3% bamboo fibers treated with 15 mm in length and 33.11 MPa with bamboo fibers 30mm long without treatment. With the incorporation of waste, it reached a value of 40.25 MPa. In hybrid fractions the value reached 41.07 MPa with the addition of 20% kaolin residue / 3% bamboo fibers in the 15mm lengths with treatment. In flexion tests, the results were 150.94 MPa for the addition of treated 30mm fibers, 140.34 MPa for the addition of 20% kaolin residue and in the hybrids of 137.27 MPa for the addition of 30% kaolin residue / 3% bamboo fibers with 30mm treated. In the impact tests, the best results were 23.02 kJ / m² for the addition of 10% copper residue and 38.56 kJ / m² for the addition of 20% copper residue / 3% bamboo fibers with 30 mm long treated.

Keywords: Environmental impacts; Natural resources; Description; Properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação dos compósitos.....	31
Figura 2.2 – Cadeia Poliéster Isoftálica.....	33
Figura 2.3 - Classificação de algumas das fibras naturais mais comuns.....	34
Figura 2.4 - (a) estrutura interna de uma fibra natural elementar. (b) Hierarquia de organização das fibras naturais.....	36
Figura 2.5 - Esquema do colmo de bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>)	38
Figura 2.6 – Efeito da fração volumétrica no limite de escoamento do compósito reforçado com fibras curtas de bambu.....	40
Figura 2.7 – Principais formas de partículas: a) esféricas; b) granulares; c) lamelares; d) fibrilares ou aciculares.....	41
Figura 2.8 - Depósito de resíduo sólido (DRS) da Alunorte Barcarena – PA em 2019.....	43
Figura 2.9 – Amostragem de caulim.....	44
Figura 2.10 – (a) Fibras de bambu dispostas paralelas entre si e perpendicular a superfície da fratura e (b) mecanismo de trincas primárias e secundárias.....	50
Figura 2.11 – Diagrama esquemático do efeito de ancoramento da trinca.....	51
Figura 2.12 - Micrografia da superfície fraturada do compósito matriz poliuretano reforçada por fibras curtas de banana. (a) presença de <i>pull out</i> e (b) descolamento fibra/matriz.....	51
Figura 2.13 – Micrografia da superfície fraturada do compósito matriz polietileno reforçada por fibras curtas de sisal de 20 mm. (a) presença de <i>pull out</i> e (b) partículas de cortiça.....	52
Figura 2.14 - Micrografias (a) imagem ampliação 500µm para material compósito juta/epóxi e (b) imagem ampliação 1 mm para material compósito juta/epóxi.....	52
Figura 2.15 – Aparato para o ensaio da norma ASTM D635-10 visto de frente.....	53
Figura 3.1 – Equipamentos utilizados.....	55
Figura 3.2 - Resíduos utilizados no trabalho.....	57
Figura 3.3 – Fibras de bambu dispostas.....	57
Figura 3.4 – Fluxograma de caracterização das placas de materiais compósitos.....	59
Figura 3.5 – Equipamento de DRX. Raio-X da Bruker. Modelo: D8 Advance, com câmara de temperatura ($T > 77\text{ K}$)	60
Figura 3.6 – Destaque da secção do colmo de Bambu a ser analisado anatomicamente.....	61
Figura 3.7 – (a) Fibras de bambu lavado (b) Fibras de bambu moído.....	62

Figura 3.8 – (a) Fibras de bambu pesadas (b) Envelopes de amostras (c) Extrator de tolueno (d) Extrator de álcool (e) Extrator de água.....	62
Figura 3.9 – (a) fibras hidrolisadas com H ₂ SO ₄ (b) Amostra para o banho Maria (c) Lavagem (d) Espectrofotômetro (e) Resíduo da filtragem.....	63
Figura 3.10– corpos de prova produzidos para caracterização física.....	64
Figura 3.11 – Amostragem do ensaio físico dos compósitos.....	66
Figura 3.12 – Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de tração.....	66
Figura 3.13 - Máquina universal de ensaio, utilizada para os ensaios de tração dos compósitos produzidos.....	67
Figura 3.14 – Esquemático das dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de flexão	68
Figura 3.15 – Máquina para o ensaio de flexão.....	69
Figura 3.16 – Esquemático, em mm, dos corpos de prova para ensaios de impacto.....	69
Figura 3.17 –Máquina de ensaio de resistência ao impacto.....	70
Figura 3.18 – Corpos de prova produzidos.....	71
Figura 3.19 – ASTM D635-10 (a) Dimensões (em mm) dos corpos de prova, (b) aparato utilizado para realização dos ensaios e (c) corpos de prova sendo ensaiados.....	71
Figura 3.20- (a) Microscópio Eletrônico de Varredura do IFPA e (b) do LEQ – UFPA (b) .	72
Figura 4.1 - Difração de Raios – X do resíduo de cobre.....	73
Figura 4.2 - Difração de Raios – X da lama vermelha.....	74
Figura 4.3 - Difração de Raios – X do resíduo de Caulim.....	75
Figura 4.4: Seção transversal do colmo de Bambusa vulgaris Schard. ex J, C. Wendl. (Poaceae). A - Vista geral; B - Região contendo epiderme; C - Detalhe dos feixes de fibras e tecidos vasculares.....	75
Figura 4.5 - Maceração do colmo de Bambusa vulgaris Schard. ex J, C. Wendl. (Poaceae)...	76
Figura 4.6 - AA e PA versus proporções de compósitos com reforço de fibras de bambu...	79
Figura 4.7 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com reforço de fibras de bambu.....	79
Figura 4.8 - Gráfico AA e PA versus proporções de compósitos com incorporação de resíduos de cobre.....	81
Figura 4.9 - Gráfico MEA versus Proporções de compósitos com incorporação de resíduo de cobre.....	81

Figura 4.10 - Gráfico AA e PA versus proporções de compósitos com resíduos de cobre e fibras de bambu.....	83
Figura 4.11 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com resíduos de cobre e fibras de bambu.....	84
Figura 4.12 - Gráfico AA e PA com proporções de compósitos com incorporação de Lama Vermelha.....	85
Figura 4.13 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com inserção de lama vermelha.....	85
Figura 4.14 - Gráfico AA e PA com proporções de compósitos com incorporação de Lama Vermelha e fibras de bambu.....	87
Figura 4.15 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com inserção de lama vermelha.....	87
Figura 4.16 - Gráfico AA e PA com proporções de compósitos com incorporação de Resíduo de Caulim.....	88
Figura 4.17 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com inserção de Resíduo de Caulim.....	89
Figura 4.18 - Gráfico AA e PA com proporções de compósitos com incorporação de Resíduo de Caulim e fibras de bambu.....	90
Figura 4.19 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com inserção de Resíduo de Caulim e as fibras de bambu.....	91
Figura 4.20 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 15 mm não tratadas.....	93
Figura 4.21- Microscopia eletrônica de varredura: compósito com fibras de bambu 15 mm não tratadas: (a) 1 FB e (b) 3 FB.....	93
Figura 4.22 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 15 mm tratadas.....	95
Figura 4.23 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 15 mm tratada: (a) 1 FB e (b) 3 FB.....	96
Figura 4.24 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 30 mm não tratadas.....	98
Figura 4.25 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratada: (a) 3 FB e (b) 1 FB.....	98

Figura 4.26 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 30 mm tratadas.....	100
Figura 4.27 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas: (a) 1 FB e (b) 3 FB.....	101
Figura 4.28 - Comportamento de resistência à tração material compósito em função dos resíduos de cobre.....	103
Figura 4.29 - Microscopia eletrônica de varredura: Compósito com inserção de resíduos de cobre.....	104
Figura 4.30 - 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.....	106
Figura 4.31 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 15 mm não tratado: (a) 20RCU/3FB15NT e (b) 10RCU/3FB15NT.....	107
Figura 4.32 - 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 TR.....	109
Figura 4.33 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 15 mm tratada: (a) 10RCU/3FB15TR e (b) 20RCU/3FB15TR.....	110
Figura 4.34 - 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.....	112
Figura 4.35 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 30 mm não tratada: (a) 30RCU/3FB30NT e (b) 20RCU/3FB30NT.....	106
Figura 4.36 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de 30 mm tratadas.....	115
Figura 4.37 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 30 mm tratada: (a) 10RCU/3FB30TR e (b) 20RCU/3FB30TR.....	116
Figura 4.38 - Comparação da resistência mecânica dos compósitos LV.....	118
Figura 4.39 – Análise microscópica dos compósitos incorporados com lama vermelha	118
Figura 4.40 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos com Lama Vermelha e fibras 15mm não tratadas.....	121
Figura 4.41 – Análise microscópica dos compósitos híbridos com LV/3FB15NT.....	121
Figura 4.42 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos com lama vermelha e de 15 mm tratadas.....	123

Figura 4.43 – Análise microscópica dos compósitos híbridos com LV/3FB15TR.....	124
Figura 4.44 - Comportamento de resistência mecânica dos compósitos híbridos LV/3FB30NT.....	125
Figura 4.45– Microscopia eletrônica de varredura de LV/3FB30NT: (a) LV10/3FB30NT, (b) LV30/3FB30NT.....	126
Figura 4.46 - Comportamento de resistência mecânica dos compósitos híbridos LV/3FB30TR.....	128
Figura 4.47 – Microscopia eletrônica de varredura de LV/3FB30TR: (a) LV10/3FB30TR, (b) LV30/3FB30T.....	128
Figura 4.48 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos reforçados com resíduo de caulim: (a) RCA30 e (b) RCA40.....	131
Figura 4.49 – Comportamento de resistência à tração dos compósitos em função das frações de resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm com e sem tratamento.....	133
Figura 4.50 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos com resíduo de caulim e com fibra de bambu 15 mm: Tratadas (a) RCA10/3FB15TR e (b) RCA30/3FB15TR; não tratadas (c) RCA10/3FB15NT e (d) RCA20/3FB15NT.....	134
Figura 4.51 – Comportamento de resistência à tração de material compósito híbrido em função da proporção RCA/FB30mmNT.....	136
Figura 4.52 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos poliméricos com adição de resíduo e fibras de bambu 30 mm sem tratamento.....	137
Figura 4.53 – Comportamento mecânico a tração dos compósitos com adição de resíduos de caulim e fibras de bambu de 30 mm com tratamento.....	138
Figura 4.54 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos após os ensaios de tração com adição do resíduo de caulim e das fibras de bambu de 30 mm com tratamento.....	139
Figura 4.55-Gráfico dos resultados através do ensaio de flexão MP+FB15 mm.....	140
Figura 4.56 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com fibras de bambu de 15mm sem tratamento.....	141
Figura 4.57 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão MP+FB 30 mm...142	142
Figura 4.58 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com fibras de bambu de 30mm com tratamento.....	143
Figura 4.59 – Comportamento dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos resíduos na matriz polimérica.....	145
Figura 4.60 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com os resíduos.....	145

Figura 4.61 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão com resíduos de cobre e as fibras de bambu.....	147
Figura 4.62 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com os resíduos de cobre e as fibras de bambu.....	148
Figura 4.63 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão com lama vermelha e as fibras de bambu.....	150
Figura 4.64 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com lama vermelha e as fibras de bambu.....	151
Figura 4.65 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão com resíduos de caulim e as fibras de bambu.....	153
Figura 4.66 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com os resíduos de caulim e as fibras de bambu.....	154
Figura 4.67 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição do resíduo industrial de cobre.....	155
Figura 4.68 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com os resíduos de cobre.....	156
Figura 4.69 - Gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição da lama vermelha.....	157
Figura 4.70 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com lama vermelha.....	157
Figura 4.71 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição do resíduo industrial de Caulim.....	159
Figura 4.72-MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com os resíduos de caulim.....	159
Figura 4.73 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição do resíduo industrial de Cobre e as fibras de bambu.....	161
Figura 4.74 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com os resíduos de cobre e as fibras de bambu.....	161
Figura 4.75 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição de lama vermelha e as fibras de bambu.....	163
Figura 4.76 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com lama vermelha e as fibras de bambu.....	163
Figura 4.77 – Gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição do resíduo industrial de Caulim e fibras de bambu.....	165
Figura 4.78 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com os resíduos de caulim e as fibras de bambu.....	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - composição e propriedades das fibras naturais disponíveis.....	37
Tabela 2.2 - Composição química do rejeito do beneficiamento do cobre.....	46
Tabela 3.1 - Característica da resina isoftálica insaturada.....	56
Tabela 4.1 - Teores químicos das fibras de bambu.....	77
Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com as fibras de bambu.....	78
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com resíduos de cobre.....	80
Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com resíduo de cobre e fibras de bambu.....	82
Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA de LV.....	84
Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com LV e fibras de bambu.....	86
Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA de RCA.....	88
Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com Resíduo de Caulim a fibras de bambu.....	90
Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibras de bambu 15 mm sem tratamento.....	92
Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibras de bambu 15 mm com tratamento.....	94
Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibras de bambu 30 mm sem tratamento.....	97
Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de tração de compósitos inserção de fibras de bambu 30 mm com tratamento.....	99
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre.....	102
Tabela 4.14 - 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.....	105
Tabela 4.15 - 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.....	108
Tabela 4.16 - 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.....	111
Tabela 4.17 - 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.....	114
Tabela 4.18 – Resistência mecânica dos compósitos com LV.....	117

Tabela 4.19 – Comportamento de resistência dos compósitos híbridos com inserção de fibras de bambu 15 mm sem tratamento.....	119
Tabela 4.20 – Resultado dos ensaios de tração realizados no material compósito híbrido com lama vermelha e fibras de 15mm tratadas.....	122
Tabela 4.21 - Resistência mecânica de tração dos compósitos híbridos LV/3FB30NT.....	125
Tabela 4.22 - Resistência mecânica de tração dos compósitos híbridos LV/3FB30TR.....	127
Tabela 4.23 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos poliméricos reforçados com resíduo de caulim.....	129
Tabela 4.24 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos híbridos com resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm não tratadas.....	131
Tabela 4.25 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos com resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm tratadas.....	132
Tabela 4.26 - Resultados do ensaio de tração de compósitos com Inserção de Resíduo de Caulim e Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm NT.....	136
Tabela 4.27 - Resultados do ensaio de tração de compósitos com Inserção de Resíduo de Caulim e Fibras de Bambu de 30 mm com tratamento.....	138
Tabela 4.28 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão MP +FB15mm.....	140
Tabela 4.29 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão MP + FB30mm.....	142
Tabela 4.30 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão dos resíduos.....	144
Tabela 4.31 – Resultados do ensaio de flexão dos resíduos de cobre e as fibras de bambu.....	146
Tabela 4.32 – Resultados do ensaio de flexão da lama vermelha e as fibras de bambu.....	149
Tabela 4.33 – Resultados do ensaio de flexão dos resíduos de caulim e as fibras de bambu.....	152
Tabela 4.34 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + resíduo de cobre...154	154
Tabela 4.35 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Lama Vermelha.....	156
Tabela 4.36 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Resíduo de Caulim.....	158
Tabela 4.37 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Resíduo de Cobre e fibras de Bambu.....	160
Tabela 4.38 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Lama Vermelha e fibras de Bambu.....	162
Tabela 4.39 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Resíduo de Caulim e fibras de Bambu.....	164
Tabela 4.40 – Resultados do ensaio de Flamabilidade horizontal dos compósitos.....	166

NOMENCLATURAS

10RCU/3FB15NT	10% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
20RCU/3FB15NT	20% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
30RCU/3FB15NT	30% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
40RCU/3FB15NT	40% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
10RCU/3FB15TR	10% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
20RCU/3FB15TR	20% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
30RCU/3FB15TR	30% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
40RCU/3FB15TR	40% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
10RCU/3FB30NT	10% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
20RCU/3FB30NT	20% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
30RCU/3FB30NT	30% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
40RCU/3FB30NT	40% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
10RCU/3FB30TR	10% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
20RCU/3FB30TR	20% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
30RCU/3FB30TR	30% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
40RCU/3FB30TR	40% Resíduo de Cobre e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
AA	Absorção de Água
ASTM	American Society Testing Materials
BD	Bulk Density (g/cm ³)
CA	Caulim
CAMTUC	Campus Tucuruí
CMP	Compósitos de Matriz Polimérica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CoNap	Naftenato de Cobalto
CP	Corpos de Prova
DMA	Dimetilanilina
DP	Desvio Padrão
DRX	Difração de Raios-X
FB	Fibras de Bambu
FBNT	Fibras de bambu não tratadas
3FB15NT	3% Fibras de bambu de 15mm não tratadas
3FB30NT	3% Fibras de bambu de 30mm não tratadas

FBTR	Fibras de bambu tratadas
3FB15TR	3% Fibras de bambu de 15mm tratadas
3FB30TR	3% Fibras de bambu de 30mm tratadas
FM	Fração Mássica (%)
HB	Horizontal Burning
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICDD	International Center for Diffraction Data
IGE	Instituto de Geociências e Engenharias
IRCC	Imerys Rio Capim Caulim
ISO	International Organization for Standardization
LABEM	Laboratório de Engenharia Mecânica
LABMEV	Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
LRT	Limite de Resistência à Tração
LV	Lama Vermelha
LV10/3FB15NT	10% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
LV20/3FB15NT	20% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
LV30/3FB15NT	30% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
LV40/3FB15NT	40% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
LV10/3FB30NT	10% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
LV20/3FB30NT	20% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
LV30/3FB30NT	30% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
LV40/3FB30NT	40% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
LV10/3FB15TR	10% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
LV20/3FB15TR	20% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
LV30/3FB15TR	30% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
LV40/3FB15TR	40% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
LV10/3FB30TR	10% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
LV20/3FB30TR	20% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
LV30/3FB30TR	30% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
LV40/3FB30TR	40% Lama Vermelha e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
MEA	Massa Específica Aparente
MEK	Metil Etil Cetona

MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MP	Matriz Plena
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PA	Porosidade Aparente
PDF	Powder Diffraction File
PP	Polipropileno
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPSA	Empresa Brasileira de Administração de Petróleo e Gás Natural
PRFC	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
PRODENA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais
RCA10/3FB15NT	10% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
RCA20/3FB15NT	20% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
RCA30/3FB15NT	30% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
RCA40/3FB15NT	40% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 15mm não tratadas
RCA10/3FB30NT	10% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
RCA20/3FB30NT	20% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
RCA30/3FB30NT	30% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
RCA40/3FB30NT	40% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 30mm não tratadas
RCA10/3FB15TR	10% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
RCA20/3FB15TR	20% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
RCA30/3FB15TR	30% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
RCA40/3FB15TR	40% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 15mm tratadas
RCA10/3FB30TR	10% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
RCA20/3FB30TR	20% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
RCA30/3FB30TR	30% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
RCA40/3FB30TR	40% Resíduo de Caulim e 3% de fibras de bambu de 30mm tratadas
R-RIM	Reinforced RIM
RTM	Resin Transfer Molding
UL	Underwriters Laboratories

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1 – ASPESTOS GERAIS	255
1.2 - JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	266
1.3 – OBJETIVOS: GERAL E ESPECÍFICOS	277
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	299
2.1 – COMPÓSITOS	299
2.1.1 - Classificação dos Materiais Compósitos	30
2.2 - MATRIZES.....	31
2.2.1 - Matrizes Poliméricas	322
2.2.2 - Resina Poliéster Insaturada Isoftálica	322
2.3 – FIBRAS	344
2.3.1 - Fibras Naturais.....	344
2.3.2 - Fibras Vegetais	377
2.3.2.1 – Fibras de Bambu (<i>Bambusa Vulgaris</i>)	38
2.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS	399
2.4.1 - Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Bambu	399
2.5 – PARTÍCULAS MINERAIS	411
2.5.1 - Lama vermelha	42
2.5.2 – Resíduo de caulim.....	433
2.5.3 – Resíduo de cobre.....	455
2.6 - DIFRAÇÃO DE RAIOS – X (DRX).....	46
2.7 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS FIBRAS NATURAIS DE BAMBU.....	47
2.8 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS COM REFORÇO DE FIBRAS NATURAIS.....	47
2.8- FRACTOGRAFIA	499
2.9 - FRATURA EM POLÍMEROS E COMPÓSITOS	4950
2.10 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CHAMA EM MATERIAIS COMPÓSITOS.....	53
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	555
3.1 – MATERIAIS	555
3.1.1 - Equipamentos e Materiais Sintéticos	555
3.1.2 - Resíduos Industriais - Lama Vermelha, Caulim e Cobre	566

3.1.3 - Fibras Naturais de bambu	577
3.2 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	588
3.2.1- Processo de Confecção dos Compósitos	588
3.2.2 - Caracterização dos Resíduos dos Industrias de Lama Vermelha, Caulim e Cobre.....	599
3.2.3 - Caracterização morfológica e anatômica do colmo do Bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>).....	60
3.2.4 - Caracterização química das Fibras Naturais de Bambu	61
3.2.5 - Caracterização Física dos Compósitos Confeccionados.....	64
3.2.5.1 - Ensaio de Porosidade Aparente (PA), Absorção de Água (AA) e Massa Específica Aparente (MEA).....	64
3.2.6 - Caracterização Mecânica dos Compósitos Confeccionados.....	666
3.2.6.1 - Ensaio de Resistência à Tração.....	66
3.2.6.2 - Ensaio de Resistência à Flexão.....	67
3.2.6.3 - Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy.....	69
3.2.7 – Confecção dos Compósitos.....	70
3.2.8 - Ensaio de Resistência à Chama	7171
3.2.8.1 - Norma ASTM D635-10.....	71
3.2.9 - Caracterização Morfológica dos Compósitos Confeccionados	72
3.2.9.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura - (MEV).....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS	73
4.1.1 - Caracterização Mineralógica	73
4.1.1.1 - Difração de Raios-X (DRX).....	73
4.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E ANATÔMICA DO COLMO DO BAMBU..	75
4.3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS FIBRAS NATURAIS	766
4.4 - CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS.....	777
4.4.1 - Caracterização Física.....	777
4.4.1.1 - Ensaio de Porosidade Aparente (PA), Absorção de Água (AA) e Massa Específica Aparente (MEA).....	77
4.4.2 - Caracterização Mecânica	91
4.4.2.1 - Ensaio de Resistência à Tração.....	91
4.4.2.2 - Ensaio de Resistência à Flexão.....	139
4.4.2.3 - Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy.....	154

4.4.3 - Caracterização de Flamabilidade.....	1666
4.4.3.1 - Ensaio de Resistência à Chama.....	166
4.4.3.1.1 - Norma ASTM D635-10.....	166
5. CONCLUSÕES	1677
6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	1699
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	170

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 – ASPESTOS GERAIS

A variedade de matérias-primas disponíveis aumentou consideravelmente a possibilidade de obtenção de novos materiais. Houve então a necessidade de conseguir materiais que atendessem a uma quantidade maior de características, surgindo assim, a ideia de unir dois ou mais materiais, visando obter um novo material com propriedades não exibidas em seus componentes, onde é possível destacar as ligas metálicas e os produtos químicos como exemplos desse conceito. Entretanto, a ideia principal é manter cada componente com suas características originais, gerando os materiais denominados compósitos (Aquino, D`Almeida e Monteiro, 2005).

As variadas e melhores propriedades dos compósitos permitem vislumbrar um grande potencial de aplicação, visto que tais propriedades possibilitam que o compósito seja adequado às necessidades de cada projeto. Além disso, a fabricação dos compósitos vegetais também permite utilizar os resíduos gerados pelas agroindústrias da fibra vegetal como fonte de matéria-prima para a fabricação de novos produtos (CALLISTER, 2018; CROCKER, 2008; EICHHORN *et al*, 2001).

Diversos setores industriais têm buscado mitigar os impactos ambientais decorrentes dos processos produtivos, bem como do uso dos produtos fabricados e seu descarte. Dentre estes setores, o automotivo, frequentemente enfatizado como vilão em efeitos como o aquecimento global, tem se destacado na busca de alternativas ambientalmente viáveis (RODRIGUES, 2014).

A cadeia produtiva de materiais empregados na fabricação de veículos é mais prejudicial ao meio ambiente do que a fumaça expelida pelos escapamentos. Há emissões da indústria petroquímica, de processamento de plástico e de manufatura (CASAS, 2010). Dentro desta lógica, governos buscam alternativas, ora com políticas públicas, ora com incentivos a diversidade da produção. No Brasil, o carro flex (Etanol, Gasolina e Gás) domina o mercado. Em outras partes do planeta, a exemplo, de Estados Unidos, Canadá, Japão, China, França, Alemanha, Israel e Austrália o governo e a iniciativa privada trabalham juntos para desenvolver carros elétricos eficientes (COSTA, 2010).

O potencial de compósitos poliméricos reforçados com fibras era reconhecido mais de 50 anos atrás, mas somente agora eles podem encontrar suas aplicações em quase todos os setores, incluindo construção, aeroespacial, automotiva e eletrônica. Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados para aplicações dielétricas, isto é, as aplicações que fazem uso do comportamento eletricamente isolante ou semi-isolante (DHAL e MISHRA, 2013).

Joshi *et al* (2004), avaliaram o ciclo de vida de compósitos com diferentes fibras naturais em relação a um compósito com fibras de vidro e chegaram a conclusão que em relação aos aspectos ambientais, os compósitos com fibras naturais são ambientalmente superiores. Estes apresentam menor impacto durante a produção, menor peso quando utilizados em veículos de transporte aumentando a eficiência energética. O fato de se necessitar uma maior quantidade de fibras naturais para se obter o mesmo desempenho que as fibras de vidro pode ser relacionado à redução da poluição associada à quantidade de polímero. No final do ciclo de vida o material pode ser incinerado fornecendo energia e créditos de carbono.

Há um aumento significativo nos estudos das propriedades mecânicas de materiais compósitos, que vêm ganhando seus espaços dentro deste mercado cada vez mais exigente. Isto é uma realidade para setores que necessitam de novos materiais como para aplicações aeroespaciais, subaquáticas e de transporte. Por exemplo, engenheiros aeronáuticos estão cada vez mais em busca de materiais estruturais que tenham baixas densidades, sejam fortes, rígidos e resistentes à abrasão e ao impacto, e não sejam facilmente corroídos (CALLISTER, 2018).

1.2 - JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Em diversos estudos gerados nota-se que existe uma diversidade de materiais que podem ser desenvolvidos em matriz polimérica, com reforço ou com carga em compósitos. Principalmente no momento atual que atravessa a indústria, que procura sempre inovar na produção com o desenvolvimento de novos materiais que venham trazer benefícios econômicos, assim como também, reduzirem os impactos ambientais gerados por aqueles já existentes. As propriedades conferidas por esses produtos são específicas para a situação a qual se aplicam.

É importante destacar que as legislações ambientais se tornam cada vez mais exigentes, com uma preocupação em relação a essas questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável. É pensando nisso que deve haver uma mudança na forma e no desenvolvimento até então empregados e também a adoção de programas ou sistemas de gerenciamento que

atingam e demonstrem um desempenho ambiental adequado, controlando os impactos das atividades industriais, produtos e serviços no meio ambiente. (MORO *et. al.*, 2016)

A utilização de fibras naturais e resíduos industriais tem uma particular importância no processo de desenvolvimento de produtos, já que apresentam boas propriedades mecânicas, são obtidos com custo relativamente baixo, têm uma massa específica reduzida, estão em abundância na região norte do Brasil e são consideradas de fontes renováveis.

A utilização de fibras de origem vegetal no reforço de matrizes poliméricas tem aumentado significativamente nas últimas décadas, competindo particularmente com as fibras de vidro, em certas aplicações. A indústria automotiva é atualmente a principal impulsionadora na investigação e uso destes novos materiais. Quando comparadas com as fibras de vidro, as fibras vegetais para além de reduzirem o peso e o custo dos componentes, oferecerem maior segurança nas colisões, apresentam melhores propriedades de isolamento acústico e térmico, provocam menor desgaste nas ferramentas de fabricação, são renováveis e de fácil reciclagem (ROMÃO, 2003).

Outro ponto importante do desenvolvimento deste trabalho está relacionado com a utilização dos resíduos industriais. Estes que geram importantes benefícios quando relacionados a reutilização dentro de campos aplicáveis de estudo académico e consequentemente na indústria de aproveitamento desses novos produtos.

O ineditismo do trabalho está relacionado com a produção de compósitos poliméricos com a adição dos resíduos industriais e das fibras de bambu, sem e com tratamento químico, gerando produtos com particularidades técnicas para a indústria de transformação de materiais, aliadas a diversidades de caracterizações realizadas.

1.3 – OBJETIVOS: GERAL E ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivo geral a produção e avaliação das propriedades de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras de bambu, compósitos com inserção de resíduos industriais e compósitos híbridos com a combinação de fibras de bambu e resíduos

Têm-se como objetivos específicos:

- Analisar a morfologia e anatomia do colmo de bambu (*bambusa vulgaris*);
- Analisar os principais constituintes relacionados às fibras de bambu utilizadas;
- Levantar os principais elementos que constituem os resíduos industriais de cobre caulim e lama vermelha;
- Realizar as caracterizações: mineralógica (difração de raios-X),

- Executar o balanceamento das propriedades físicas (porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente) dos compósitos;
- Realizar o estudo das caracterizações mecânicas por meio de tração, flexão e impacto;
- Realizar a medição de retardância à chama;
- Analisar a morfologia dos compósitos poliméricos na forma de corpos de prova de acordo com a norma a ser utilizada, conforme pesquisado na literatura científica;
- Efetuar uma avaliação da correlação microestrutura / propriedades adquiridas após a fabricação dos compósitos.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – COMPÓSITOS

O grande desenvolvimento da tecnologia dos materiais proporcionou ao homem criar e produzir equipamentos e máquinas cada vez mais sofisticados e que melhor satisfaçam as necessidades humanas. Junto a este avanço tecnológico, surge a necessidade de materiais que atendam satisfatoriamente estas novas exigências da engenharia. Segundo Faria (2007), a matéria prima tradicionalmente empregada (materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos) ainda possui grande aplicabilidade, porém, vem sendo continuamente substituída por materiais compósitos.

A classe de materiais compósitos é bastante ampla e abrangente, compreendendo desde os polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos metal/compósito e os concretos estruturais, e outros compósitos que incorporam matriz metálica ou matriz cerâmica. Portanto, a característica básica dos compósitos é combinar, a nível macroscópico, pelo menos duas fases distintas denominadas matriz e reforço (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

Os materiais compósitos podem combinar propriedades incomuns, que não podem ser individualmente atendidas com as tradicionais ligas metálicas, materiais poliméricos e cerâmicos existentes. Um material compósito é formado pela combinação de dois ou mais microconstituintes ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros (CALLISTER, 2018).

Um compósito é constituído por um reforço e uma matriz. O reforço, de elevada resistência e rigidez, é impregnado pela matriz, o que mantém as fibras na sua posição geométrica e transmite tensão através do componente, garantindo ao mesmo tempo a resistência química. Os materiais compósitos são usados em uma ampla gama de aplicações dos setores automotivo, aeronáutico e esportivo e para a construção e arquitetura. Existem diferentes processos de fabricação, dependendo do tipo de aplicação, a taxa de produção e tamanho dos componentes (RAGONDET, 2005).

As propriedades dos compósitos reforçados por fibras estão diretamente associadas às propriedades dos elementos constituintes dos materiais, tais como propriedades da fibra e da matriz, concentração ou frações volumétricas, interface e adesão fibra/matriz, disposição das camadas e orientação, bem como pela geometria do filamento, como forma e tamanho. Os

compósitos podem ser formados por elementos de reforço particulados ou fibrosos. Os reforços particulados podem ser esféricos, cúbicos, tetragonais ou de qualquer outra forma regular ou irregular, mas quase sempre equiaxiais. Já os reforços fibrosos têm a fibra como elemento de reforço, a qual apresenta como característica o fato de possuir um comprimento muito maior que as dimensões da seção transversal (MARINUCCI, 2011).

Outro fator determinante no desempenho de um compósito frente aos mais diversos tipos de solicitações são as frações volumétricas de fibra (V_f), matriz (V_m) e vazios (V_v). Estes parâmetros são usados para quantificar os volumes percentuais de cada componente (fibras, matriz e vazios, respectivamente), em relação ao volume total do compósito. Os valores de V_f e V_m em qualquer tipo de compósito são determinados pelo processo de fabricação adotado (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

2.1.1 - Classificação dos Materiais Compósitos

Em função dos tipos e arranjos dos reforços existentes, os compósitos podem ser classificados em duas grandes áreas: os de reforço particulado e os de reforço fibroso. Caso o reforço seja na forma de fibras, pode-se dispô-las em feixes paralelos entre si, de modo a formar e orientar o reforço em multidireções, multicamadas ou na forma de camadas isoladas ou lâminas. Os compósitos com camadas isoladas podem ser subdivididos em compósitos com fibras contínuas ou fibras curtas (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

Embora possuam propriedades mecânicas inferiores quando comparados aos compósitos com fibras contínuas, os compósitos com fibras descontínuas oferecem maior facilidade de processamento a um menor custo. Nos compósitos com fibras descontínuas o carregamento na fibra é função de seu comprimento e geralmente segue a distribuição de Weibull. Os extremos das fibras são geralmente pontos concentradores de tensões, que induzem tensões cisalhantes na interface (SILVA, 2003).

A busca pelo interesse dos materiais compósitos está ligada a dois fatores: econômico e desempenho. O fator econômico vem do fato do material compósito ser muito mais leve que os materiais metálicos, o que implica numa economia de combustível e consequentemente, num aumento da carga útil (aeronáutica e aeroespacial). A redução na massa total do produto pode chegar a 30 % ou mais, em função da aplicação dada ao material compósito. O fator performance está ligado a procura por um melhor desempenho de componentes estruturais, sobretudo no que diz respeito às características mecânicas (resistência a ruptura, resistência à ambientes agressivos, etc.). A leveza juntamente com as excelentes características mecânicas

faz com que os materiais compósitos sejam cada vez mais utilizados dentro de atividades esportivas (PEREIRA, 2000).

Os materiais compósitos podem ser de ocorrência natural (osso, madeira, etc.) ou sintética (feitos pelo homem). Quando se deseja projetar um material compósito, o foco principal é atingir propriedades que não existem em nenhum outro material isolado (CALLISTER Jr., 2018). Na figura 2.1, mostra-se uma classificação comum de compósitos e suas subdivisões.



Figura 2.1 – Classificação dos compósitos.

Fonte: (CALLISTER JR., 2018).

A configuração de um material compósito contempla a transferência de carga aos componentes mais resistentes, conhecidos como reforços, os quais, frequentemente, estão dispersos em uma matriz, menos resistente, que os envolve. O formato e as características químicas desses componentes (matriz e reforços) são diferentes, mesmo após o processamento, apresentando uma interface bem definida (FERRANTE, 2002).

2.2 - MATRIZES

De acordo com ALMEIDA (2012), define-se matriz como sendo a fase contínua de um compósito e é um constituinte essencial onde tem como objetivos principais: manter a coesão das fibras ou cargas, proteger as fibras/cargas do meio envolvente, resguardar as fibras/cargas do dano durante o seu manuseio, proporcionar a distribuição do carregamento pelas fibras e redistribuir o carregamento pelas fibras resistentes em caso de fissura. Um metal, um polímero, um cerâmico ou um cimento podem representar essa fase (ALMEIDA, 2012).

As matrizes classificam-se como sendo: orgânicas (poliméricas), metálicas e cerâmicas. As matrizes poliméricas são as mais utilizadas devido à versatilidade de formulação e possuírem baixo custo de processamento, quando em comparação com outras matrizes (VINCENZINE, 1995).

2.2.1 - Matrizes Poliméricas

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).

2.2.2 - Resina Poliéster Insaturada Isoftálica

As resinas poliésteres têm a característica de um fluido viscoso, o qual se modifica em sólido rígido através de um processo de reação química exotérmica de polimerização ou cura. No início da reação é necessário que as duplas ligações (insaturações) sejam rompidas para que as interligações ocorram. Esse problema pode ser resolvido pelo aquecimento da resina, pela aplicação de radiações eletromagnéticas, ou pela adição de catalisadores e acelerados de reação. Os radicais livres do catalisador atacam as insaturações no poliéster ou no monômero de baixa massa molar, estireno, por exemplo, para iniciar a reação de polimerização em cadeia, a qual dá origem a um copolímero estireno-poliéster, formando assim uma rede tridimensional termorrígida (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

A matriz polimérica é formulada por meio da adição de iniciadores e agentes de cura. A ativação dos iniciadores de cura é feita por promotores de cura (aceleradores), cujo as mais usuais são as amins terciárias ou os sais de cobalto, vanádio, cobre ou manganês, sendo os dois primeiros os mais empregados. No cotidiano, os iniciadores de cura são normalmente chamados de catalisadores. Esse termo não é tecnicamente correto para expressar o fenômeno que ocorre na cura. Catalisador é uma substância que aumenta a velocidade de uma reação química sem ser efetivamente consumido no processo, fato que não acontece na cura de matrizes poliméricas onde o iniciador de cura é consumido na reação (MARINUCCI, 2011).

No caso da resina poliéster isoftálica, com o efeito da adição do monômero de estireno, que também possui insaturações e é considerado o monômero insaturado mais utilizado por motivos técnicos e econômicos, reduz o tempo de copolimerização quando comparado com o tempo que requerem aquelas que são homo polimerizadas, alcançando resistência mecânica rapidamente. A adição de estireno produz o benefício adicional da facilidade na manipulação do material líquido, que deverá ser armazenado, transportado e conformado no molde final (CASSIS e TALBOT, 1998; BENDEZÚ, 2002).

O ácido isoftálico não forma na sua composição anidrido cíclico, além disso, também evita a desvantagem de regeneração e, conseqüentemente, podem ser obtidos poliésteres de alto peso molecular, ou seja, cadeias mais longas. Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica, pois absorvem melhor impactos, tornando-se em polímeros de maior resistência química e térmica (CASSIS e TALBOT, 1998).

Esses grupos ácidos são separados por um carbono do anel de benzeno, conforme mostrado na figura 2.2, que aumenta a produção de polímeros com maior linearidade e peso molecular mais elevado na reação da esterificação (HANCOX, 1991; CASSIS e TALBOT, 1998).

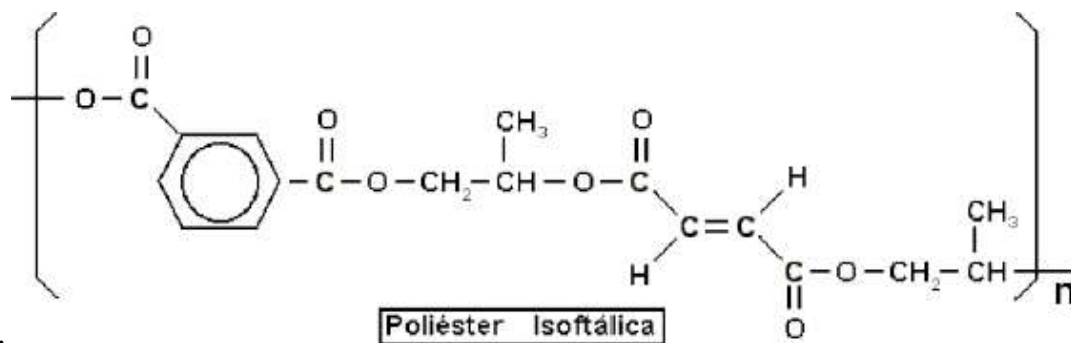


Figura 2.2 – Cadeia Poliéster Isoftálica

Fonte: SILAEX (2017).

Têm-se como principais aplicações comerciais desse tipo de resina, a confecção de tanques, tubulações e acessórios reforçados com fibras de vidro, os quais necessitam ser submetidos a ambientes quimicamente agressivos, moldados em processo aberto (laminação manual ou a pistola) ou enrolamento filamentar. (HOLLAWAY, 1994; CASSIS e TALBOT, 1998).

2.3 – FIBRAS

2.3.1 - Fibras Naturais

Este termo designado de “fibras naturais” representa um amplo grupo de materiais que incluem mineral (por exemplo, amianto), animal (por exemplo lã, seda) e fibras à base de plantas (por exemplo, cânhamo, linho, sisal, bambu), como observado por GURUNATHAN et al. (2015). Mais comum no estudo de compósitos são fibras animais, que são compostas de proteínas, e fibras vegetais, que têm celulose como seu constituinte básico. Este último grupo tem muitas subdivisões, com base na estrutura da planta de onde as fibras são extraídas, conforme observado na figura 2.3.

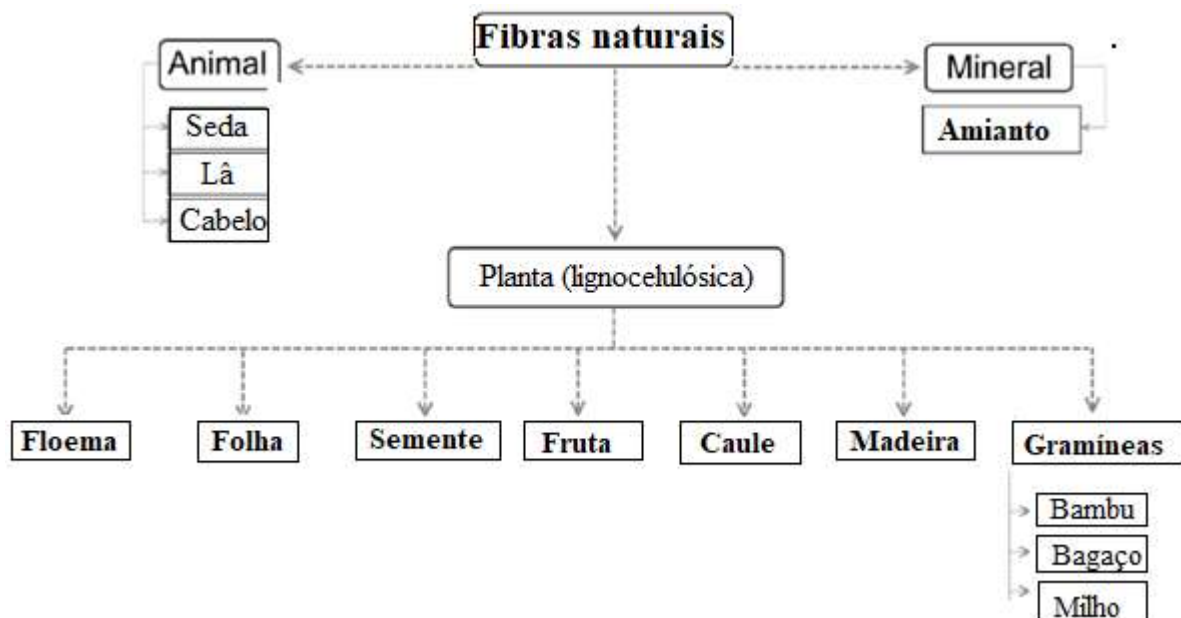


Figura 2.3 - Classificação de algumas das fibras naturais mais comuns.

Fonte: Adaptado de GURUNATHAN et al. (2015).

Conforme alguns autores, as fibras são compostas principalmente de três constituintes: celulose, hemicelulose e lignina. Outros componentes frequentemente encontrados, mas em concentrações muito mais baixas, são ceras, pectina, óleos, amidos e substâncias solúveis em água, entre outros (BLEDZKI & GASSAN, 1999). Devido à sua estrutura interna complexa e muitos componentes, as fibras naturais são consideradas um composto por si mesmas, e cada espécie de planta possui diferentes arranjos e concentrações desses constituintes (DITTENBER & GANGARAO, 2012).

A combinação desses constituintes em uma fibra elementar ou parede da célula vegetal, é complexa e em camadas, como mostrado esquematicamente na figura a seguir. A parede primária (externa) é composta por uma rede de microfibrilas de celulose dispostas aleatoriamente ligado a uma fase amorfa de hemicelulose e lignina, que atuam como matriz para os feixes de celulose. Na parede secundária interna, três camadas estão geralmente presentes e em cada uma as microfibrilas de celulose são dispostas de forma helicoidal em relação ao eixo da fibra elementar. O ângulo entre cada camada é diferente, e o ângulo microfibrilar (indicado na figura 2.4a) em relação ao longo eixo é um importante fator que determina as propriedades mecânicas da fibra (AZWA et al., 2013, JOHN & THOMAS, 2008). Em muitas aplicações, a redução de fibras naturais para fibras elementares não é economicamente viável ou possível. Assim, fibras naturais usadas em a maioria das aplicações e pesquisas são, na verdade, feixes de fibras, também chamadas de fibras técnicas. Como o nome indica, estes são formados por feixes de fibras elementares, como mostrado esquematicamente na figura 2.4(b) (BOS et al., 2006).

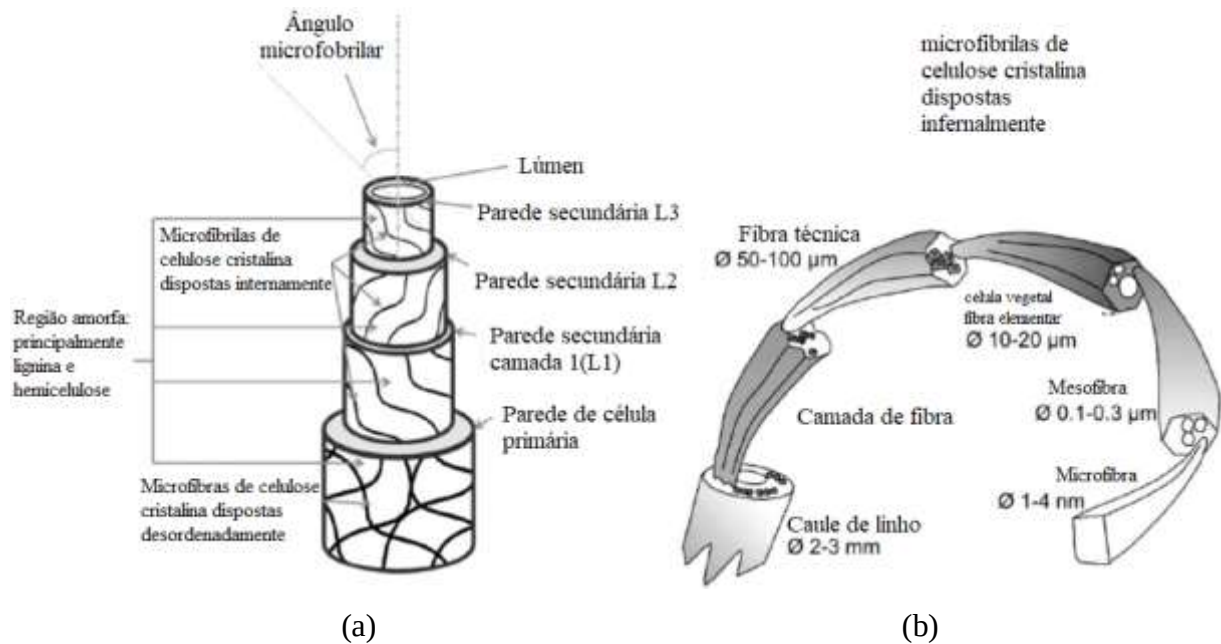


Figura 2.4 - (a) estrutura interna de uma fibra natural elementar (adaptada da AZWA et al., 2013). (b) Hierarquia de organização das fibras naturais.

Fonte: Adaptada de BOS et al. (2006).

É importante observar que os ângulos microfibrilares nas camadas das paredes secundárias, o comprimento e espessura das células vegetais, a quantidade relativa de celulose, hemicelulose, lignina e outros constituintes menores, entre outros fatores, variam de uma espécie de planta para outra. Não só isso, mas cada planta individual mostra variações nessas variáveis de acordo com as condições de cultivo (FARUK et al., 2012, AZWA et al. 2013, NECHWATAL et al., 2003, HO et al., 2012). Isso explica a ampla gama de valores para propriedades mecânicas em fibras naturais, em comparação com fibras de vidro, e por que diferentes espécies de plantas podem ter um comportamento mecânico tão diferente. Essas diferenças podem ser como mostra a tabela 2.1, que lista as fibras atualmente mais utilizadas e estudadas.

Tabela 2.1 - Composição e propriedades das fibras naturais disponíveis

Fonte: Adaptada de GURUNATHAN et al., 2015.

Fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Tensão específica (MPa)	Módulo específico (GPa)	Celulose (% em peso)	Hemicelulose (% em peso)	Lignina (% em peso)	Ang. de microfibrila (deg)
algodão	287-597	6-10	194-452	4-6,5	85-90	5,7	0,7-1,6	20-30
Juta	187-773	20-55	140-320	14-39	61-71,5	13,6-20	12-13	8
Linho	343-1035	50-70	345-620	34-48	71-78	18,6-21	2,2	5-10
Sisal	507-855	9-22	55-580	6-15	67-78	10-14	8-11	10-22
Urtiga	400-938	61,4-128	590	29	68,6-76,2	13-16,7	0,7	7,5
cânhamo	580-1110	30-60	210-510	20-41	70,2-74,4	18-22,4	3-5,7	2-6,2
fibra de coco	175	6	92-152	5,2	36-43	0,15-0,25	41-45	30-49
Kenaf	295-930	22-60	246-993	18-50	45-57	21,5	8-13	n/a
Banana	529-914	27-32	392-677	20-24	63-64	10	5	11
Abacaxi	170-1627	60-82	287-1130	42-57	80-83	15-20	8-12	10-22
Abacá	430-813	31,1-33,36	n/a	n/a	56-63	21,7	12-13	8-15
Bambu	140-441	11-36	383	18	n/a	n/a	n/a	n/a
Madeira	51-120,7	5,2-15,6	n/a	n/a	86	4	5,4	n/a
madeira macia	45,5-111,7	3,6-14,3	n/a	n/a	40-44	25-29	25-31	n/a
Fibra de vidro	2000-3500	70-73	800-1400	29	-	-	-	-

2.3.2 - Fibras Vegetais

No Brasil, especialmente na região amazônica, encontram-se condições climáticas e de solo fértil para o cultivo de uma extensa variedade de espécies de plantas. O uso de fibras vegetais contribui com a economia, com a geração de renda, ameniza poluições ambientais e substitui e/ou diminui a utilização de fontes não renováveis e não degradáveis. (SATYNARAYANA et al., 2007).

A utilização de materiais primas advindas de recursos renováveis, vem sendo de grande interesse em diversas pesquisas científicas, devida ao seu potencial na substituição de produtos sintéticos. Esses estudos estão avançando na indústria têxtil, na indústria automobilística, na área de revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões e da construção civil. (SILVA, 2014).

Entres as desvantagens do uso de fibras vegetais estão a falta de uniformidade de propriedades, que dependem da origem das fibras, da região do plantio e da habilidade manual

durante a colheita e a alta absorção de umidade, que pode causar o inchaço das fibras. A absorção de umidade pode ser drasticamente reduzida pela modificação química das fibras e pela boa adesão na interface fibra/matriz (SILVA, 2003).

2.3.2.1 – Fibras de Bambu (*Bambusa Vulgaris*)

As fibras de bambu pertencem a classe das gramíneas que ocorre de forma natural, em regiões tropicais, subtropicais e até temperadas. Apresenta grande potencial como reforço de matrizes cimentícias, aliando o baixo custo à boa resistência mecânica. Cresce em grupos de canas com comprimentos de 3 a 35 m, que têm colmos cilíndricos individuais ocos, com diâmetros de 20 a 300 mm. O colmo é dividido em intervalos separados por nós contendo diafragmas transversais, conforme mostrado na figura 2.5. Como reforço, pode ser usado o colmo, taliscas ou fibras (SUBRAHMANYAM, 1984).

A indústria de produtos de fibrocimento tem direcionado seu interesse para argamassas de cimento autoclavadas reforçadas com fibras de madeira, como produto comercialmente viável para substituir o cimento-amianto. Em países com carência de recursos florestais, fontes alternativas têm sido pesquisadas (COUTTS et al., 1994). Nesse sentido, as fibras de bambu apresentam vantagens adicionais, em relação a outras fontes, pelo seu rápido crescimento, baixo custo e boa qualidade.

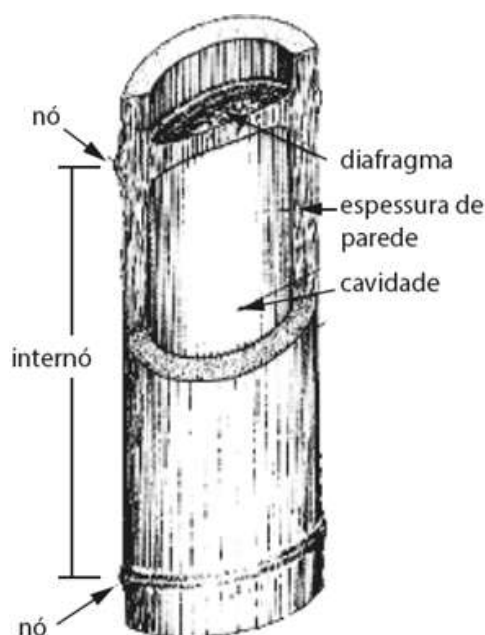


Figura 2.5 - Esquema do colmo de bambu (*Bambusa vulgaris*).

Fonte: SALES (2006).

2.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS

Nas últimas décadas vem sendo mostrado o crescimento considerável no desenvolvimento de compósitos com adição de fibras vegetais que venham substituir aqueles que possuem fibras sintéticas em sua composição, como é o caso da fibra de carbono e a fibra de vidro. Essas fibras vegetais estão gerando cada vez mais produtos de consumo e possuem diversas vantagens em relação às sintéticas, como a sua baixa densidade, o custo menor, propriedades específicas aceitáveis e também são renováveis e biodegradáveis. Os compósitos reforçados com fibras vegetais possuem alta resistência e rigidez, boas propriedades isolantes térmicos e acústico e alta resistência à fratura.

A principal desvantagem encontrada nestes materiais compósitos poliméricos de fibra natural é a compatibilidade entre as fibras naturais hidrofílicas e da matriz hidrofóbica que torna necessário usar compatibilizadores ou agentes de acoplamento, a fim de melhorar a adesão na interface entre a fibra e a matriz (PRASAD e RAO, 2011).

As fibras vegetais mais utilizadas como material de reforço em compósitos poliméricos são as fibras de sisal, coco, juta e banana, além de fibras de madeira, bagaço e bambu. As matrizes termorrígidas apresentam um enorme potencial para utilização das fibras vegetais, pois neste caso, podem-se utilizar métodos de processamento bastante simples e de baixo custo, além de utilizar com vantagem fibras contínuas, sem a necessidade de se promover alterações nos procedimentos e/ou equipamentos de processamento (SILVA, 2003).

SINGLETON *et al.* (2003) desenvolveram pesquisa usando materiais compósitos tendo como matriz o polietileno de alta densidade e reforço de flax. O compósito foi produzido por laminação manual acompanhado de compressão. As fibras apresentaram comprimento entre 20 e 50 mm e diâmetro de 15 μm . Foram produzidos compósitos com fração volumétrica de fibras de 10, 18, 20 e 30 %. Foi registrado um aumento da resistência à tração com o aumento da fração volumétrica de fibras, sendo 27,1 MPa para a matriz pura e 41,60 MPa para o compósito com 30% de fibras de flax. O aumento da fração de fibra ocasionou uma diminuição do alongamento do material, ou seja, foi obtido material com maior rigidez.

2.4.1 - Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Bambu

WONG *et al.* (2010) ao trabalharem com matriz de resina poliéster reforçada com fibras curtas de bambu de comprimento 4, 7 e 10 mm, descrevem o efeito da fração volumétrica sobre o limite de escoamento nos compósitos de diferentes tipos de comprimentos. Na figura 2.6,

observa-se que os compósitos com fibras de 4 mm de comprimento, apresentam baixos valores de limite de escoamento se comparados aos compósitos poliéster de matriz pura. Isto nos mostra que para fibras curtas de 4 mm a matriz não consegue transferir efetivamente a carga. Ao atingir a fração volumétrica de 50% de reforço de fibras de 4 mm há redução elevada no limite de escoamento, provavelmente devido à baixa fração volumétrica da matriz correspondente a elevada fração volumétrica da fibra.

As fibras de comprimento de 7 mm tiveram o valor do limite de escoamento semelhante ao da matriz pura apenas no valor de fração volumétrica de 30%, e com o incremento de fibras o valor do limite de escoamento cai significativamente. Similarmente, isto indica uma pobre transferência do carregamento quando ocorre o aumento da quantidade de fibra na matriz.

Os autores citam que quando o comprimento da fibra foi aumentado para 10 mm, o limite de escoamento aumentou consideravelmente comparado a poliéster puro. O valor mais elevado é obtido na fração volumétrica de 40%; nesta fração volumétrica o valor do limite de escoamento aumentou em 25%. Destacou que o efeito de reforço da fibra está relacionado ao comprimento crítico da fibra. Os resultados mostram que a transferência do carregamento é aumentada com o incremento no comprimento da fibra. Resultado similar foi encontrado com a fibra de Sisal (KURUVILAN, 1997) e fibras de abacaxi (MANIKANDAN *et al.*, 2012) destacou que as propriedades de tensão nos materiais compósitos de fibra de coco aumentaram quando o comprimento das fibras aumentou para 20mm.

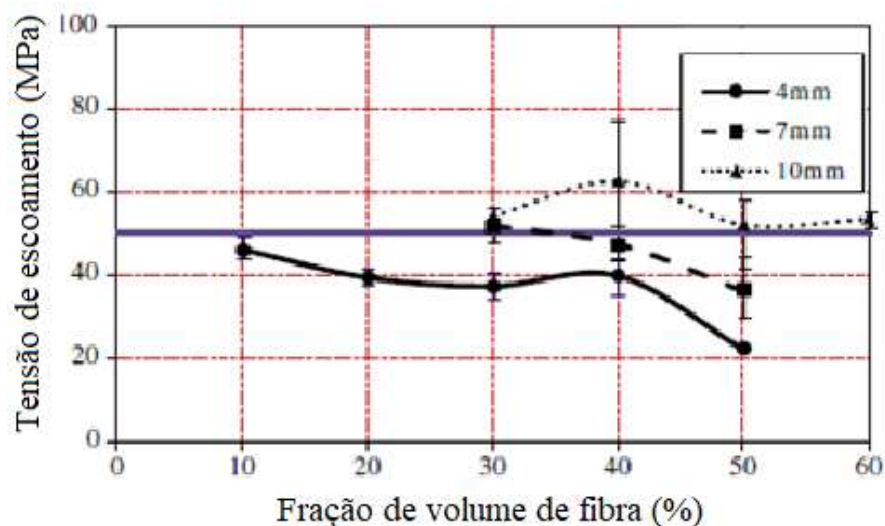


Figura 2.6 – Efeito da fração volumétrica no limite de escoamento do compósito reforçado com fibras curtas de bambu.

Fonte: WONG *et al.* (2010).

KUWAHARA (2014) pesquisou material compósito de matriz poliéster reforçado com fibras de bambu e sisal onde os comprimentos das fibras obtidos variaram entre 5, 10 e 15 mm e as frações mássicas foram de 3,90%; 4,87% e 5,41%. Os compósitos foram avaliados em tração e por fractografia. Os melhores resultados foram os da fração mássica de 5,41% para o bambu parte basal, com resistência de 14,20 ($\pm 1,30$) MPa, parte intermediária, 16,20 ($\pm 2,52$) MPa e parte do topo 16,93 ($\pm 1,36$) MPa, para o sisal 22,83 ($\pm 0,54$) MPa.

Com relação as suas propriedades mecânicas na fibra de bambu, tem-se alguns trabalhos, como de COSTA (2012) que encontrou e sua pesquisa valores de resistência a tração média de 501,04 MPa para fibras de bambu in natura (com diâmetro de 0,245mm).

2.5 – PARTÍCULAS MINERAIS

As partículas minerais são produzidas por diversas empresas do ramo da mineração, as quais são extraídas de grandes jazidas minerais, onde são beneficiadas e acondicionadas em embalagens de fornecimento ao mercado consumidor. Partícula mineral é o termo empregado para definir o uso de determinados pós-minerais em mistura com polímeros (LIMA, 2007).

É importante o entendimento da distribuição granulométrica das partículas, pois estas sendo maiores, aumentam a resistência a abrasão, mas por outro lado, causam efeitos adversos na deformabilidade e falha do material. Sendo assim, pode-se dizer que a concentração de tensões no compósito aumenta com o aumento do tamanho da partícula (DALPIAZ, 2006).

Ainda segundo Dalpiaz (2006), as partículas minerais podem se dividir em quatro categorias quanto a sua forma, conforme descrito na figura 2.7.

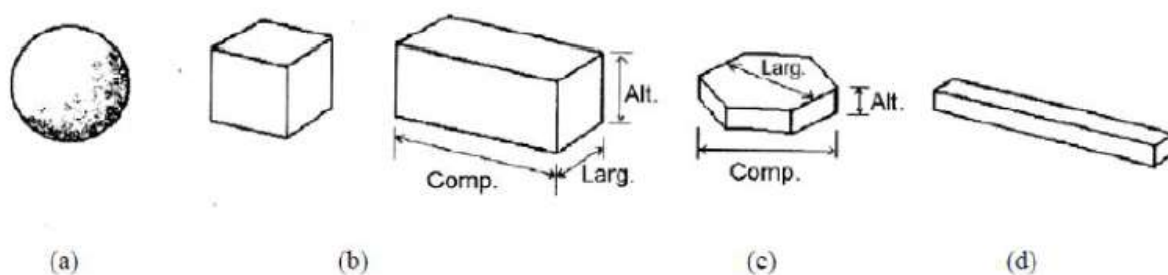


Figura 2.7 – Principais formas de partículas: a) esféricas; b) granulares; c) lamelares; d) fibrilares ou aciculares.

Fonte: DALPIAZ (2006)

Com a adição de partículas nos compósitos, busca-se obter a redução de custo e/ou incrementar uma ou mais propriedades do mesmo. Nas matrizes poliméricas a introdução de partículas, geralmente não leva a um aumento substancial das propriedades mecânicas do polímero. Este fato ocorre, pois, as tensões não são efetivamente transferidas da matriz para entidades esféricas dotadas de pequena área superficial. Além disso, as partículas também podem atuar como agentes nucleadores de trincas e assim contribuir para essa redução na resistência mecânica dos compósitos (CASARIL, 2004).

2.5.1 - Lama vermelha

A lama vermelha é um resíduo insolúvel gerado no processo de obtenção do alumínio da bauxita, por meio do processo Bayer, o qual é disposto em locais adequados denominados lagoas de disposição. A lama vermelha possui elevado teor alcalino e é composta por finas partículas de óxidos e hidróxidos de sílica, alumínio, ferro, cálcio e titânio, podendo também conter elementos traços de óxidos de outros metais (HIND *et al.*, 1999).

Nota-se que há uma crescente preocupação em desenvolverem-se novos adsorventes de metais pesados utilizando-se materiais disponíveis, como os resíduos industriais. Estudos realizados mostram o uso de cinzas volantes, lamas de alto-forno, lodos, resíduos de fábricas de chá, polpa de beterraba, entre outros, como adsorventes de baixo-custo de metais pesados em águas residuárias, além da lama vermelha, ou *red mud*, um dos mais promissores adsorventes da atualidade (AHMARUZZAMAN, 2011).

É importante informar que a lama vermelha não é classificada como um rejeito perigoso, mas sua disposição inadequada pode acarretar em problemas como contaminação de águas superficiais e subterrâneas por NaOH, Fe, Al ou outros agentes químicos e danos à flora e fauna da região de entorno das lagoas de disposição (HIND *et al.*, 1999; SILVA FILHO *et al.*, 2007).

No que diz respeito as propriedades da lama vermelha, essas variam de maneira significativa de diferentes bauxitas e diferentes métodos de produção, porém, as propriedades básicas são o alto pH (variando de 10 a 12,5) e distribuição extremamente fina de sólidos em suspensão com teor de 15 a 30 % de sólidos. Esse resíduo possui composição química complexa e devido aos altos teores de cálcio e hidróxido de sódio em associação com as grandes quantidades produzidas anualmente, é relativamente tóxico e um sério poluente ambiental (CABLIK, 2007; HIND *et al.*, 1999; LIU e WU, 2012).

Com isso, muitos pesquisadores têm buscado a utilização da lama vermelha em diversas aplicações industriais, tais como neutralização de solos ácidos (VARNAVAS *et al.*, 2005),

enriquecimento de ferro e cálcio em terrenos pantanosos (VARNAVAS *et al.*, 2007), utilização em argamassas (RIBEIRO *et al.*, 2012) e utilização como carga (material de enchimento) em compósitos de matrizes poliméricas (SOUZA, 2008).

A armazenagem da lama, que antes era feita em lagoas de estocagem, vem sendo substituída pelo método de empilhamento a seco, que é muito mais eficiente e também mais seguro para o meio ambiente, método este que já vem sendo adotado pela Hydro Alunorte (HYDRO ALUNORTE, 2019). Nesta planta industrial mostra-se uma imagem superficial da área da fábrica e lagoa de rejeitos, conforme observado na figura 2.8.



Figura 2.8 - Depósito de resíduo sólido (DRS) da Alunorte Barcarena – PA em 2019

Fonte: Autor, via Google Earth (setembro, 2019)

2.5.2 – Resíduo de caulim

O caulim destaca-se como sendo um dos seis minerais mais abundantes da crosta terrestre e pode ser encontrado com até 10 metros de profundidade, apresenta como característica a granulometria fina, que permite maior plasticidade e a cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de ferro. Em função de suas propriedades, pode ser utilizado na fabricação de diversos produtos, como produtos farmacêuticos, materiais cerâmicos, esmaltes para revestimento cerâmico, tintas, papéis, dentre outros, sendo assim, a extração desse mineral contribui diretamente com a economia do país. Cerca de 28% das reservas mundiais de caulim são encontradas no Brasil (ALMEIDA e LUZ, 2012).

No Brasil a construção civil é um dos setores que contribui efetivamente com a economia do país, logo, está diretamente ligado ao PIB nacional, portanto seu crescimento ou estagnação podem refletir a atual situação financeira do país. Entretanto, estas contribuições diretas a economia, não revelam outro aspecto. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2016) a construção civil é uma das atividades humanas que mais consome recursos naturais e uma das que mais consome energia de forma intensiva. No Brasil cerca de 35% do que é extraído da natureza anualmente, como areia, madeira, pedras, dentre outros, é utilizado pelo setor, afirma VERONEZZI (2016).

De forma geral o caulim apresenta uma estrutura lamelar composta de folhas de tetraedros de Si e octaedros de Al com oxigênios comuns, com formação de uma camada 1:1 (MASCARENHAS *et al.*, 2001). Uma amostragem de caulim com essas características pode ser identificada na figura 2.9, a seguir.



Figura 2.9 – Amostragem de caulim.

Fonte: (RASHAD, 2013)

O Brasil é um território que detém uma grande quantidade de reservas de caulim e de acordo com Sumário Mineral do DNPM (2015), o país ocupa o 6º lugar como produtor mundial. Ele é obtido na forma de fruto de alteração dos silicatos de alumínio que passaram por processos de intemperismo (SANTOS *et al.*, 2016).

Segundo REZENDE (2013), os depósitos de caulim podem ser classificados segundo a sua formação, primária ou secundária. Neles estão presentes grandes quantidades de quartzo e mica. Por causa destas características o caulim quando beneficiado produz grandes quantidades de rejeito.

Indica-se que nas reservas brasileiras (medidas e indicadas), aproximadamente 97 % encontram-se na região norte do País, nos estados do Pará (Imerys S/A e PPSA), Amapá

(CADAM) e Amazonas (Mineração Horboy Clays Ltda). O mercado produtor de caulim apresenta-se concentrado e competitivo. Os Estados Unidos juntamente com a Comunidade dos Estados Independentes, Coréia do Sul, República Tcheca, Brasil e Reino Unido, são responsáveis por 62 % do caulim produzido no mundo. É importante ressaltar que apenas o Brasil disponibiliza o minério já beneficiado para o mercado interno e externo a ser utilizado na indústria de papel, o qual responde por 7 % da produção mundial (SENA e MÁRTIRES, 2007).

Na região Norte, no que diz respeito ao beneficiamento e produção do caulim, dois grupos empresariais - Cia. Vale do Rio Doce - Vale e Imerys Rio Capim Caulim - IRCC - controlam cerca de 92,5 % do caulim produzido no país. Enquanto a Vale responde por 51,6 %, através de suas controladas CADAM S/A (29,3 %) e Pará Pigmentos S/A - PPSA (22,3 %), a Imerys detém a fatia de 40,9 % da produção. Em conjunto, destinam entre 80 % e 90 % da produção para a indústria de papel na Europa, Ásia e América do Norte, colocando o restante no mercado doméstico. As demais regiões do país produzem caulim para outras finalidades, notadamente para cerâmicas branca e vermelha, cimento, borracha, plástico, tintas, refratários e, também, em menor proporção, para enchimento (filler) e cobertura (coating) na indústria de papel (FARIAS, 2009).

2.5.3 – Resíduo de cobre

O nome cobre deriva do termo “*aes cyprium*” - minério de Chypre (Chipre), mais tarde conhecido como “*cuprum*”, palavra latina que deu origem ao símbolo químico Cu. O cobre é um dos metais mais antigos da civilização mundial, datando seus primeiros usos desde 8.000 anos a.C. Sua importância na história da humanidade marcou uma época denominada “Idade do Bronze”, liga formada de cobre e estanho. O domínio de posse e tecnologia do cobre representava nos povos da antiguidade a riqueza e o poder. Durante a Idade Média o cobre continuou a ter seu grau de importância. Na atualidade, o cobre mantém sua relevância para o homem, graças às suas características que lhe conferem diversidade de aplicações no desenvolvimento tecnológico industrial (SILVA, 2010).

Por efeito de suas características mineralógicas, 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 (SILVA, 2010). A tabela 2.2 apresenta a caracterização química de amostras do rejeito.

Tabela 2.2 - Composição química do rejeito do beneficiamento do cobre

Fonte: SOUZA (2010)

Componente	Quantidade	Componente	Quantidade	Componente	Quantidade
SiO ₂ (%)	57,6	Ni (ppm)	399	Bo (ppm)	7
Al ₂ O ₃ (%)	12,0	Ba (ppm)	297	Sc (ppm)	3,8
Fe ₂ O ₃ (%)	13,7	V (ppm)	220	Bi (ppm)	<20
MgO (%)	4,1	Sr (ppm)	146	Sn (ppm)	<20
CaO (%)	4,37	Cr (ppm)	144	W (ppm)	<20
Na ₂ O (%)	2,79	La (ppm)	89	U (ppm)	<10
K ₂ O (%)	1,69	Au (ppm)	40	Sb (ppm)	<10
TiO ₂ (%)	0,42	Zr (ppm)	62	B (ppm)	<10
P ₂ O ₅ (%)	0,77	Pb (ppm)	44	Th (ppm)	<5
MnO (%)	0,04	Co (ppm)	40	Ag (ppm)	<3
S (%)	<0,10	Y (ppm)	24	Cd (ppm)	<3
Cu (ppm)	1665	Li (ppm)	8	Mo (ppm)	<3

Vários estudos foram realizados, para utilização destes resíduos; alguns destes para a utilização de resíduo do beneficiamento de cobre como matéria-prima na fabricação de concreto para ser aplicado diretamente na construção civil (SOUZA, 2010).

2.6 - DIFRAÇÃO DE RAIOS – X (DRX)

Esta técnica por meio de DRX é realizada com o objetivo de identificar as principais substâncias cristalinas presentes em materiais, caracterizando-se por análise qualitativa, onde estas fases cristalinas são identificadas a partir de picos característicos. A partir do comparativo entre fichas cristalográficas de referência de materiais puros com o difratograma obtido pelo material a ser analisado, pode se afirmar a existência de determinados compostos nas amostras (CORREIA, 2011).

De acordo com Silva (2019), Raios-X são formados quando um átomo é bombeado por um feixe de elétrons ou por raios-X primários, sendo estes capazes de expulsar um elétron da camada mais interna deste átomo. Assim, outro elétron de uma camada mais externa ocupa esta vacância e assim sucessivamente. Esta emissão de luz na região do espectro eletromagnético corresponde aos raios-X (0,1-100nm).

2.7 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS FIBRAS NATURAIS DE BAMBU

Segundo Lumingkewas (2015), nas fibras os principais componentes das paredes das células são a celulose, homocelulose e lignina com pectina tipicamente considerada a principal encadernador. A composição química é determinada levando em consideração as características físicas e anatômicas da madeira, e dependendo dessas características, a quantidade dos componentes químicos existente pode variar.

Materiais lignocelulósicos são renováveis, geralmente subutilizados e disponíveis abundantemente em várias matérias-primas. Esses materiais podem ser obtidos a custos relativamente baixos, de uma grande variedade de recursos, como resíduos agroflorestais e resíduos urbanos (TAHERZADEH; KARIMI, 2007). Sendo assim a retirada desse material não ocasionaria danos à natureza, pois é uma alternativa viável e sustentável.

O bambu é um material pertencente aos lignocelulósicos, da família das Poaceae, subfamília dos *bambusa Vulgaris*. De acordo com Fernando (2013) o potencial do Bambu ainda é pouco explorado, por isso se faz necessário uma maior atenção a esse material que possui utilização bastante versátil.

2.8 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS COM REFORÇO DE FIBRAS NATURAIS

Para todo projeto de engenharia no qual se deseja obter as características mecânicas de componentes, propõe-se um vasto conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais disponíveis. As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de ensaios cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Dentre os fatores a serem considerados nos ensaios incluem-se a natureza da carga aplicada, a duração de aplicação dessa carga e as condições ambientais. A carga pode ser de tração, compressão ou cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou então flutuar continuamente. O tempo de aplicação pode ser de apenas uma fração de segundo ou pode se estender por um período de muitos anos. Dentro das condições ambientais destaca-se também a temperatura como fator de grande importância (CALLISTER, 2018).

Gera aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. O resultado do teste de tração é representado pela curva de tensão de tração versus deformação sofrida pelo corpo durante o ensaio (SRIVASTAVA e KAWADA, 2001).

É expressa na equação (01), a seguir, a relação da tensão exercida pelo material representada por (σ).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (01)$$

Onde F é a carga aplicada ao corpo de prova; A_0 é a área inicial do corpo de prova antes do carregamento.

A deformação (ϵ) é calculada pela equação (02).

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (02)$$

Onde l é o comprimento final do corpo de prova após o carregamento e l_0 é comprimento inicial do corpo de prova antes do carregamento.

Para a caracterização mecânica por meio de flexão, onde o módulo de elasticidade é definido igualmente ao ensaio de tração, ou seja, a razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico. Na flexão, as configurações de carregamento podem ser três pontos ou quatro pontos. A flexão em quatro pontos se aplica a materiais que apresentam grande deformação até o momento da ruptura. A norma ASTM D790-10 descreve o ensaio de flexão para materiais plásticos reforçados e não reforçados.

No compósito, a avaliação do comportamento mecânico sob flexão é um instrumento fundamental para análise de suas propriedades mecânicas definidas. É de grande importância o conhecimento do comportamento do material quando submetido a este tipo de carregamento (TOLÊDO FILHO et al, 1997).

O ensaio de resistência ao impacto corresponde a capacidade que o material apresenta de absorver energia até a fratura, sendo quantificada pelo módulo de tenacidade, que é a energia absorvida por unidade de volume. Onde pode-se avaliar a tenacidade considerando a área total sob a curva tensão-deformação obtida em tração (GARCIA et al., 2008).

A carga é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martelete ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. O resultado é obtido com base na energia que o corpo de prova absorve para se deformar e romper (GARCIA et al., 2000). O aparelho dispõe de uma escala em joules para registro de energia requerida para fratura do corpo de prova. A equação (03) para calcular a resistência ao impacto Charpy em corpos de prova não-entalhados ($a_c U$).

$$a_c U = \frac{W}{h \times b} \times 10^3 \quad (03)$$

Considera-se W a energia absorvida ao quebrar os corpos de prova em J , h a espessura do corpo de prova, em mm e b a largura do corpo de prova, mm.

2.8- FRACTOGRAFIA

Esta 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).

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 (COSTA, 2016).

Essas análises requerem que o investigador use técnicas fractográficas específicas para determinar a direção da fratura, o modo como ocorreu e as condições ambientais em que a fratura se processou. Para fraturas translaminares, a ênfase é dada na fratura das fibras, enquanto que na fratura interlaminar a resina recebe mais atenção (FRANCO, 2003).

2.9 - FRATURA EM POLÍMEROS E COMPÓSITOS

WONG *et al.* (2010), em sua pesquisa, trabalhou com matriz de resina poliéster reforçada com fibras curta de bambu curtas de comprimento: 4, 7 e 10 mm, observou que,

conforme demonstrado na figura 2.10 (a), as fibras alinhadas perpendiculares à direção de sollicitação, ficam praticamente intactas após ensaio de tração dos corpos de prova. Verificou que estas fibras participam muito pouco na dissipação de energia. O autor destacou (b) a presença de trincas primárias, o efeito do ancoramento da trinca e de trincas secundárias além de regiões de final da propagação das trincas.

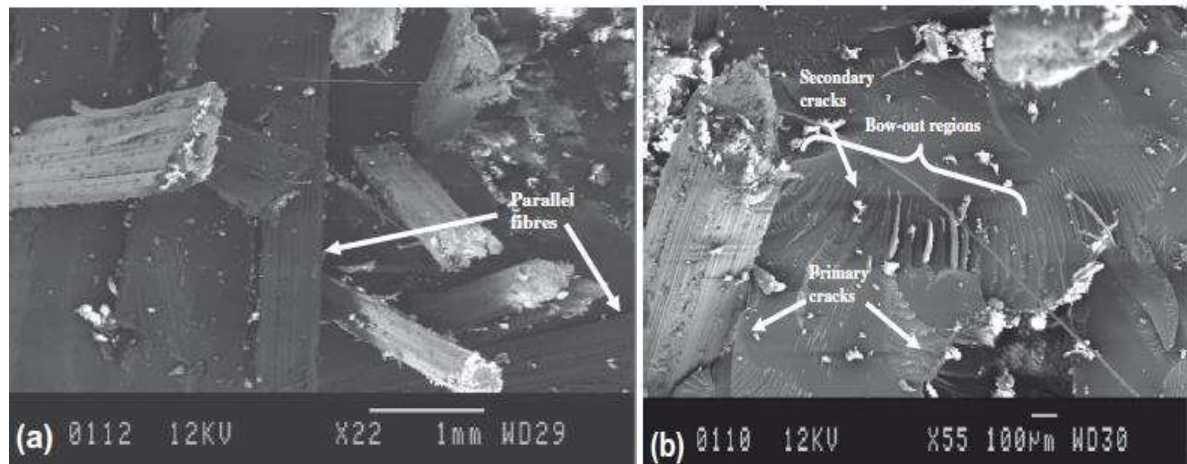


Figura 2.10 – (a) Fibras de bambu dispostas paralelas entre si e perpendicular à superfície da fratura e (b) mecanismo de trincas primárias e secundárias.

Fonte: WONG et al. (2010).

Na figura 2.11, Wong *et al.* (2010) ilustra o diagrama esquemático que representa o efeito de ancoramento da trinca, trinca primária, trinca secundária. Devido à proximidade entre fibras, pode haver o surgimento das trincas primárias e entre as fibras ocorre o efeito de ancoramento da trinca. Consequentemente, as trincas secundárias são formadas. Estas aumentam a fratura, embora haja intensificação da carga. Na região do final da propagação a fratura é diminuída devido dissipação da energia pelas trincas secundárias.

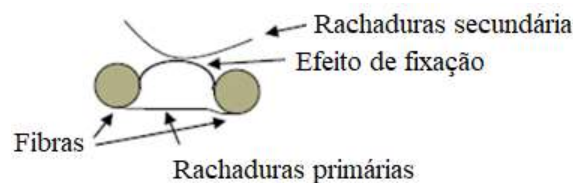


Figura 2.11 – Diagrama esquemático do efeito de ancoramento da trinca.

Fonte: WONG et al. (2010).

MERLINI *et al.* (2011) objetivou o estudo de avaliação da influência da fração volumétrica da fibra, comprimento e tratamento alcalino na propriedade mecânica e térmica de fibras curtas de banana e de disposição aleatória, reforçando a matriz de poliuretano. As fibras de banana foram modificadas quimicamente pelo contato com solução de hidróxido de sódio 10% em peso por 01 hora. Os comprimentos das fibras foram de 20 e 30 mm, variando a fração volumétrica de fibra em 5, 10 e 15 %. Após ensaio de tração dos corpos de provas foi realizado microscopia da superfície fraturada mostra a presença de *pull out* das fibras de banana assim como a presença de vazio entre a fibra de banana não tratada e matriz, conforme a figura 2.12.

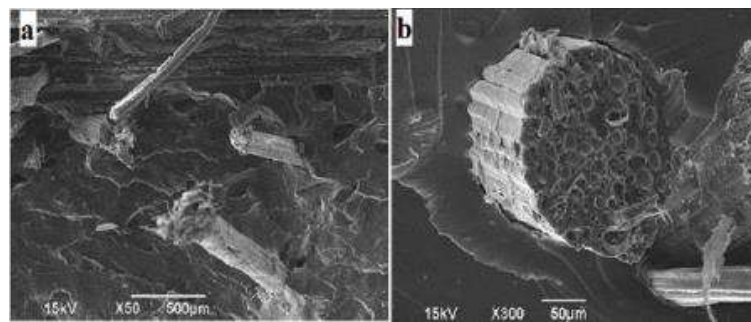


Figura 2.12 - Micrografia da superfície fraturada do compósito matriz poliuretano reforçada por fibras curtas de banana. (a) presença de *pull out* e (b) descolamento fibra/matriz.

Fonte: MERLINI *et al.* (2011).

FERNANDES *et al.* (2013) em sua pesquisa trabalharam com compósito híbrido com particulados de cortiça nas dimensões de aproximadamente 500 µm e fibras de sisal de 20 mm. A matriz utilizada foi a polietileno de alta densidade, onde os corpos de prova foram fabricados por injeção e ensaiados em tração e flexão. Destaca-se entre os resultados obtidos, os materiais compósitos de matriz de polietileno com fração mássica de 60% de particulado de cortiça, com 40% e o outro híbrido polietileno com fração mássica de 54% em peso com particulado de cortiça com 36% e fibras de sisal de 20mm e 10%. Os resultados foram praticamente os mesmos, na ordem de 14 MPa de resistência a tração. A figura 2.13 (a, b) ilustra a superfície da fratura do compósito híbrido partículas de cortiça e fibra de sisal, a mesma revela vazios devido o pull-out das fibras de sisal indicando baixa aderência entre a fibras de sisal e matriz.

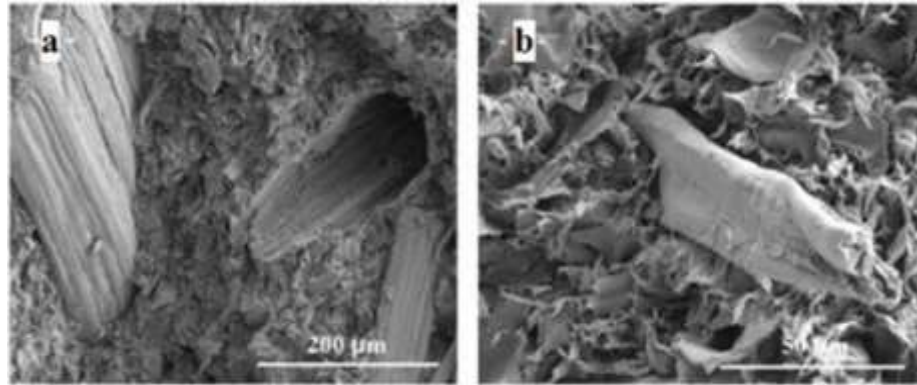


Figura 2.13 – Micrografia da superfície fraturada do compósito matriz polietileno reforçada por fibras curtas de sisal de 20 mm. (a) presença de *pull out* e (b) partículas de cortiça.

Fonte: FERNANDES et al. (2013).

GOPINATH *et al.* (2014) pesquisaram materiais compósitos de resinas poliéster e epóxi reforçados com fibras de juta de comprimento de fibra de 5-6 mm. A figura 2.14 ilustra microscopia eletrônica de varredura da superfície fraturada dos corpos de provas onde claramente (a) mostra região com aglomerados de fibras e destacadamente das fibras na superfície da matriz. (b) visivelmente apresenta os vazios devido a presença de porosidades, estes vazios reduzem a resistência do compósito.

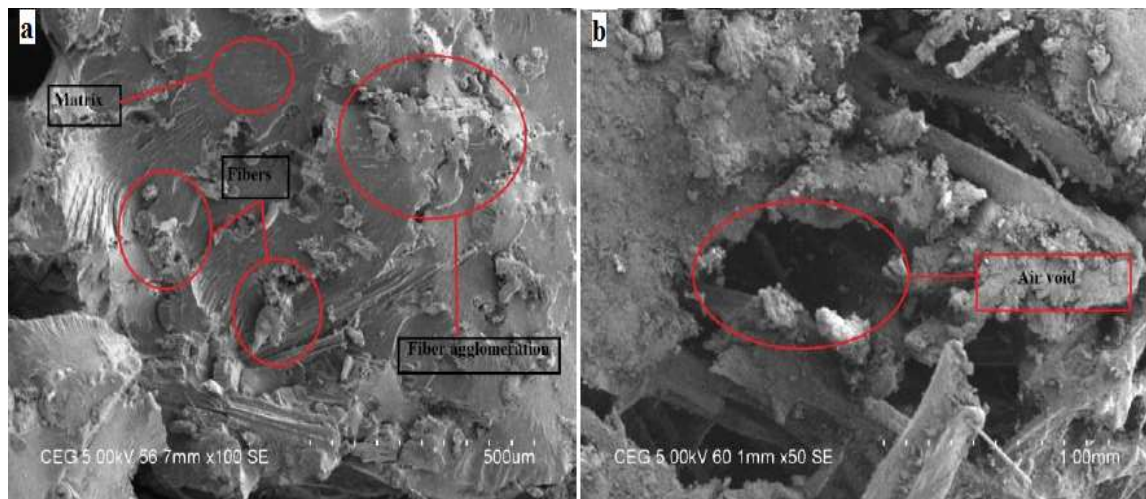


Figura 2.14 - Micrografias (a) imagem ampliação 500µm para material compósito juta/epóxi e (b) imagem ampliação 1 mm para material compósito juta/epóxi.

Fonte: GOPINATH *et al.* (2014).

2.10 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CHAMA EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Este teste busca analisar os processos de ignição, a propagação da chama e liberação do calor em materiais poliméricos. Por conta disso, existem numerosos testes de inflamabilidade com variações na quantidade de amostras, de escala, ou na representatividade de uma situação real, e alguns são semelhantes (LEVCHIK, 2007).

De acordo com a Norma ASTM D635-10, este ensaio é realizado na posição horizontal onde é necessário no mínimo três corpos de prova para o ensaio. O corpo de prova é marcado em três regiões, como observado na figura a seguir, uma com 100 mm para medir a propagação da chama, 5 mm que é a região onde a chama deve permanecer para aquecer o polímero, e 25 mm é a região por onde a chama poderá se propagar antes de iniciar a medida com o cronômetro para a medição do tempo de propagação. O esquema é mostrado na figura 2.15 a seguir.

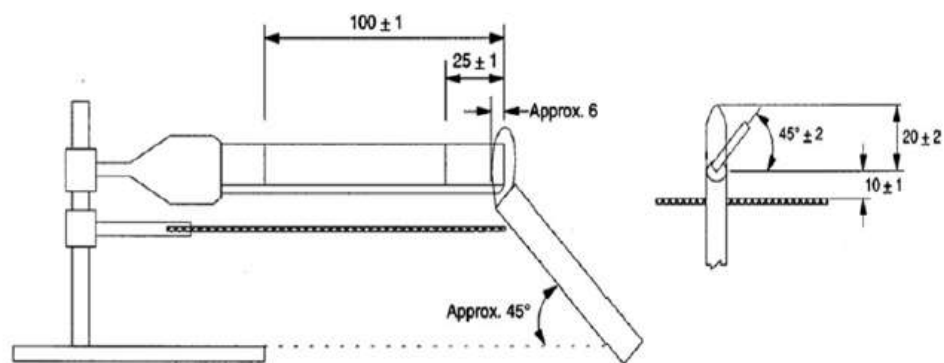


Figura 2.15 – Aparato para o ensaio da norma ASTM D635-10 visto de frente.

Considera-se a distância fixa de 70 mm por onde ela se propaga, para obtenção da taxa de combustão. O valor da velocidade de propagação da chama no corpo de prova, usando uma equação (4): velocidade é igual a distância (mm) pelo tempo (s). Ou seja:

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (4)$$

As amostras ensaiadas podem ser classificadas como HB (queima na horizontal), quando:

- ✓ O corpo de prova queima depois dos 25 mm de referência, mas não apresenta combustão total, não atingindo a marca dos 100 mm.
- ✓ A chama atinge a marca dos 100 mm, contudo a velocidade de propagação da chama não ultrapassa 40 mm/min para os corpos de prova com espessura entre 3 e 13 mm.

- ✓ Ou quando a velocidade de propagação da chama atinge 75 mm/min para os corpos de prova com espessura menor do que 3 mm.

A norma ASTM D635-10 visa medir a velocidade de propagação da chama durante a combustão do material, a ocorrência de gotejamento e se ocorre à combustão total do corpo de prova. Neste ensaio o corpo de prova é usado na posição horizontal, conforme mostrado pela figura 3.18, a seguir, que apresenta as dimensões (a), o aparato utilizado (b) e o corpo de prova sendo ensaiado (c) para determinação da retardância à chama.

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 – MATERIAIS

3.1.1 - Equipamentos e Materiais Sintéticos

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos: um Moinho de Bolas (a), um Agitador de Peneiras (b), uma Estufa - Fabricante DE LEO Equipamentos Laboratoriais (c), uma Balança analítica (d), um Molde metálico (e), uma Prensa hidráulica de capacidade de 15 toneladas – Fabricante MARCON, modelo MPH-15 (f) e uma Serra de bancada (g). Conforme mostrados na figura 3.1, a seguir:

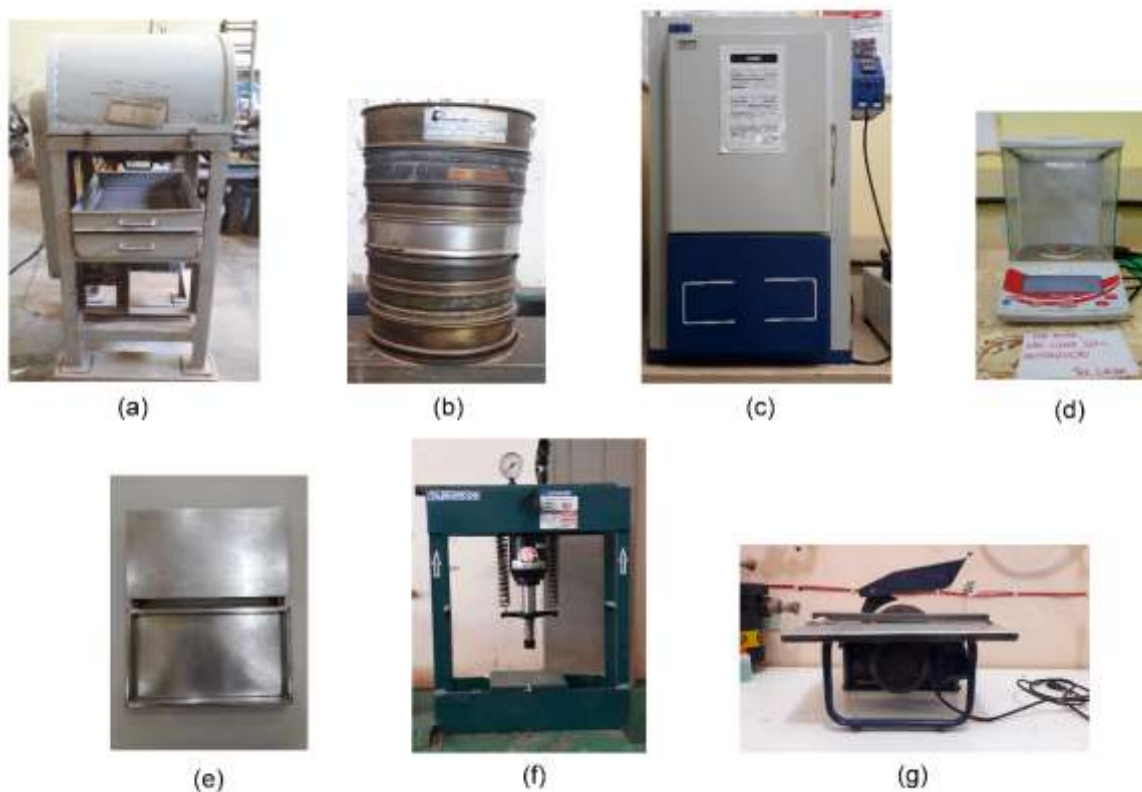


Figura 3.1 – Equipamentos utilizados

Já os materiais sintéticos necessários para a composição da matriz polimérica foram fornecidos pela empresa Aerojet Brasileira de Fiberglass: A Resina Poliéster Isoftálica (Resina AM 910 AEROJET), de média reatividade, amarelada, não acelerada (ausência de promotor de

reticulação), baixa viscosidade, boa resistência química; 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 %); O catalisador o produto comercial BUTANOX M-50 marca de AEROJET (Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]). Na tabela 3.1 são apresentadas as características da Resina AM 910.

Tabela 3.1 - Característica da resina isoftálica insaturada.

Fonte: Adaptado de Aerojet (2018).

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.

3.1.2 - Resíduos Industriais - Lama Vermelha, Caulim e Cobre

Para este trabalho foram utilizados a lama vermelha (a) que foi fornecida pela empresa Hydro Alunorte localizada na cidade de Barcarena, região metropolitana de Belém, além do resíduo de cobre (b), obtido pelo processo de flotação, fornecido pela empresa VALE S.A, originário da Mina do Sossego, Localizada no Município de Canaã dos Carajás, Sudeste do Pará. O resíduo de caulim (c) foi fornecido pela empresa Imerys Rio Capim Caulim. O caulim extraído de minas em Ipixuna do Pará, as margens do Rio Capim, é transportado por minerodutos até o município de Barcarena onde é beneficiado. Foi utilizado o resíduo secundário do caulim, gerado na etapa de beneficiamento. Estes resíduos são mostrados na figura 3.2 a seguir.



Figura 3.2 - Resíduos utilizados no trabalho

3.1.3 - Fibras Naturais de bambu

As fibras extraídas neste trabalho foram coletadas no bosque do campus profissional I da Universidade Federal do Pará – UFPA, com o objetivo de se adquirir os padrões das fibras utilizadas nos experimentos para confecção dos corpos de prova. As fibras estão mostradas na figura 3.3.



Figura 3.3 – Fibras de bambu dispostas

A espécie de bambu coletado pertence a espécie *Bambusa vulgaris* Schard. ex J.C. Wendel e subfamília Poaceae.

3.2 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.2.1- Processo de Confecção dos Compósitos

Os materiais compósitos foram confeccionados determinando-se as massas de todos os constituintes em uma balança de precisão. Após a medição das massas foi aplicado agente desmoldante nos moldes metálicos para evitar a adesão das placas em compósito no molde metálico. Em seguida os resíduos e as fibras foram levados para retirada de sua umidade em estufa de circulação (modelo MA 035/5, marca MARCONI, Brasil) por 30 minutos em temperatura de 105 °C por 5 min. Então, as fibras foram retiradas da estufa, sendo distribuídas e compactadas dentro do molde metálico; em seguida os constituintes (Resíduo/Matriz) foram homogeneizados em um béquer por cerca de 5 (cinco) minutos para o processo de mistura/cura e depois vazados, à temperatura ambiente, sobre as fibras nos moldes metálicos, sendo efetuada uma laminação, compactação e impregnação com espátulas de metal e uso de rolo metálico para retirada de bolhas de ar e imperfeições provenientes do processo de confecção manual das placas de materiais compósitos. O tempo de gel (material em processo de cura) foi determinado no intervalo de 15 a 20 minutos. Logo em seguida o molde metálico foi fechado e prensado em uma prensa hidráulica (modelo MPH-15, marca MARCON, Brasil) com carga de 2,5 kN por 20 minutos. As placas foram retiradas dos moldes metálicos e deixadas em temperatura ambiente para o processo total de cura que foi de 24 h. Depois do processo total de cura, as placas de compósitos foram cortadas em uma serra de bancada circular, para confecção dos corpos de prova de acordo com as normas de cada ensaio. Com a produção das placas de materiais compósitos confeccionadas, foram realizadas as caracterizações térmicas, físicas, mecânicas e micro estruturais. Na figura 3.4, a seguir, mostra-se o processo de confecção desses compósitos.

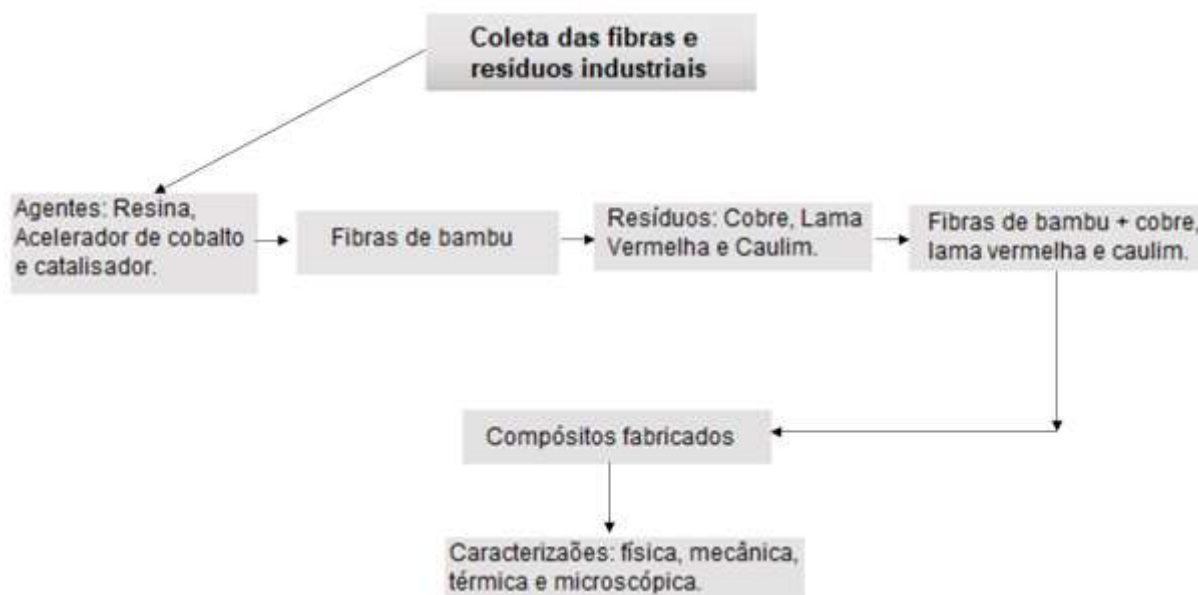


Figura 3.4 – Fluxograma de caracterização das placas de materiais compósitos.

3.2.2 - Caracterização dos Resíduos dos Industrias de Lama Vermelha, Caulim e Cobre

O equipamento utilizado para identificação das fases foi um difratômetro de Raios – X: D8 Advance da Bruker, com tubo de Raios – X de ânodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$). Foi utilizado filtro $K\beta$ de Ni. Foram utilizadas as seguintes condições instrumentais: varredura de 5° a $75^\circ 2\theta$, voltagem: 40 kv, corrente 40 mA, tamanho do passo: $0,02^\circ 2\theta$ e tempo/passos 5s.

A aquisição dos dados foi realizada com software X Pert Data collector, versão 3.0 d. O tratamento dos dados com software X Pert High Score Plus, versão 3.0 e, da Analytical consultando o banco de dados PDF (Power Diffraction File) do ICDD (International Center for Diffraction Data). A figura 3.5 a seguir mostra o equipamento utilizado para realização desta caracterização.

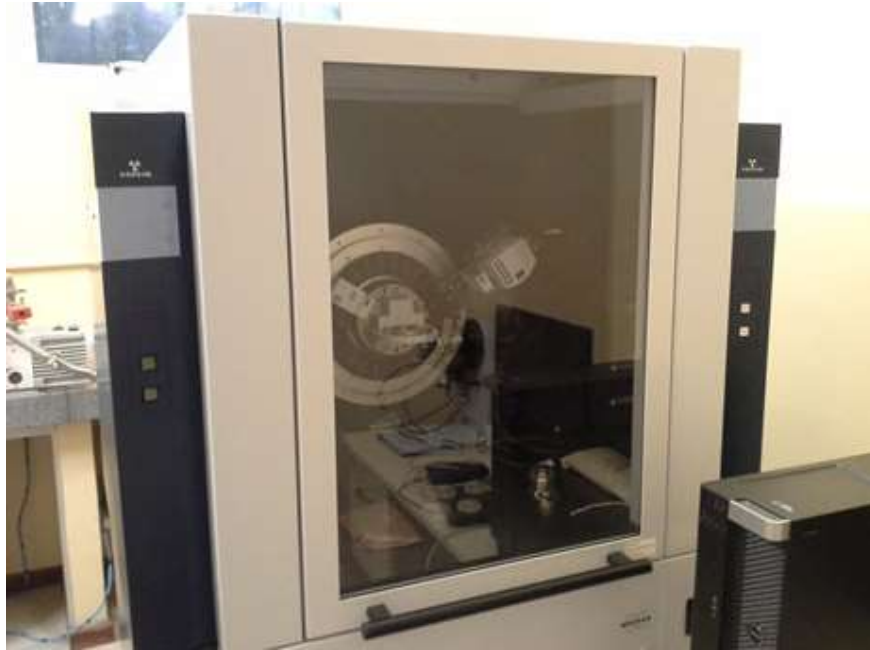


Figura 3.5 – Equipamento de DRX. Raio-X da Bruker. Modelo: D8 Advance, com câmara de temperatura ($T > 77\text{ K}$)

Análise por meio da técnica de DRX é realizada para verificação de materiais cristalinos, os quais apresentam em sua estrutura átomos que são ordenados com seus planos e características de seus espaçamentos e geometrias com definição coerente com sua forma.

3.2.3 - Caracterização morfológica e anatômica do colmo do Bambu (*Bambusa vulgaris*)

Esta análise é feita para o estudo das características internas do bambu (*Bambusa vulgaris*) que foi coletado para o desenvolvimento do trabalho, conforme identificado na figura 3.6 a seguir.

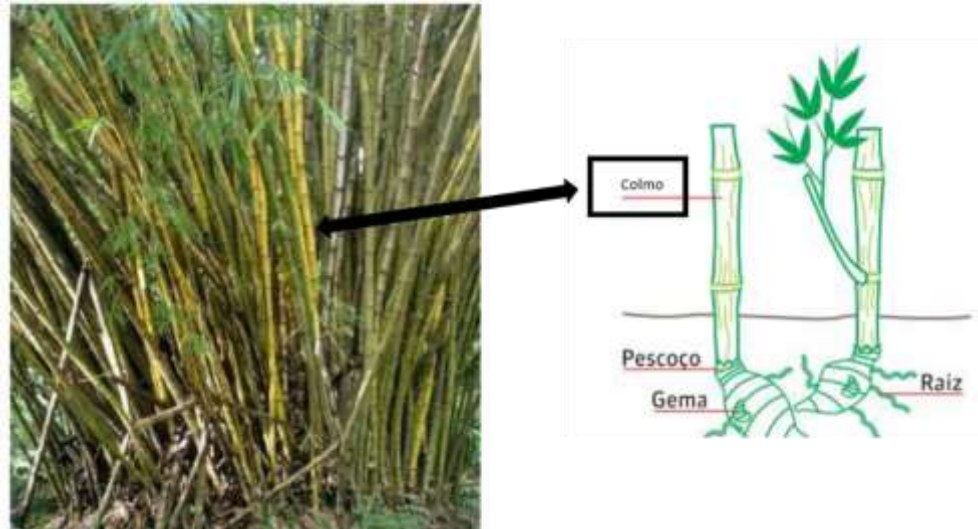


Figura 3.6 – Destaque da secção do colmo de Bambu a ser analisado anatomicamente.

Nesta figura 3.6 é possível identificar a área definida para extração da estrutura da planta para os processos de caracterização a serem feitos por maceração e microscopia. Esse Processo ocorre para a identificação de elementos de vasos, células condutoras, tecidos vasculares, entres outros elementos.

3.2.4 - Caracterização química das Fibras Naturais de Bambu

Esta caracterização foi realizada no Laboratório de Química, Celulose e Energia- LQCE-ESALQ- USP.

Foram analisadas fibras de bambu extraídas manualmente do campus profissional I da Universidade Federal do Pará – UFPA. Os colmos utilizados nas análises foram selecionados e segmentados nas poções do meio, para que se tivesse um maior proveito na extração das fibras, as fibras foram retiradas e levadas à estufa $\pm 103\text{ }^{\circ}\text{C}$ para serem secas, e depois foram moídas e peneiradas em peneira de 40 e 60 MESH, como mostra na figura 3.7.



Figura 3.7 – (a) Fibras de bambu lavado (b) Fibras de bambu moído.

- **Extrativos**

Os extrativos foram determinados utilizando a metodologia da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 14660: Madeira – Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro. 2004.13p. Onde as fibras foram pesadas, separadas em envelopes e colocadas no extrator na sequência tolueno, álcool e água. Como mostra a figura 3.8.

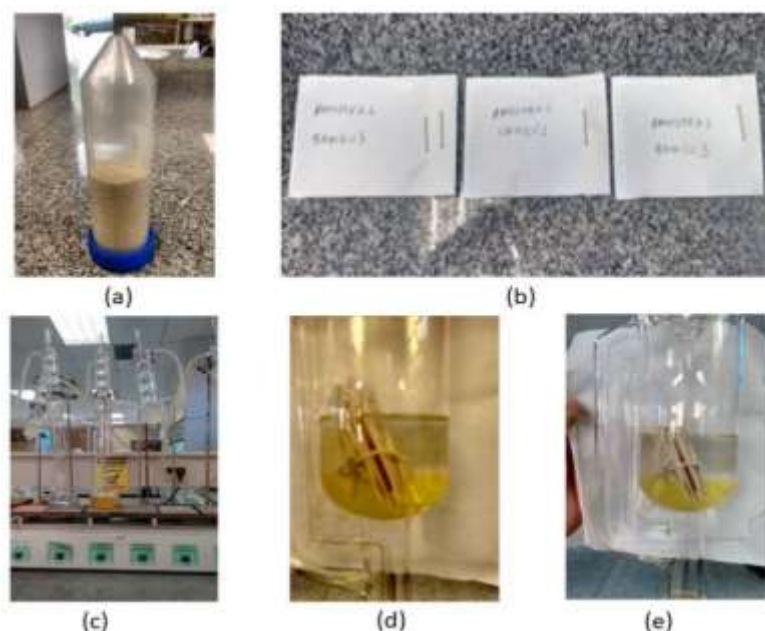


Figura 3.8 – (a) Fibras de bambu pesadas (b) Envelopes de amostras (c) Extrator de tolueno (d) Extrator de álcool (e) Extrator de água.

O teor de lignina foi determinado com o auxílio do espectrofotômetro, onde as fibras foram hidrolisadas com ácido sulfúrico 72% e colocadas no banho Maria a 30° por uma hora, depois foram lavadas com água quente e filtradas. O resíduo de lignina foi levado à estufa por 24 horas a $\pm 103^{\circ}\text{C}$ e o resíduo da filtragem foi levado para análise no espectrofotômetro, como mostra a figura 3.9.

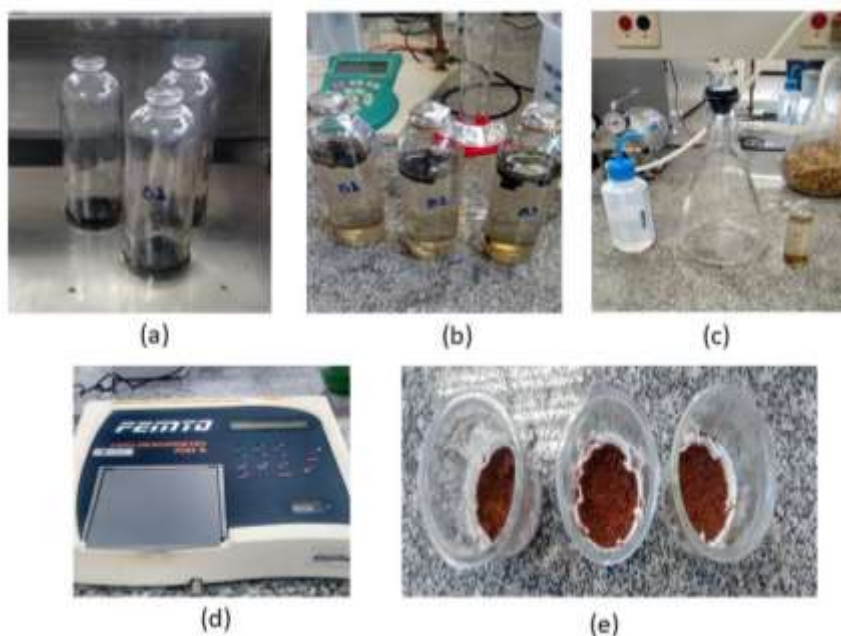


Figura 3.9 – (a) fibras hidrolisadas com H_2SO_4 (b) Amostra para o banho Maria (c) Lavagem (d) Espectrofotômetro (e) Resíduo da filtragem

O teor de holocelulose foi determinado pela equação (05):

$$TH = 100 - (ET + LR + LS) \quad (05)$$

Onde: TH = teor de holocelulose (%); ET = extrativos totais (%); LR = lignina insolúvel (%); Ts = lignina solúvel (%).

3.2.5 - Caracterização Física dos Compósitos Confeccionados

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

Na figura 3.10, a seguir são mostrados os corpos de prova que foram submetidos nas análises por meio de caracterização física.



Figura 3.10– corpos de prova produzidos para caracterização física

Nota-se que as identificações estão de acordo com cada série analisada para as medições referentes a ms , mu e mi , as quais foram utilizadas para os cálculos dos ensaios físicos dos compósitos produzidos.

Depois da produção dos compósitos, foram realizados os ensaios físicos para determinação das propriedades físicas. Essas propriedades foram determinadas de acordo com as seguintes etapas de medições:

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

Na a determinação das propriedades físicas, adotou-se a metodologia utilizada por SANTOS (1989), de acordo com a norma ASTM, 1984-92.

Porosidade Aparente

A medida da porosidade aparente foi determinada pela equação (06):

$$PA (\%) = \frac{(M_U - M_S)}{(M_U - M_i)} \times 100 \quad (06)$$

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

Nesta etapa foi realizada a medida de absorção de água efetuada através da seguinte equação (07), a seguinte:

$$AA (\%) = \frac{(M_U - M_S)}{(M_S)} \times 100 \quad (07)$$

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

Massa Específica Aparente

Para a determinação dos valores de massa específica aparente o cálculo utilizado foi através da equação (08).

$$MEA \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{(M_S \times \rho_L)}{(M_U - M_i)} \quad (08)$$

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/cm³).

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 e levados à estufa, a 105° C, durante 24 h. Na sequência foram pesados na balança de precisão (Marca: Bioscale, Modelo: FA 2204, Precisão: ± 0.2 mg) assim definindo - se a massa de sólido seco dos corpos de provas. Os corpos de provas foram então 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 com o corpo de prova) está abaixo do suporte de madeira, conforme mostrado na figura 3.11 abaixo.



Figura 3.11 – Amostragem do ensaio físico dos compósitos

3.2.6 - Caracterização Mecânica dos Compósitos Confeccionados

Neste trabalho as características mecânicas foram analisadas por meio de ensaios de tração, flexão e tenacidade ao impacto.

3.2.6.1 - Ensaio de Resistência à Tração

Para a caracterização mecânica por meio do ensaio de tração, foi utilizada a norma ASTM D3039 e foram adotadas as seguintes medidas como demonstrado esquematicamente na Figura 3.12.

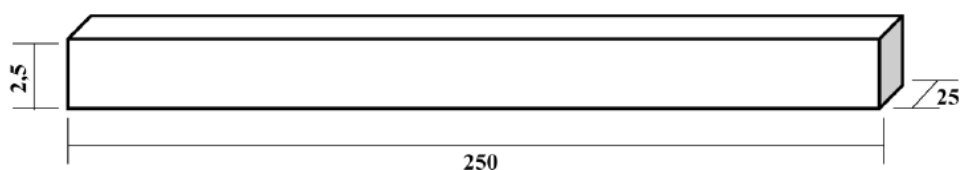


Figura 3.12 – Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de tração.

Na realização dos ensaios foi utilizada 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. Conforme mostrada na figura 3.13 a seguir.



Figura 3.13 – Máquina universal de ensaio, utilizada para os ensaios de tração dos compósitos produzidos

3.2.6.2 - Ensaio de Resistência à Flexão

Com base nas curvas carga-deslocamento e conhecendo as dimensões dos corpos de prova é possível determinar a resistência do compósito a flexão (σ) e o módulo de elasticidade na flexão (E). Conforme descrito na equação (09) seguir.

$$\sigma = \frac{3PL}{2BW^2} \quad (09)$$

Onde denomina-se como sendo P a carga máxima atingida, L o vão entre os apoios, B e W a espessura e largura dos corpos de prova, respectivamente. Já para o cálculo do módulo de elasticidade na flexão (E) utiliza-se a equação (10).

$$E = \frac{mL^3}{4BW^3} \quad (10)$$

Onde estabelece-se que m a inclinação da curva da carga-deflexão.

Para este ensaio são estabelecidos 3 (três) pontos dos materiais em estudo de acordo com a norma ASTM D790-10, com as dimensões dos corpos de prova de acordo como mostra esquematicamente na Figura 3.14.

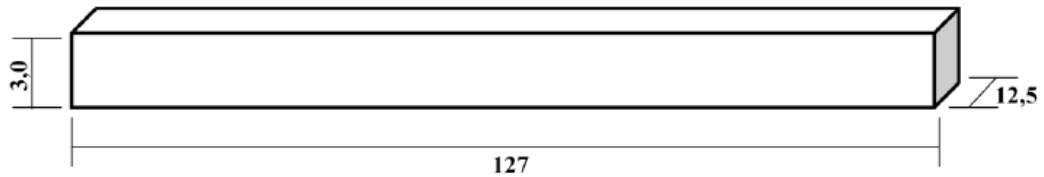


Figura 3.14 – Esquemático das dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de flexão.

Neste ensaio foi utilizada uma máquina de ensaio da fabricante EMIC, modelo DL 500 com célula de carga de 5 kN. A velocidade adotada de deslocamento do cabeçote da máquina foi de 2 mm/min. E o ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica no campus da Universidade Federal do Pará na cidade de Tucuruí - CAMTUC. Esta máquina é mostrada na figura 3.15, a seguir.



Figura 3.15 – Máquina para o ensaio de flexão.

3.2.6.3 - Ensaio de resistência ao Impacto Charpy

Foi utilizada, para os ensaios de impacto, a norma ASTM 6110-04 com as dimensões de acordo como demonstrado esquematicamente na Figura 3.16. Com a fabricação de 8 (oito) corpos de prova para cada série testada.



Figura 3.16 – Esquemático, em mm, dos corpos de prova para ensaios de impacto

Na figura 3.17 ilustrada a seguir é mostrada a máquina de ensaio de resistência ao impacto Charpy utilizada neste trabalho.



Figura 3.17 –Máquina de ensaio de resistência ao impacto.

Esta máquina mostrada na figura 3,17 tem as seguintes especificações: o equipamento foi o Testador de impacto de pêndulo que tem a capacidade de trabalho 150 Nm, com martelo com massa de 9,9 Kg, velocidade de impacto de 5,5 m/s, comprimento do pêndulo de 840 mm e ângulo de queda de 150°.

3.2.7 – Confecção dos Compósitos

Para a produção dos compósitos foi utilizado o método de confecção *Hand lay up*, o qual denotou eficiência na obtenção das placas, pois com o controle apurado no tempo de mistura dos elementos da matriz, as mesmas apresentaram boa aparência e bom acabamento superficial, resultando em placas com poucos defeitos, sem formação de bolhas e presença de vazios. A Figura 3.18 mostra-se alguns compósitos de matriz polimérica produzidos.

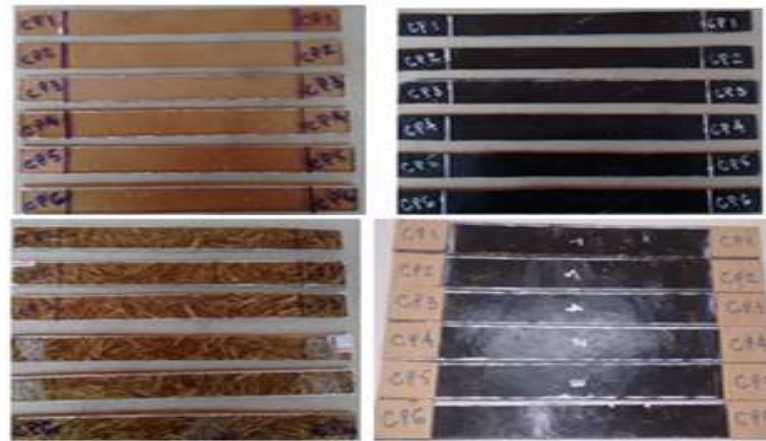


Figura 3.18 – Corpos de prova produzidos

3.2.8 - Ensaio de Resistência à Chama

3.2.8.1 - Norma ASTM D635-10

Os ensaios de resistência a chama foram realizados em aparato montado na Usina de Materiais (USIMAT) do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) localizado na UFPA. Conforme mostrado na figura 3.19.

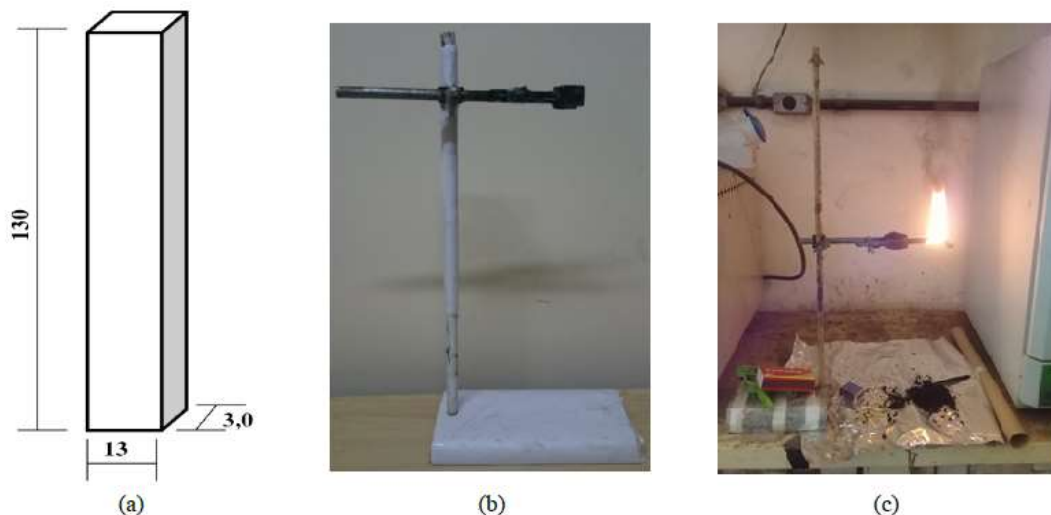


Figura 3.19 – ASTM D635-10 (a) Dimensões (em mm) dos corpos de prova, (b) aparato utilizado para realização dos ensaios e (c) corpos de prova sendo ensaiados

3.2.9 - Caracterização Morfológica dos Compósitos Confeccionados

3.2.9.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura - (MEV)

Para as análises das superfícies de fratura, relacionadas a superfície de fratura, foram feitas por meio de MEV pelos equipamentos que estão instalados no Laboratório de Materiais do Instituto Federal do Pará – IFPA (a), Campus Belém e no Laboratório de Engenharia Química (LEQ), localizado na Universidade Federal do Pará, Campus Belém. Estes equipamentos são identificados na figura 3.20 abaixo.



(a)



(b)

Figura 3.20 - (a) Microscópio Eletrônico de Varredura do IFPA e (b) do LEQ – UFPA.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS

4.1.1 - Caracterização Mineralógica

4.1.1.1 - Difração de Raios-X (DRX)

- **DRX do resíduo de Cobre**

Os resultados obtidos após a análise difratométrica realizada na amostra de resíduo de cobre, é mostrada na Figura 4.1. A qual 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).

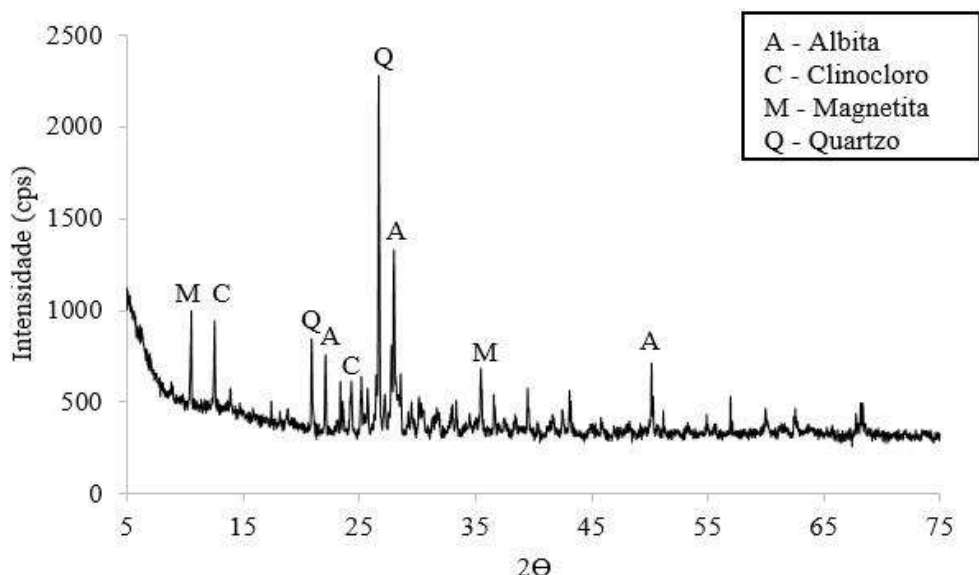


Figura 4.1 - Difração de Raios – X do resíduo de cobre.

Nestes resultados observa-se a presença dos materiais característicos do resíduo de cobre, em destaque a presença de quartzo, o qual já identificado por EL BANNA (2017). Este elemento gera uma dureza consistente para a matriz polimérica produzida.

- DRX de Lama Vermelha

Na figura 4.2, são apresentadas as composições mineralógicas da lama vermelha por meio do DRX. Observa-se os principais componentes mineralógicos de acordo com suas fichas PDF em ordem decrescente de intensidade, a Hematita (H), Sodalita (S), Gibsita (G), Goethita (Gh), e Anatásio (A).

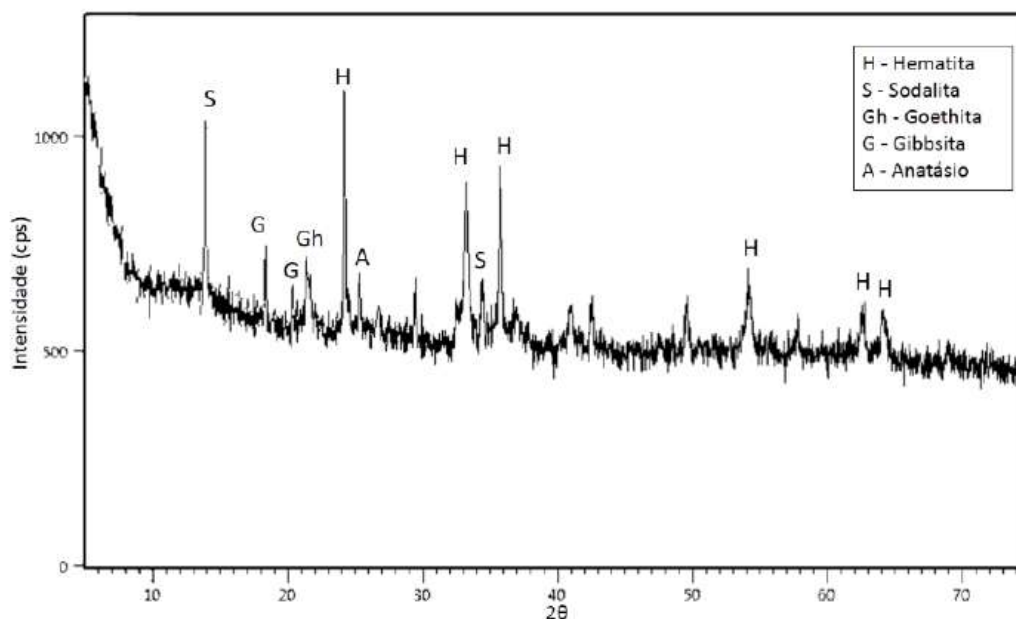


Figura 4.2 - Difração de Raios – X da lama vermelha.

Estes resultados estão de acordo com as composições mineralógicas encontradas por COSTA, 2016.

- DRX do Resíduo de Caulim

Na figura 4.3, observa-se a análise difratométrica realizada na amostra de resíduo de caulim, na qual determinou-se sua composição mineralógica. Nesta análise foram identificados os componentes como: Caulinita (C) – PDF 96-900-9235, e também quartzo (Q) – PDF 96-900-5033.

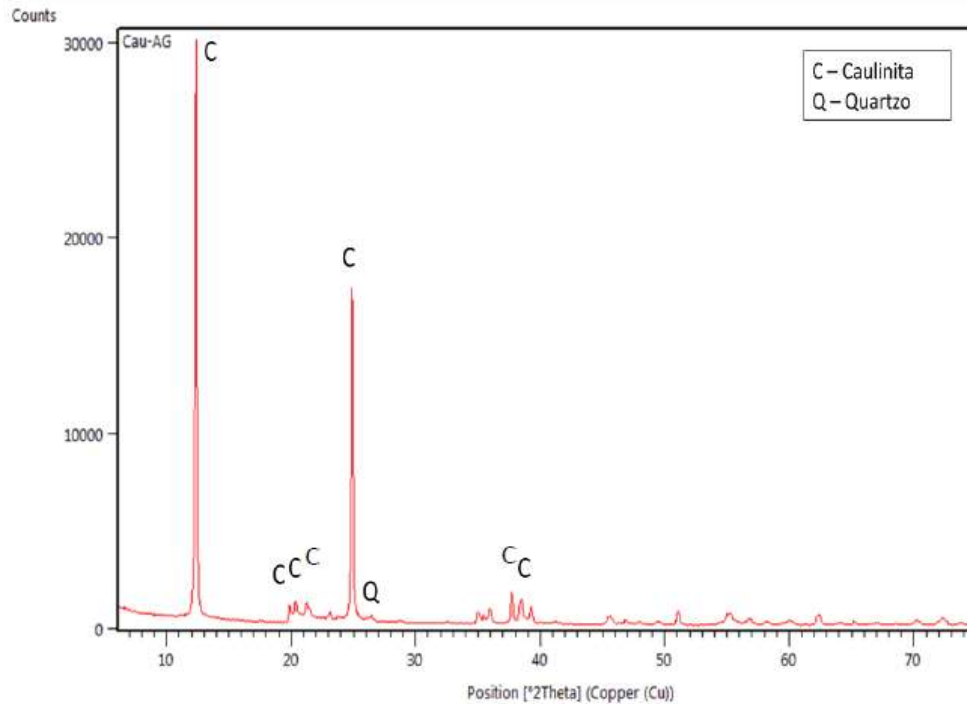


Figura 4.3 - Difração de Raios – X do resíduo de Caulim

4.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E ANATÔMICA DO COLMO DO BAMBU

Nesta seção são mostrados os resultados provenientes dos processos análise por eio de microscopia com a identificações da secção transversal, com vista superior do colmo, mostradas na figura 4.4.

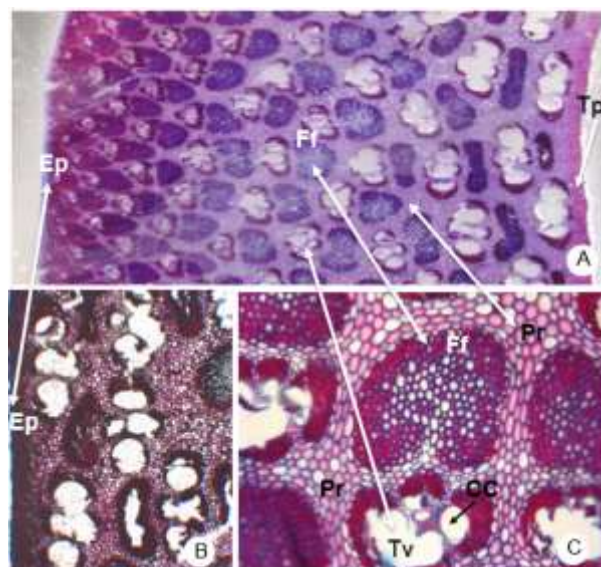


Figura 4.4: Seção transversal do colmo de *Bambusa vulgaris* Schard. ex J, C. Wendl. (Poaceae). A - Vista geral; B - Região contendo epiderme; C - Detalhe dos feixes de fibras e tecidos vasculares.

Na figura 4.4 (A) observa-se a vista geral onde a epiderme, onde nota-se a maior concentração de fibras presentes no colmo, além do tecido periférico a medula fistulosa com os feixes de fibras e parênquima ao logo do colmo. Já em 4.4 (B) tem-se uma ampliação para identificação da epiderme com a presença de fibras. Em 4.4 (C) a presença dos tecidos vasculares, juntamente com a formação das células condutoras de água.

O processo de maceração no bambu também ajudou na identificação de constituintes importantes, como mostrado na figura 4.5.

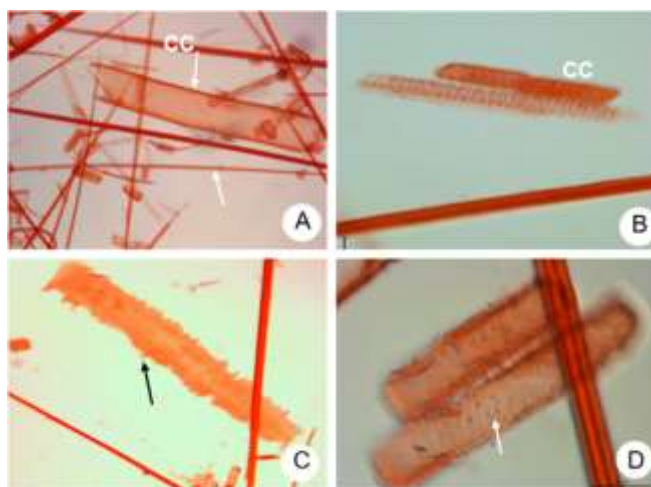


Figura 4.5 - Maceração do colmo de *Bambusa vulgaris* Schard. ex J, C. Wendl. (Poaceae).

Identificou-se na figura 4.5 em (A) uma vista geral das células componentes do tecido; já em 4.5 (B) mostra-se o detalhe das células condutoras de água com paredes distintas e fibra; em 4.5 (C) a Célula com parede rompida provavelmente por impregnação de sílica e em 4.5 (D) os Elementos de vaso e CC: célula condutora.

4.3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS FIBRAS NATURAIS

Os resultados da caracterização química do Bambu (*Bambusa Vulgaris*) são representados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Teores químicos das fibras de bambu

Parâmetro	B1 (%)	B2 (%)	Media (%)
Teor de Extrativos	7,6	7,5	7,6
Teor de Lignina Insolúvel	16,4	16,1	16,3
Teor de Lignina Solúvel	1,6	1,8	1,7
Teor de Lignina Total	18,0	17,9	18,0
Teor de Holocelulose	74,4	74,6	74,5

O termo holocelulose é usado para indicar o produto obtido após a extração da lignina; segundo Antal (1983) a holocelulose representa de 65% a 75% da madeira e a lignina corresponde de 15% a 30% do material lenhoso, dessa forma considerou-se que resultados obtidos na análise estão dentro do esperado, se mostrando eficiente; observa-se que o teor de lignina é inversamente proporcional ao teor de holocelulose. Os extrativos representam um percentual baixo na composição geral do material, porém abrangem uma gama considerada de compostos químicos, o teor de extrativos encontrados podem ser facilmente removidos, dessa forma se mostrando eficiente.

4.4 - CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS

4.4.1 - Caracterização Física

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

- **Matriz polimérica e Fibras de Bambu**

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, são apresentados na tabela 4.2 a seguir

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com as fibras de bambu.

Fração mássica dos reforços (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
MP	0,25 ($\pm 0,03$)	0,30 ($\pm 0,04$)	1,20 ($\pm 0,09$)
1 FB 15 NT	0,48 ($\pm 0,04$)	0,58 ($\pm 0,03$)	1,19 ($\pm 0,08$)
2 FB 15 NT	0,55 ($\pm 0,04$)	0,65 ($\pm 0,05$)	1,19 ($\pm 0,08$)
3 FB 15 NT	0,80 ($\pm 0,06$)	0,95 ($\pm 0,08$)	1,18 ($\pm 0,07$)
1 FB 15 TR	0,47 ($\pm 0,04$)	0,57 ($\pm 0,06$)	1,20 ($\pm 0,08$)
2 FB 15 TR	0,41 ($\pm 0,03$)	0,49 ($\pm 0,04$)	1,20 ($\pm 0,09$)
3 FB 15 TR	0,32 ($\pm 0,02$)	0,39 ($\pm 0,02$)	1,20 ($\pm 0,07$)
1 FB 30 NT	0,39 ($\pm 0,03$)	0,47 ($\pm 0,05$)	1,19 ($\pm 0,08$)
2 FB 30 NT	0,51 ($\pm 0,04$)	0,61 ($\pm 0,07$)	1,19 ($\pm 0,09$)
3 FB 30 NT	0,61 ($\pm 0,06$)	0,72 ($\pm 0,06$)	1,19 ($\pm 0,08$)
1 FB 30 TR	0,26 ($\pm 0,03$)	0,31 ($\pm 0,03$)	1,20 ($\pm 0,07$)
2 FB 30 TR	0,31 ($\pm 0,05$)	0,37 ($\pm 0,04$)	1,20 ($\pm 0,09$)
3 FB 30 TR	0,35 ($\pm 0,04$)	0,42 ($\pm 0,03$)	1,20 ($\pm 0,09$)

A análise 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. Nos resultados mostrados na Tabela 4.2, 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 tem a capacidade de percolar a fibra e a matriz em velocidades diferentes e pode também interferir na interface fibra/matriz (onde pode provocar um descolamento da mesma). No mecanismo de absorção de água é esperado em fibras naturais, pois as mesmas possuem características hidrofílicas. Já na porosidade aparente do compósito, observa-se que houve um aumento na medida que é aumentado o teor de fibras no compósito, o que pode ser justificado pela influência das fibras na matriz polimérica. Com o tratamento das fibras, tem-se 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. No gráfico da Figura 4.6 observa-se um comparativo entre os resultados encontrados da matriz polimérica plena e compósitos poliméricos com reforço de fibras de bambu.

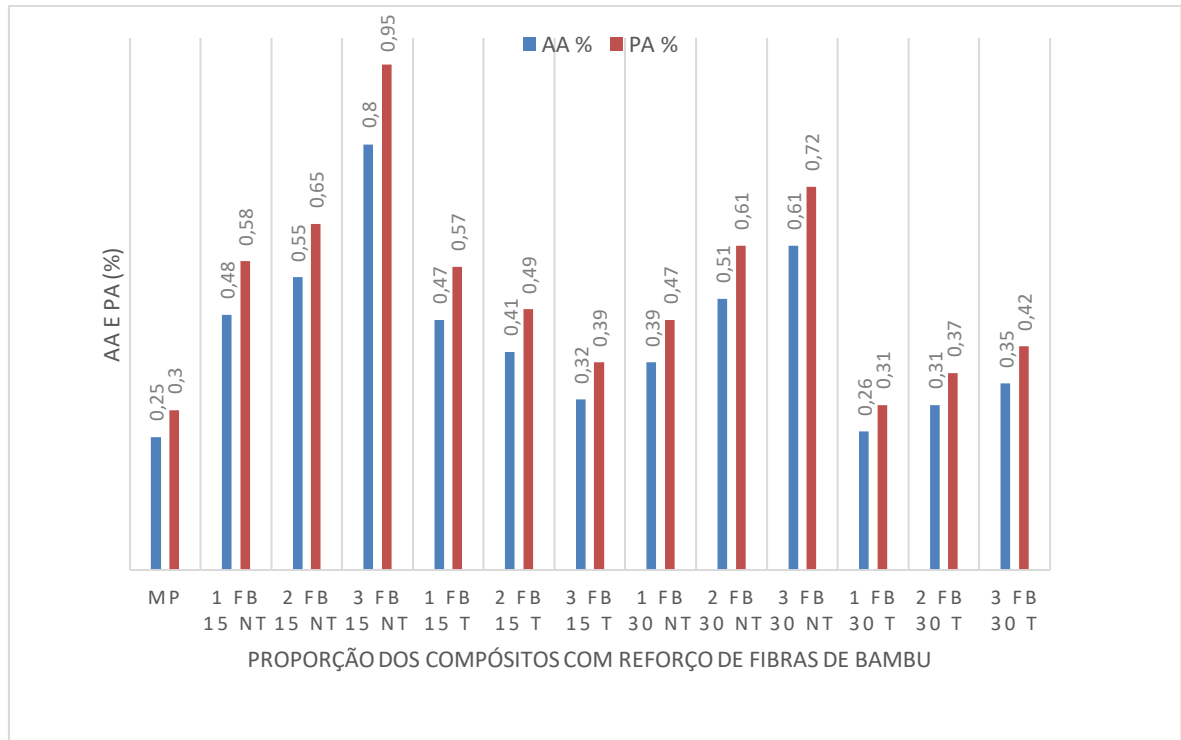


Figura 4.6 - AA e PA versus proporções de compósitos com reforço de fibras de bambu.

A seguir é mostrado o gráfico da Figura 4.7, onde é mostrado um comparativo entre os resultados encontrados de MEA para os compósitos estudados.

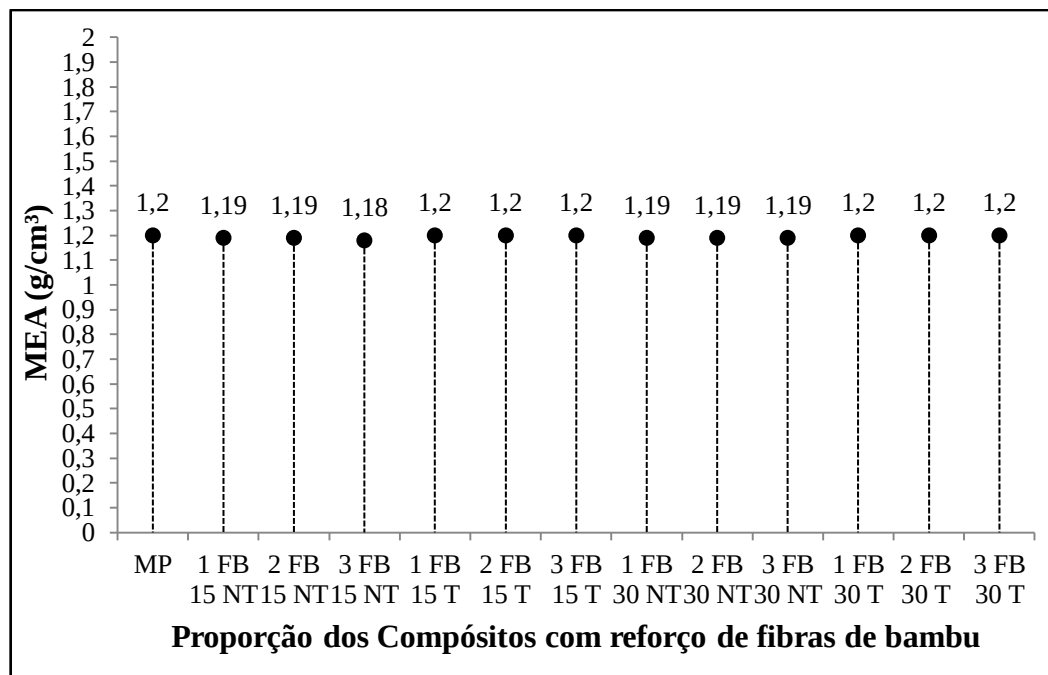


Figura 4.7 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com reforço de fibras de bambu.

De acordo com o gráfico da figura 4.7, nota-se a massa específica aparente do compósito em relação a matriz plena, onde 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.

- **Matriz Polimérica com resíduo de cobre**

Na Tabela 4.3 estão 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 4.3 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com resíduos de cobre

Fração mássica dos reforços (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
MP	0,25 ($\pm 0,03$)	0,30 ($\pm 0,04$)	1,20 ($\pm 0,09$)
10 RCU	0,25 ($\pm 0,04$)	0,32 ($\pm 0,05$)	1,27 ($\pm 0,07$)
20 RCU	0,24 ($\pm 0,04$)	0,34 ($\pm 0,06$)	1,36 ($\pm 0,07$)
30 RCU	0,17 ($\pm 0,01$)	0,26 ($\pm 0,02$)	1,47 ($\pm 0,06$)
40 RCU	0,22 ($\pm 0,03$)	0,36 ($\pm 0,04$)	1,57 ($\pm 0,08$)
50 RCU	0,20 ($\pm 0,02$)	0,34 ($\pm 0,03$)	1,71 ($\pm 0,08$)

Nos resultados de AA na tabela 4.3, observando-se 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.

Na figura 4.8 mostra-se graficamente um comparativo entre os resultados encontrados da matriz polimérica plena e compósitos poliméricos com incorporação de resíduo de cobre.

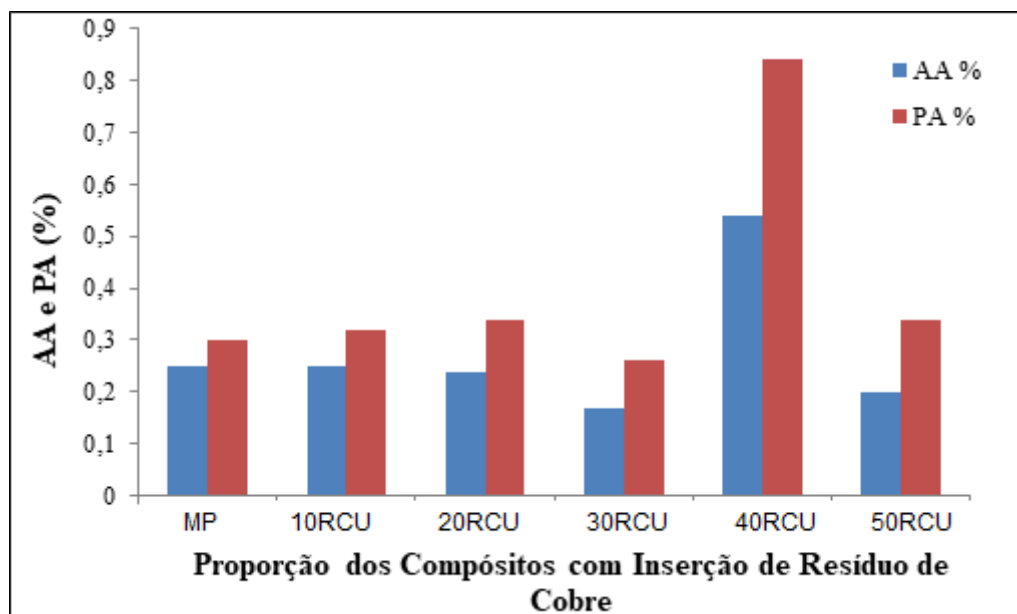


Figura 4.8 - Gráfico AA e PA versus proporções de compósitos com incorporação de resíduos de cobre

No gráfico da Figura 4.9 mostra-se um comparativo entre os resultados encontrados de MEA para os compósitos estudados.

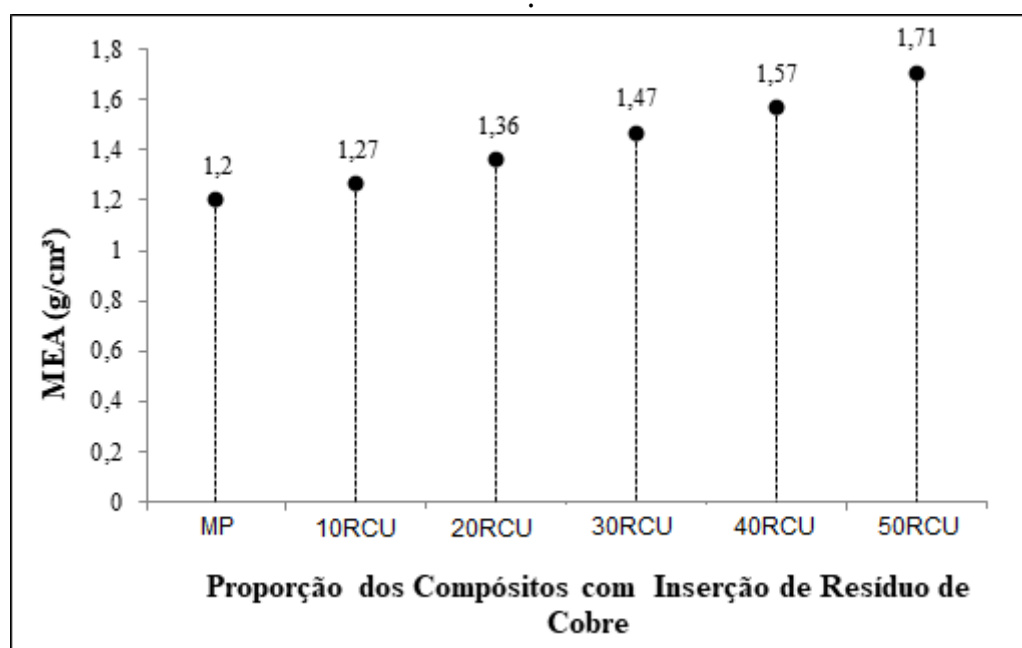


Figura 4.9 - Gráfico MEA versus Proporções de compósitos com incorporação de resíduo de cobre

Na figura 4.9 nota-se a massa específica aparente, MEA, em que ocorre um aumento efetivo, aumentando-se a fração dos resíduos de cobre no compósito, o que pode ser explicado pela massa específica do resíduo ser elevada, ocasionando o aumento da massa específica aparente do compósito confeccionado.

- **Matriz Polimérica com resíduo de cobre e fibras de bambu**

Observa-se na tabela 4.4 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 4.4 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com resíduo de cobre e fibras de bambu

Fração mássica dos reforços (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)
MP	0,25 (±0,03)	0,30 (±0,04)	1,20 (±0,09)
10RCU/3FB15NT	0,75 (±0,07)	0,95 (±0,05)	1,26 (±0,06)
20RCU/3FB15NT	1,01 (±0,09)	1,34 (±0,06)	1,31 (±0,09)
30RCU/3FB15NT	0,71 (±0,06)	1,03 (±0,05)	1,45 (±0,06)
10RCU/3FB15TR	0,41 (±0,04)	0,54 (±0,04)	1,34 (±0,08)
20RCU/3FB15TR	0,53 (±0,06)	0,73 (±0,04)	1,37 (±0,08)
30RCU/3FB15TR	0,87 (±0,07)	1,28 (±0,05)	1,47 (±0,06)
10RCU/3FB30NT	0,54 (±0,05)	0,73 (±0,03)	1,36 (±0,08)
20 RCU/3FB30NT	0,99 (±0,08)	1,55 (±0,06)	1,56 (±0,07)
30 RCU/3FB30NT	1,18 (±0,09)	1,70 (±0,07)	1,43 (±0,09)
10 RCU/3FB30TR	0,40 (±0,03)	0,51 (±0,03)	1,28 (±0,07)
20 RCU/3FB30TR	0,75 (±0,05)	1,01 (±0,06)	1,35 (±0,09)
30RCU/3FB30TR	0,65 (±0,05)	0,96 (±0,04)	1,48 (±0,08)

Analisando os resultados demonstrados na Tabela 4.4, 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, observou-se que 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 4.10 mostra um comparativo entre os resultados encontrados da matriz polimérica plena e compósitos híbridos.

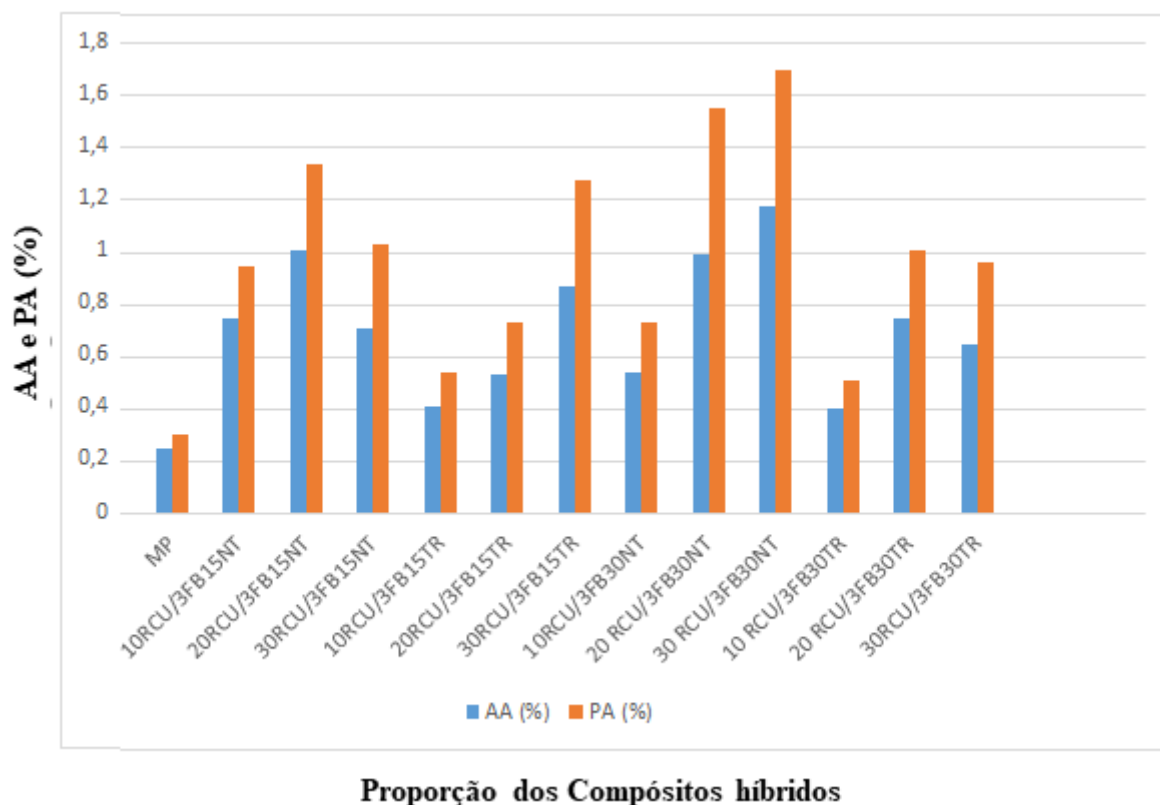


Figura 4.10 - Gráfico AA e PA versus proporções de compósitos com resíduos de cobre e as fibras de bambu

Na figura 4.10 fica mais evidente a influência das fibras e do resíduo de cobre no aumento da AA e PA em relação a matriz plena.

O Gráfico da Figura 4.11 mostra um comparativo entre os resultados encontrados de MEA para os compósitos estudados.

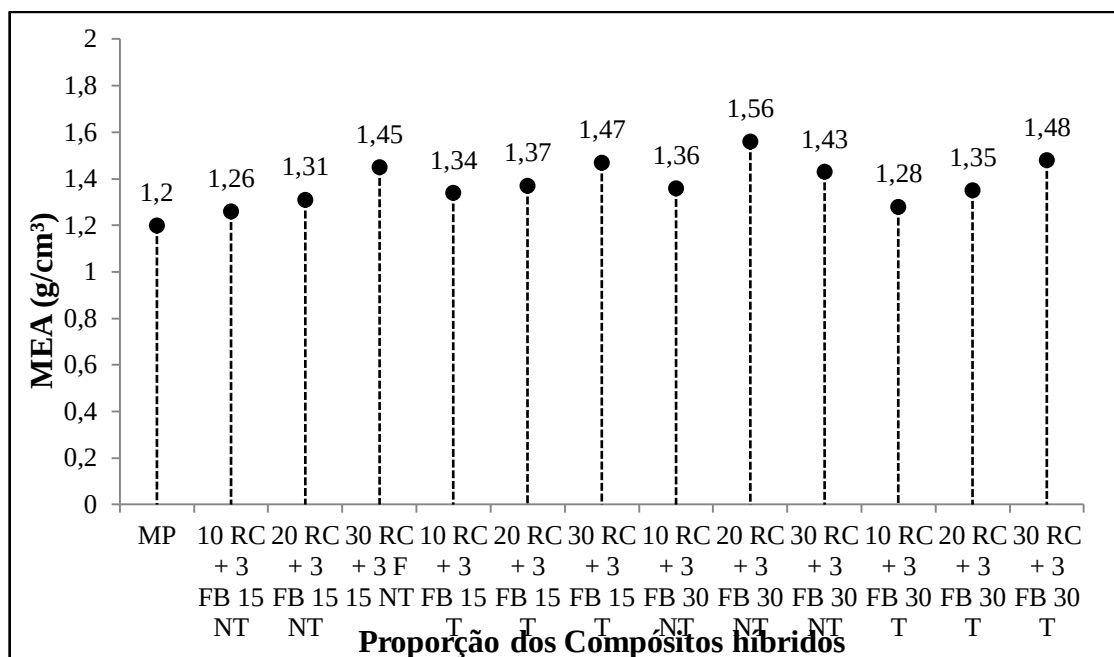


Figura 4.11 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com resíduos de cobre e fibras de bambu

Na Figura 4.11 mostra-se que o aumento da MEA não foi tão significativo, denotando que houve pouca influência das fibras e dos resíduos na matriz para esta série produzida.

- **Matriz Polimérica e Lama Vermelha**

Na próxima tabela 4.5 são mostrados os resultados determinados através dos ensaios de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) da matriz polimérica e Lama Vermelha.

Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA de LV

Fração mássica dos reforços (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)
MP	0,25 (±0,03)	0,30 (±0,04)	1,20 (±0,09)
10 LV	0,29 (±0,05)	0,37 (±0,03)	1,27 (±0,07)
20 LV	0,44 (±0,05)	0,59 (±0,06)	1,36 (±0,09)
30 LV	0,60 (±0,06)	0,87 (±0,07)	1,47 (±0,08)
40 LV	0,63 (±0,05)	0,98 (±0,09)	1,57 (±0,08)

Nota-se, na análise da tabela 4.5, a influência do aumento na quantidade de resíduos influenciando no crescimento das propriedades físicas dos compósitos poliméricos produzidos com a inserção da Lama Vermelha.

Na figura 4.12, a seguir, mostra-se um comparativo dos resultados encontrados da matriz polimérica com incorporação da lama vermelha.

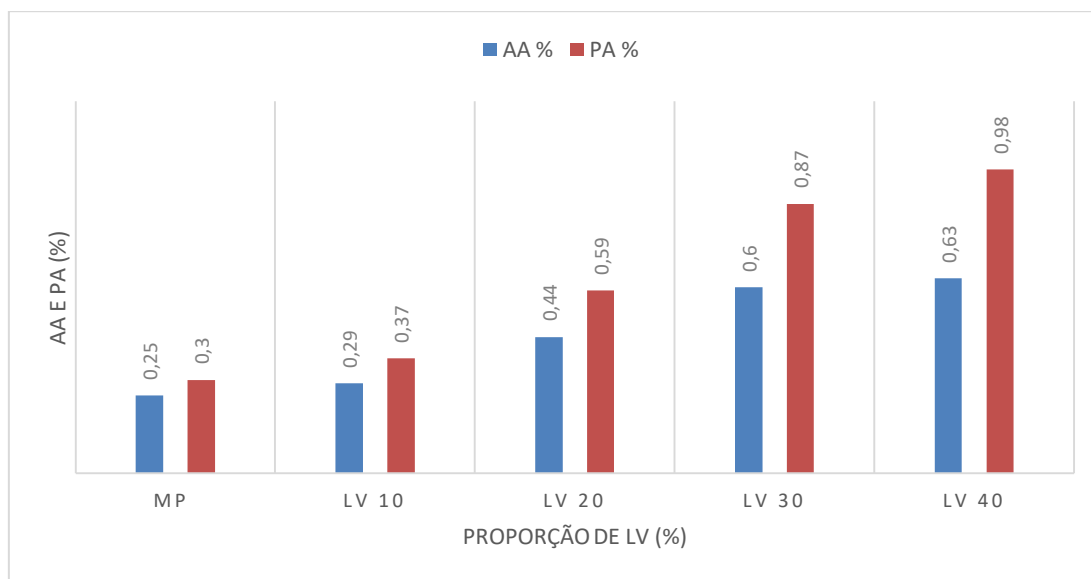


Figura 4.12 - Gráfico AA e PA com proporções de compósitos com incorporação de Lama Vermelha

A seguir na figura 4.13 são mostrados os comportamentos da MEA com o aumento da proporção de lama vermelha dentro da matriz polimérica.

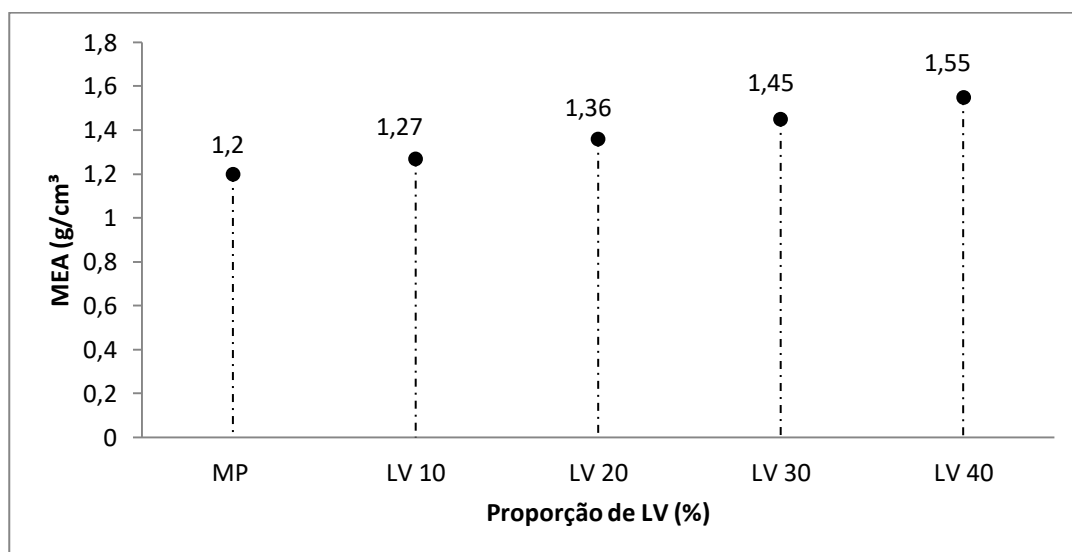


Figura 4.13 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com inserção de lama vermelha.

Na figura 4.13 fica evidente a influência da lama vermelha, resultando em um aumento na MEA proporcional ao aumento da quantidade de resíduo no compósito.

- **Matriz Polimérica com fibras de bambu e Lama Vermelha**

Mostra-se na tabela 4.6, a seguir, os resultados dos ensaios físicos das composições da matriz polimérica com lama vermelha e as fibras curtas de bambu.

Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com LV e fibras de bambu

Fração mássica dos reforços (%)	AA %	PA %	MEA
MP	0,25 ($\pm 0,03$)	0,30 ($\pm 0,04$)	1,20 ($\pm 0,09$)
LV10/3FB15NT	1,16 ($\pm 0,13$)	1,46 ($\pm 0,03$)	1,24 ($\pm 0,03$)
LV20/3FB15NT	1,32 ($\pm 0,12$)	2,94 ($\pm 0,03$)	1,30 ($\pm 0,03$)
LV30/3FB15NT	1,42 ($\pm 0,11$)	2,01 ($\pm 0,03$)	1,41 ($\pm 0,03$)
LV40/3FB15NT	1,58 ($\pm 0,13$)	2,38 ($\pm 0,03$)	1,50 ($\pm 0,10$)
LV10/3FB30NT	1,62 ($\pm 0,11$)	2,45 ($\pm 0,15$)	1,51 ($\pm 0,11$)
LV20/3FB30NT	1,65 ($\pm 0,14$)	1,68 ($\pm 0,09$)	1,39 ($\pm 0,09$)
LV30/3FB30NT	1,25 ($\pm 0,12$)	1,79 ($\pm 0,12$)	1,42 ($\pm 0,08$)
LV40/3FB30NT	1,07 ($\pm 0,10$)	1,34 ($\pm 0,09$)	1,24 ($\pm 0,08$)
LV10/3FB15TR	1,41 ($\pm 0,11$)	1,53 ($\pm 0,11$)	1,32 ($\pm 0,07$)
LV20/3FB15TR	0,70 ($\pm 0,06$)	0,95 ($\pm 0,10$)	1,34 ($\pm 0,09$)
LV30/3FB15TR	1,02 ($\pm 0,08$)	1,46 ($\pm 0,09$)	1,42 ($\pm 0,07$)
LV40/3FB15TR	1,25 ($\pm 0,09$)	1,92 ($\pm 0,11$)	1,53 ($\pm 0,10$)
LV10/3FB30TR	0,84 ($\pm 0,09$)	1,03 ($\pm 0,09$)	1,26 ($\pm 0,08$)
LV20/3FB30TR	0,67 ($\pm 0,07$)	0,92 ($\pm 0,08$)	1,37 ($\pm 0,09$)
LV30/3FB30TR	1,13 ($\pm 0,10$)	1,62 ($\pm 0,09$)	1,43 ($\pm 0,09$)
LV40/3FB30TR	1,24 ($\pm 0,11$)	1,72 ($\pm 0,12$)	1,48 ($\pm 0,11$)

A seguir na figura 4.14 são feitos os comparativos dos valores de PA e AA com a variação das proporções inseridas na placa de compósito.

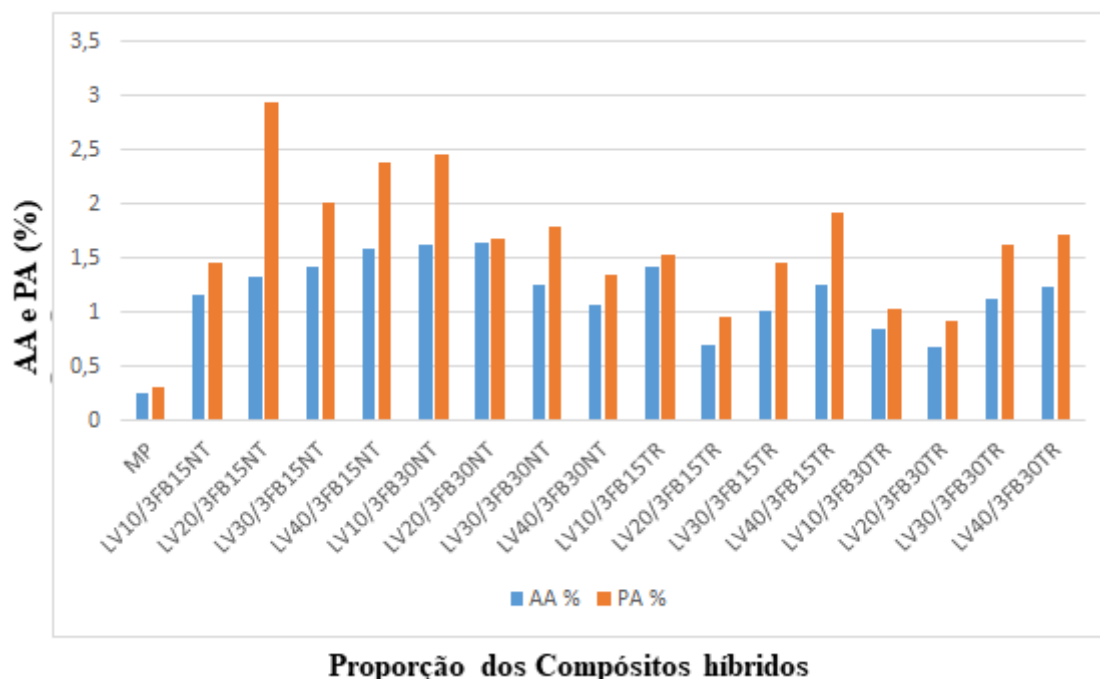


Figura 4.14 - Gráfico AA e PA com proporções de compósitos com incorporação de Lama Vermelha e fibras de bambu

No gráfico da figura 4.15, a seguir, são mostrados os comportamentos da MEA com o aumento da proporção de lama vermelha dentro da matriz polimérica, com adição da fibras de bambu.

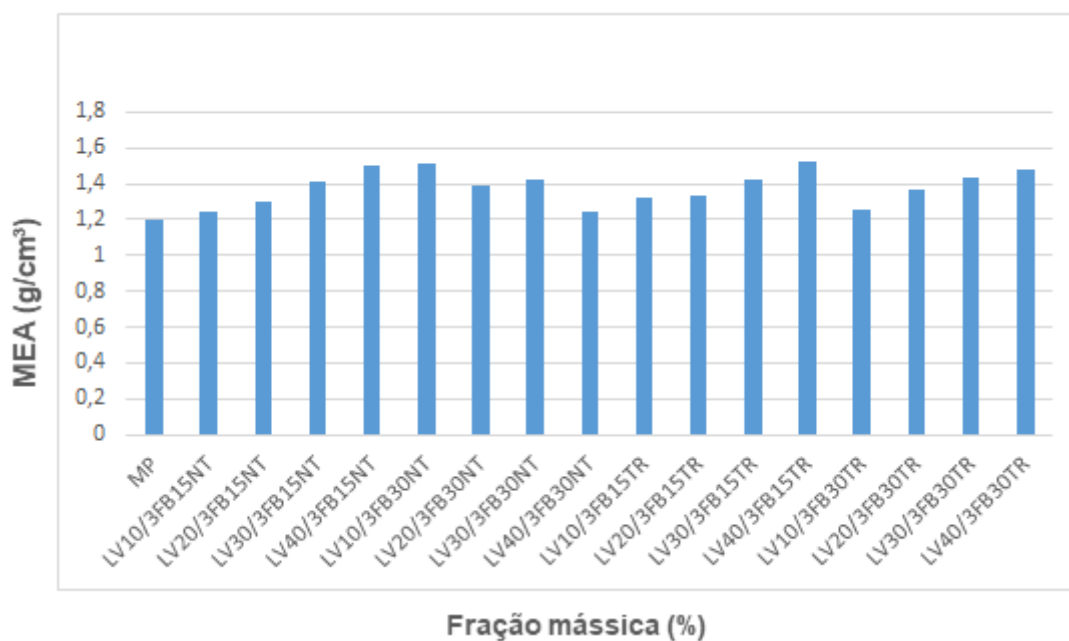


Figura 4.15 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com inserção de lama vermelha e fibras de bambu.

Observa-se na figura 4.15 que a incorporação da lama vermelha, acrescida das fibras de bambu, não teve uma influência significativa no aumento da MEA, fator que pode ser explicado por conta de maior leveza na composição com esses constituintes na matriz. Com valores para poliéster de 1,18 g/cm³, observado nas características da resina e, para Lama Vermelha de 2,11 g/cm³, encontrado por COSTA (2016).

- **Matriz Polimérica e Resíduo de Caulim**

Na tabela 4.7, a seguir, são mostrados os resultados dos ensaios físicos para a série de compósitos com a adição do resíduo de caulim.

Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA de RCA

Fração mássica dos reforços (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)
MP	0,62 (±0,05)	0,67 (±0,09)	1,26 (±0,08)
10 RCA	0,96 (±0,07)	0,56 (±0,04)	1,44 (±0,04)
20 RCA	0,45 (±0,03)	0,82 (±0,06)	1,65 (±0,06)
30 RCA	0,41 (±0,02)	0,48 (±0,03)	1,87 (±0,03)
40 RCA	0,32 (±0,04)	0,35 (±0,04)	2,09 (±0,09)

Na figura 4.16, a seguir, mostra-se um comparativo dos resultados encontrados da matriz polimérica com incorporação da lama vermelha.

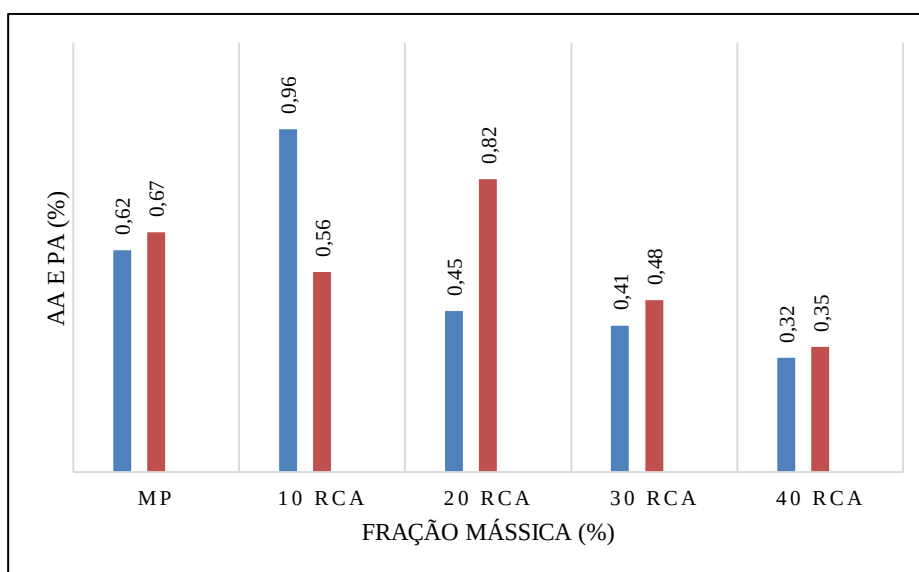


Figura 4.16 - Gráfico AA e PA com proporções de compósitos com incorporação de Resíduo de Caulim

A seguir na figura 4.17 são mostrados os comportamentos da MEA com o aumento da proporção de Resíduo de Caulim dentro da matriz polimérica.

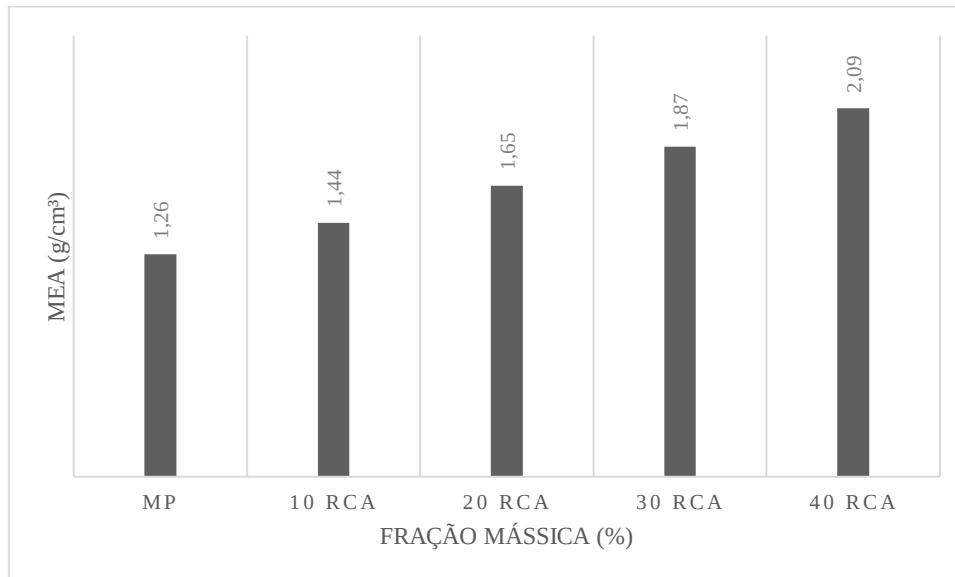


Figura 4.17 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com inserção de Resíduo de Caulim

Na análise da figura 4.17, nota-se o aumento progressivo da massa específica aparente com a inserção do resíduo de caulim, o que é justificável por conta de a massa específica desse resíduo apresentar um valor de 2,60 g/cm³, conforme observado por COSTA (2016).

- **Matriz Polimérica com fibras de bambu e Resíduo de Caulim**

Na tabela 4.8 são identificados os resultados dos ensaios físicos para os compósitos com incorporação de resíduo de caulim e as fibras de bambu.

Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de AA, PA e MEA com Resíduo de Caulim e fibras de bambu

Fração mássica dos reforços (%)	AA %	PA %	MEA
MP	0,62 ($\pm 0,05$)	0,67 ($\pm 0,09$)	1,26 ($\pm 0,09$)
RCA10/3FB15NT	1,27 ($\pm 0,07$)	1,16 ($\pm 0,04$)	1,13 ($\pm 0,10$)
RCA20/3FB15NT	1,22 ($\pm 0,09$)	1,93 ($\pm 0,08$)	1,24 ($\pm 0,12$)
RCA30/3FB15NT	1,29 ($\pm 0,08$)	1,67 ($\pm 0,07$)	1,64 ($\pm 0,17$)
RCA40/3FB15NT	1,36 ($\pm 0,09$)	1,98 ($\pm 0,09$)	1,43 ($\pm 0,12$)
RCA10/3FB30NT	0,98 ($\pm 0,04$)	1,93 ($\pm 0,08$)	1,55 ($\pm 0,13$)
RCA20/3FB30NT	1,32 ($\pm 0,09$)	1,45 ($\pm 0,03$)	1,17 ($\pm 0,11$)
RCA30/3FB30NT	1,48 ($\pm 0,12$)	1,74 ($\pm 0,04$)	1,26 ($\pm 0,08$)
RCA40/3FB30NT	1,74 ($\pm 0,13$)	1,39 ($\pm 0,05$)	1,28 ($\pm 0,09$)
RCA10/3FB15TR	1,12 ($\pm 0,11$)	1,64 ($\pm 0,11$)	1,26 ($\pm 0,09$)
RCA20/3FB15TR	0,89 ($\pm 0,01$)	0,97 ($\pm 0,01$)	1,39 ($\pm 0,11$)
RCA30/3FB15TR	1,14 ($\pm 0,09$)	1,58 ($\pm 0,09$)	1,49 ($\pm 0,12$)
RCA40/3FB15TR	1,29 ($\pm 0,11$)	1,83 ($\pm 0,15$)	1,56 ($\pm 0,15$)
RCA10/3FB30TR	0,95 ($\pm 0,09$)	1,09 ($\pm 0,03$)	1,21 ($\pm 0,12$)
RCA20/3FB30TR	1,13 ($\pm 0,11$)	1,45 ($\pm 0,12$)	1,67 ($\pm 0,13$)
RCA30/3FB30TR	1,19 ($\pm 0,10$)	1,52 ($\pm 0,11$)	1,84 ($\pm 0,11$)
RCA40/3FB30TR	1,21 ($\pm 0,10$)	1,82 ($\pm 0,14$)	1,92 ($\pm 0,13$)

Na figura 4.18, a seguir, mostra-se um comparativo dos resultados encontrados da matriz polimérica com incorporação do Resíduo de Caulim e as fibras de bambu

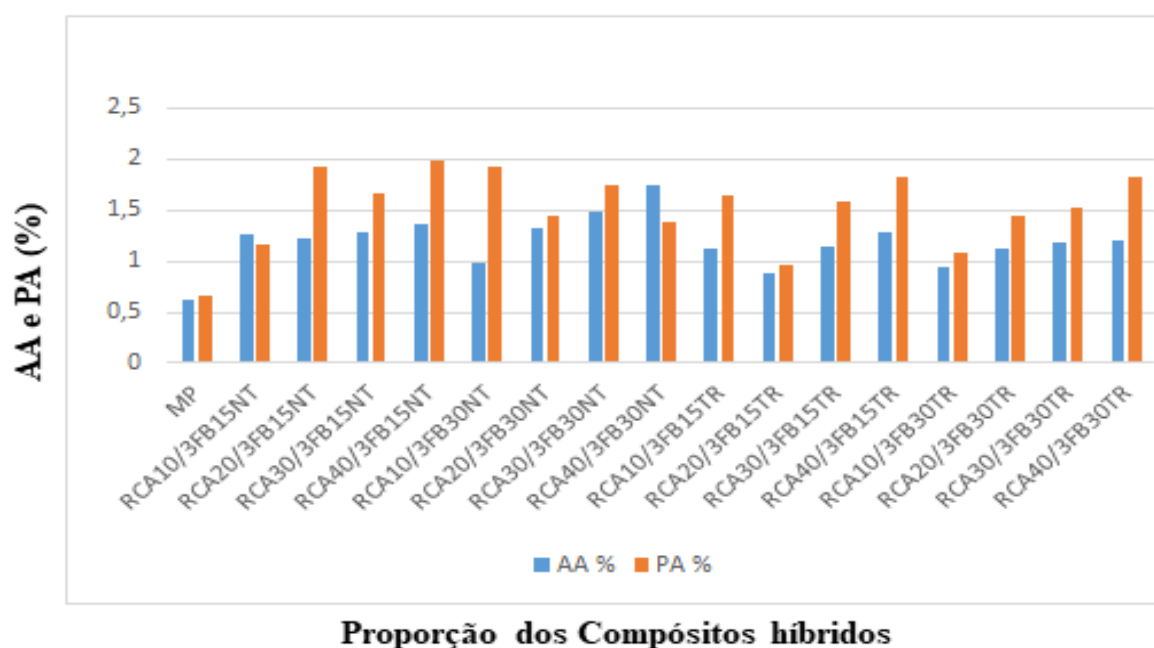


Figura 4.18 - Gráfico AA e PA com proporções de compósitos com incorporação de Resíduo de Caulim e fibras de bambu

A seguir, na figura 4.19, são mostrados os comportamentos da MEA com o aumento da proporção de Resíduo de Caulim e fibras de bambu na matriz polimérica.

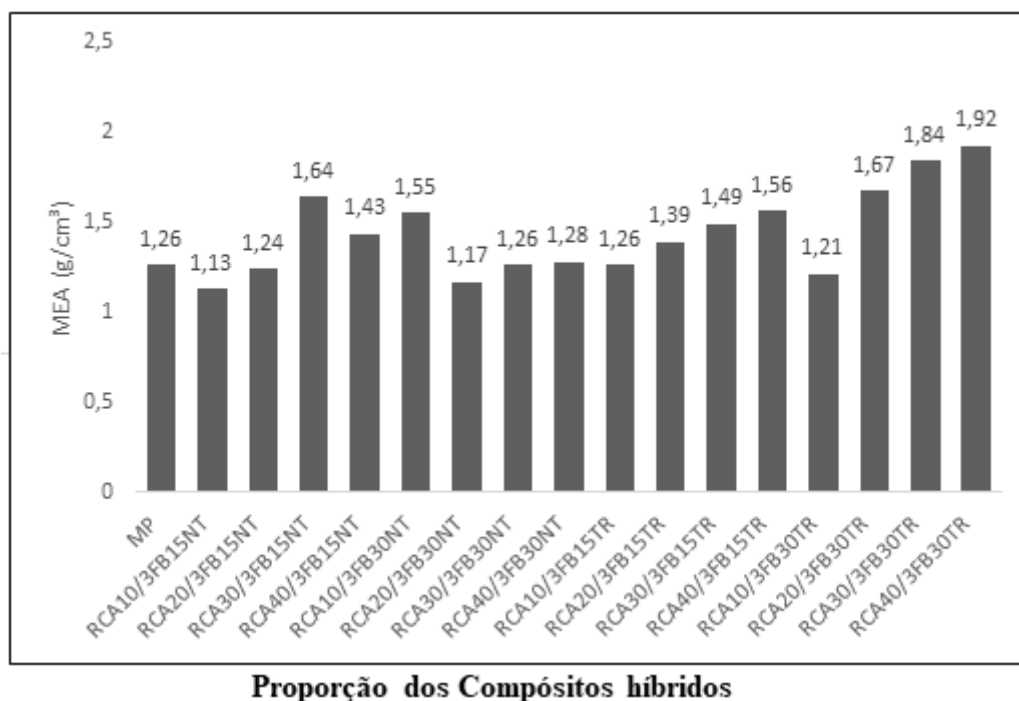


Figura 4.19 - Gráfico MEA versus proporções de compósitos com inserção de Resíduo de Caulim e as fibras de bambu

Na análise da figura 4.19, representada graficamente, é importante evidenciar o grande aumento da massa específica aparente com a inserção das fibras de bambu e o resíduo de caulim, chegando a ser 65,6% no compósito de proporção RCA40/3FB30TR e relação à MP.

4.4.2 - Caracterização Mecânica

4.4.2.1 - Ensaio de Resistência à Tração

- **Matriz Polimérica e Fibras de bambu 15 mm sem tratamento**

Nos compósitos poliméricos com reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas foram avaliadas quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados conforme a Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - 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)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	19,54 ($\pm$ 3,05)	4,84	0,81
FB15mmNT	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

Analisando a tabela 4.9, 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.

Na figura 4.20, observa-se 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.

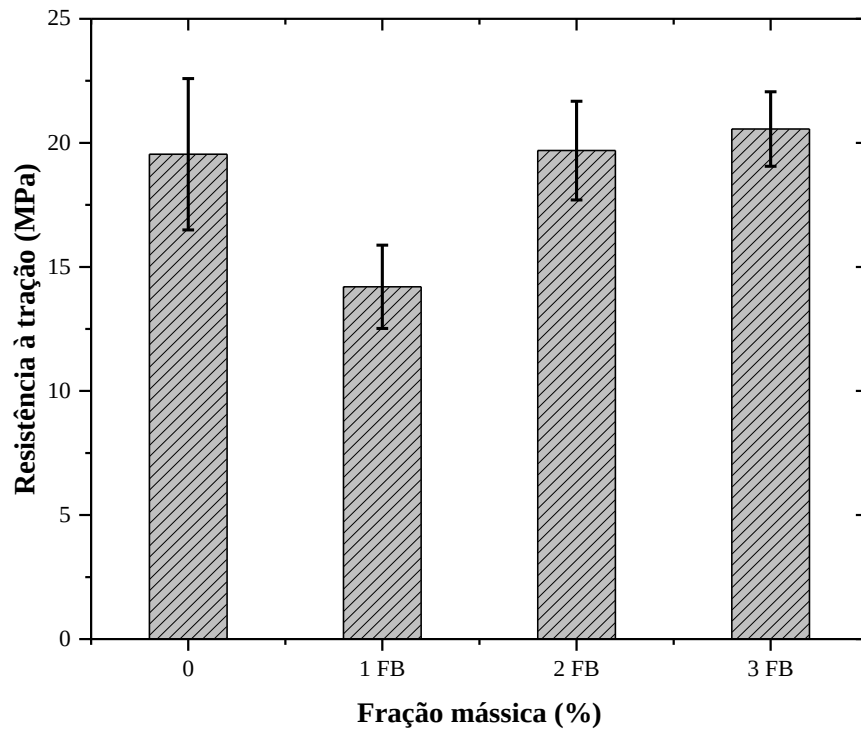


Figura 4.20 - Resistência à tração do material compósito em função da fração mássica de fibras de bambu de 15 mm não tratadas.

Na Figura 4.21 mostram-se as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm não tratadas.

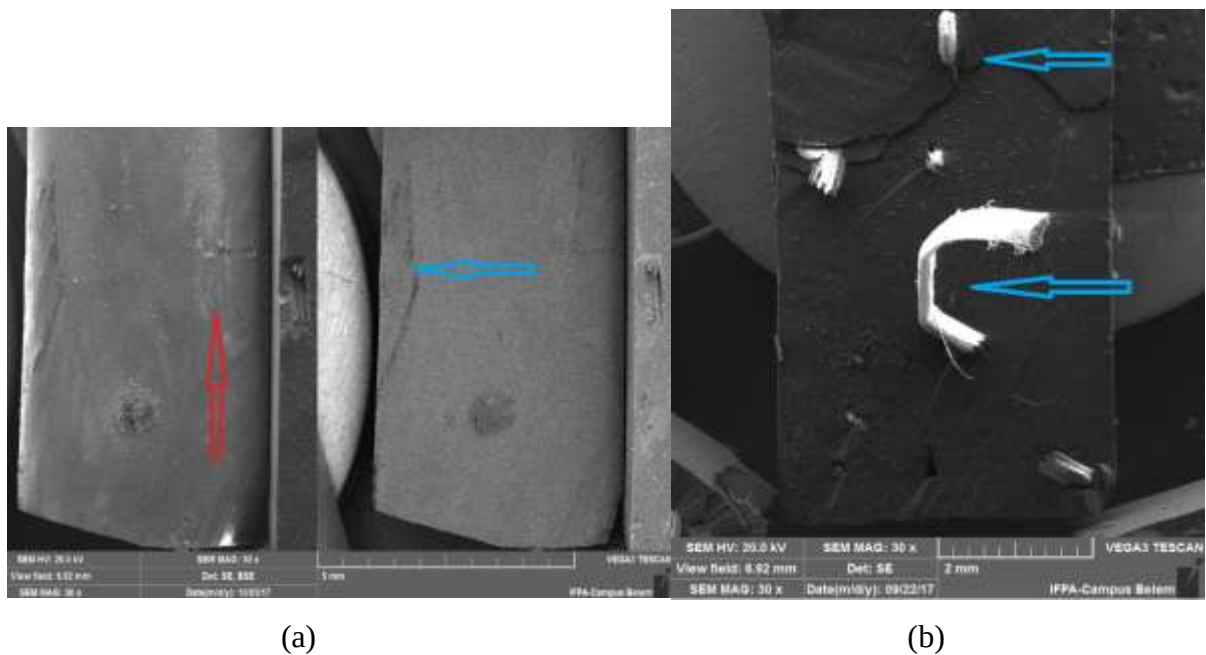


Figura 4.21 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com fibras de bambu 15 mm NT: (a) 1 FB e (b) 3 FB.

Observa-se na figura 4.21 que em (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. Já em (b) mostra-se a superfície de fratura dos compósitos com reforço de fibras de bambu 3 % 15 mm não tratadas, onde algumas fibras sofreram o processo de *pull out* (seta azul) e dispostas na direção paralela em que o carregamento foi solicitado, esses fatores colaboram a uma melhora na resistência mecânica do compósito.

- **Matriz polimérica com 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 4.10.

Tabela 4.10 - 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)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	19,54 ($\pm$ 3,05)	4,84	0,81
FB15mmTR	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

Na Tabela 4.10 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. Segundo (BLEDZIK e GASSAN, 1999), o comportamento da fibra depende primariamente das

condições do tratamento (concentração, tempo e temperatura). 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.

O gráfico (figura 4.22) 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.

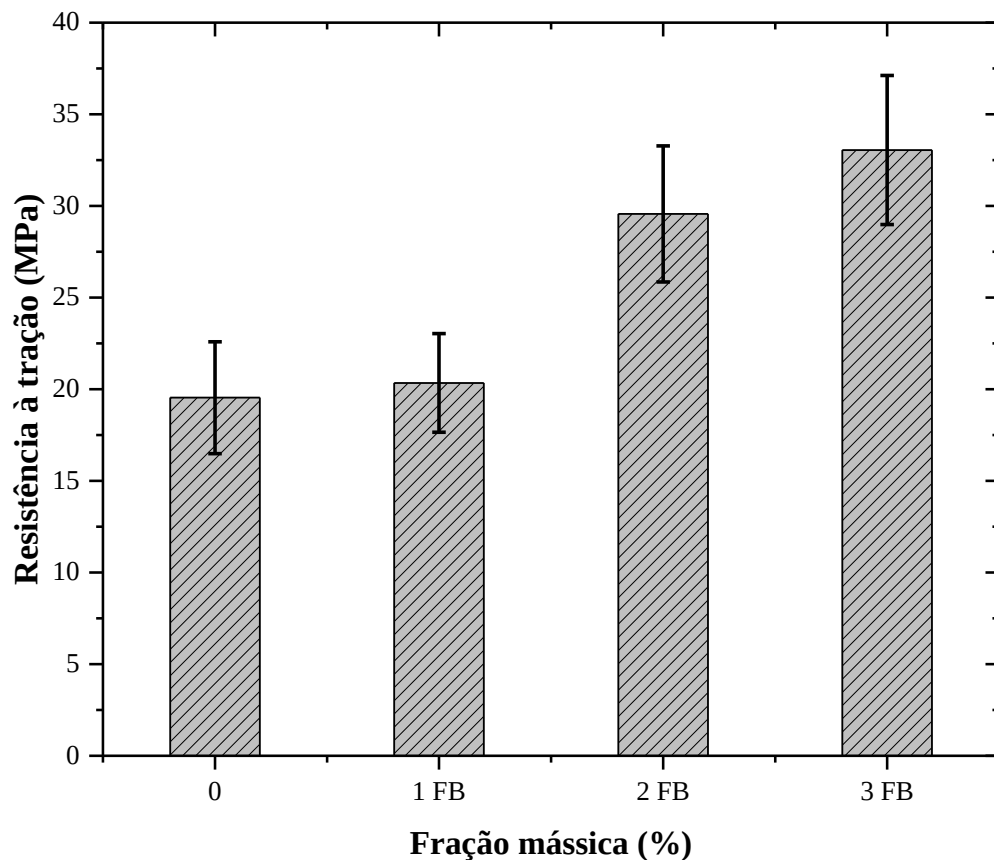


Figura 4.22 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 15 mm tratadas.

A Figura 4.23 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 15 mm tratada.

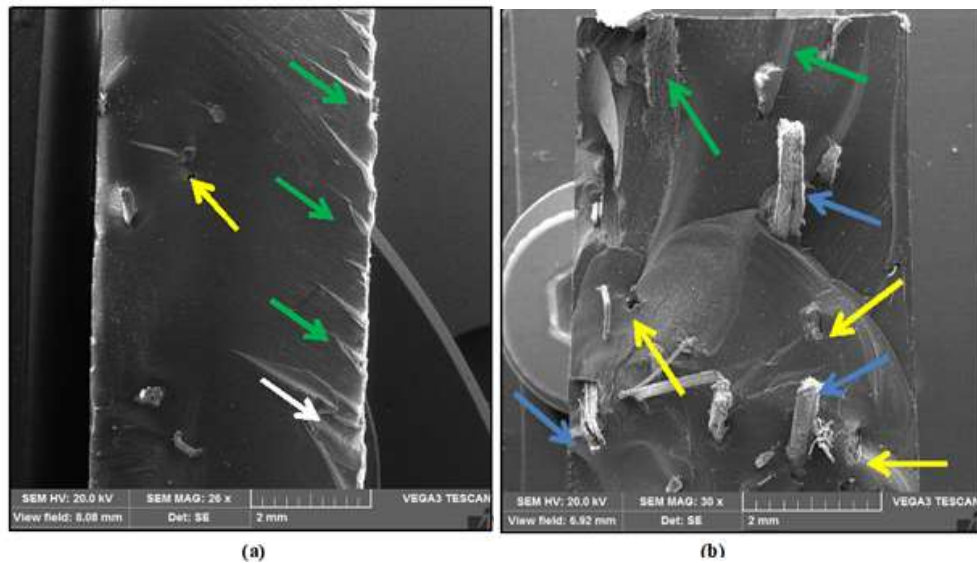


Figura 4.23 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 15 mm tratada: (a) 1 FB e (b) 3 FB.

Na figura 4.23, em (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. Já em (b) mostra-se 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 arranjadas 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.

- **Matriz polimérica com fibras de Bambu de 30 mm Não Tratadas**

Na Tabela 4.11, 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 4.11 - Resultados do ensaio de tração de compósitos reforçados com fibras de bambu 30 mm sem tratamento.

Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
		(MPa) (Desvio Padrão)		
MP	0	19,54 ($\pm$ 3,05)	4,84	0,81
FB30mm NT	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

Observa-se na tabela 4.11 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 de concentrações de fibras provocando fratura na matriz enquanto que em outras partes da matriz ocorre um vazio de fibras, gerando com isso uma certa diminuição da resistência do compósito com adição de fibras de bambu.

A Figura 4.24 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.

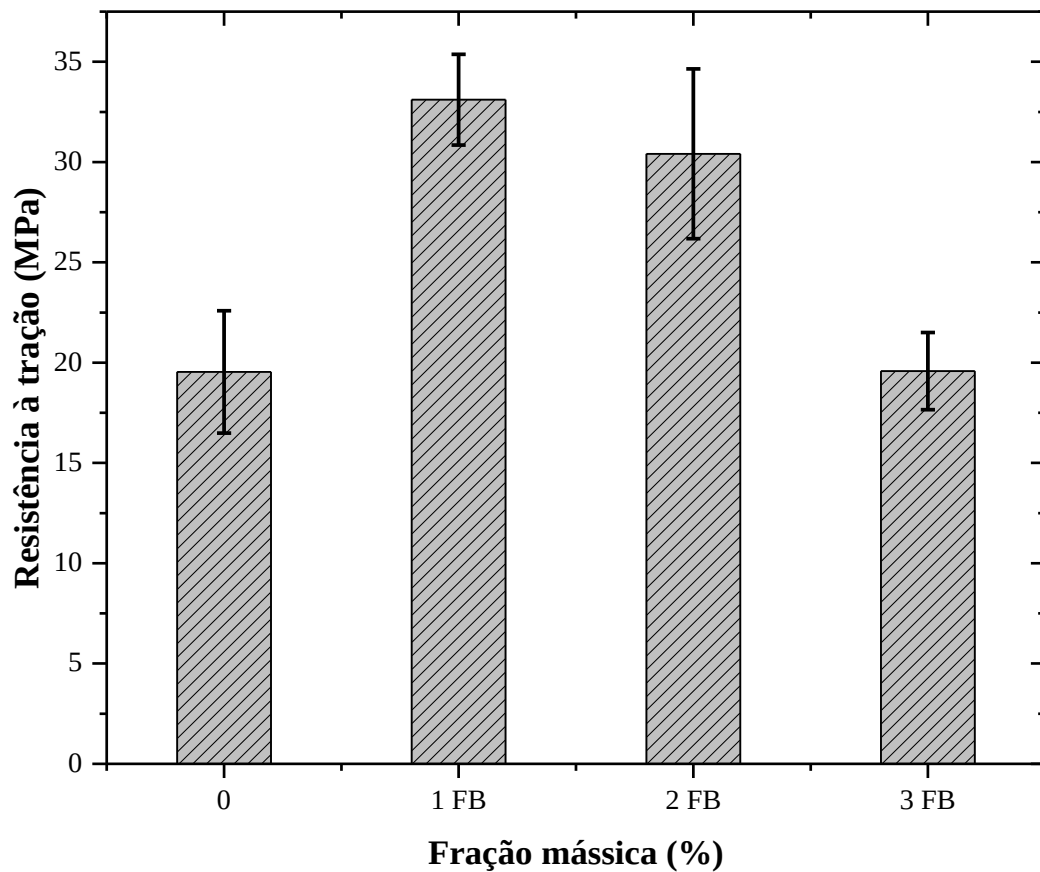


Figura 4.24 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 30 mm não tratadas.

São mostradas, na figura 4.25, as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratada.

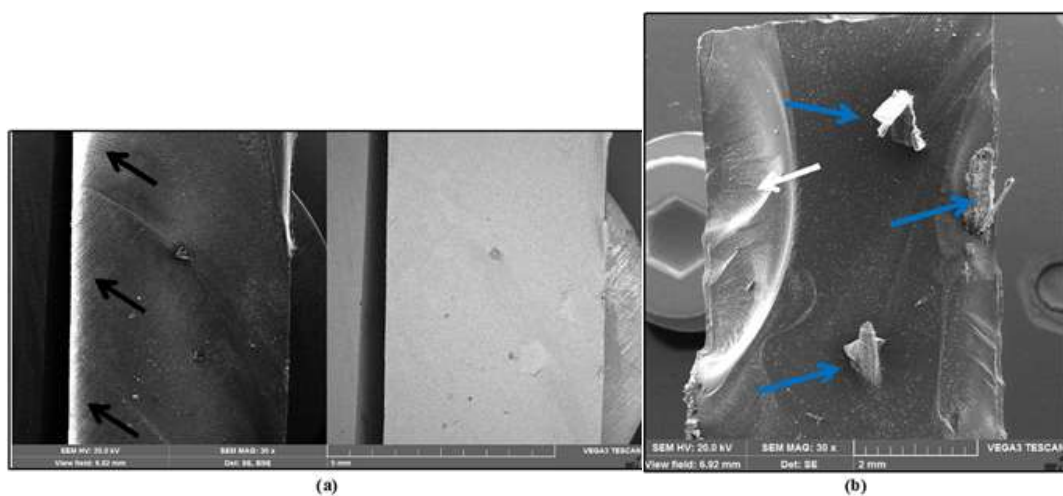


Figura 4.25 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm não tratada: (a) 1 FB e (b) 3 FB.

Na Figura 4.25 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito com reforço de fibra de bambu 1 % 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 descoladas (seta azul) demonstrando falha na aderência da interface fibra / matriz e as fibras estando dispostas na direção em que o carregamento foi solicitado, nota-se também deformações formadas pela fratura na matriz (seta branca), fatos que contribuem para uma melhora nas propriedades mecânicas do compósito.

- **Matriz polimérica com fibras de bambu de 30 mm Tratadas**

Mostram-se na tabela 4.12 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 4.12 - Resultados do ensaio de tração de compósitos inserção de fibras de bambu 30 mm com tratamento.

Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	19,54 ($\pm$ 3,05)	4,84	0,81
	1 FB	22,56 ($\pm$ 3,23)	4,12	0,94
FB30mmTR	2 FB	28,20 ($\pm$ 3,73)	4,87	0,92
	3 FB	32,14 ($\pm$ 3,71)	5,50	1,11

Observa-se, na tabela 4.12, 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, pelo melhor ancoramento mecânico da fibra na matriz.

No trabalho de Kuwahara *et al.* (2015), com compósitos reforçados com fibras particuladas de bambu e matriz poliéster, encontrou-se uma resistência a tração média de 14,60 MPa.

No gráfico de barra da figura 4.26 mostra-se um 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.

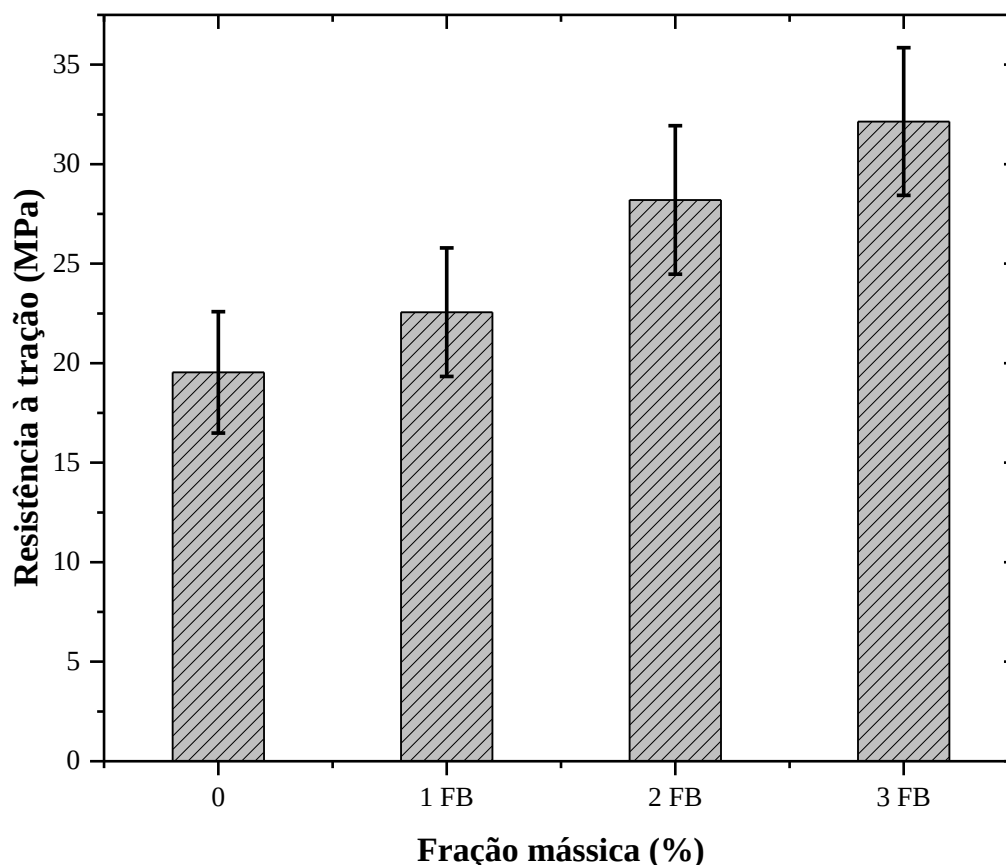


Figura 4.26 - Comportamento de resistência à tração do material compósito em função das fibras de bambu de 30 mm tratadas.

Este aumento observado no gráfico da figura 4.26, com o aumento da quantidade de fibras na matriz, denota que a interação da fibra na matriz foi eficiente, ocasionando o rompimento destas no final do ensaio de resistência a tração, junto com o rompimento da matriz polimérica. Conforme identificado na figura 4.27.

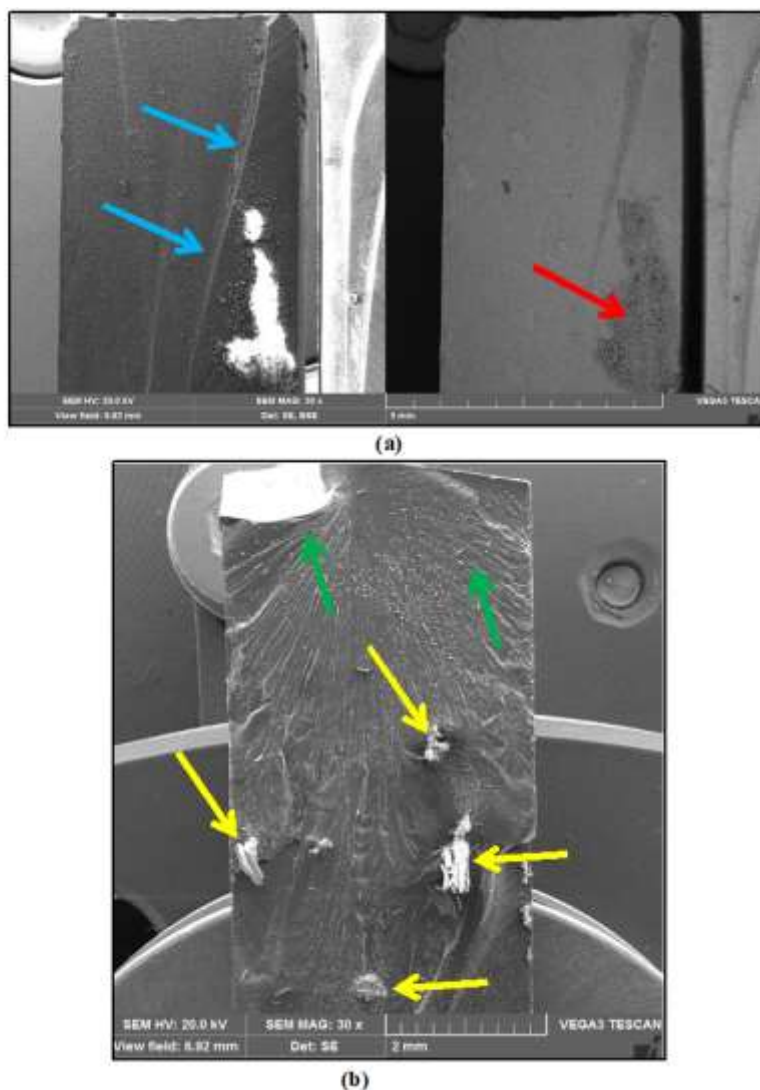


Figura 4.27 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito com reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas: (a) 1 FB e (b) 3 FB.

A figura 4.27 mostra em (a) 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, algumas imperfeições na matriz (seta azul) e notam-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. Já em (b) mostra-se 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, detalhes que podem estar atuando de forma positiva na resistência do compósito.

- **Compósitos poliméricos com 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 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos com incorporação de resíduo de cobre.

Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	19,54 ($\pm$ 3,05)	4,84	0,81
	10 RCU	25,38 ($\pm$ 1,45)	4,63	1,04
	20 RCU	25,18 ($\pm$ 1,84)	4,78	0,98
RCU	30 RCU	32,83 ($\pm$ 2,81)	5,12	1,14
	40 RCU	40,25 ($\pm$ 1,88)	5,46	1,39

Nota-se através dos resultados da Tabela. 4.13, 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. 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. 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.

No gráfico de barra da figura 4.28, a seguir, são mostrados os comparativos da matriz plena e dos compósitos com adição de resíduo de cobre nas frações de 10 RCU, 20 RCU, 30 RCU e 40 RCU.

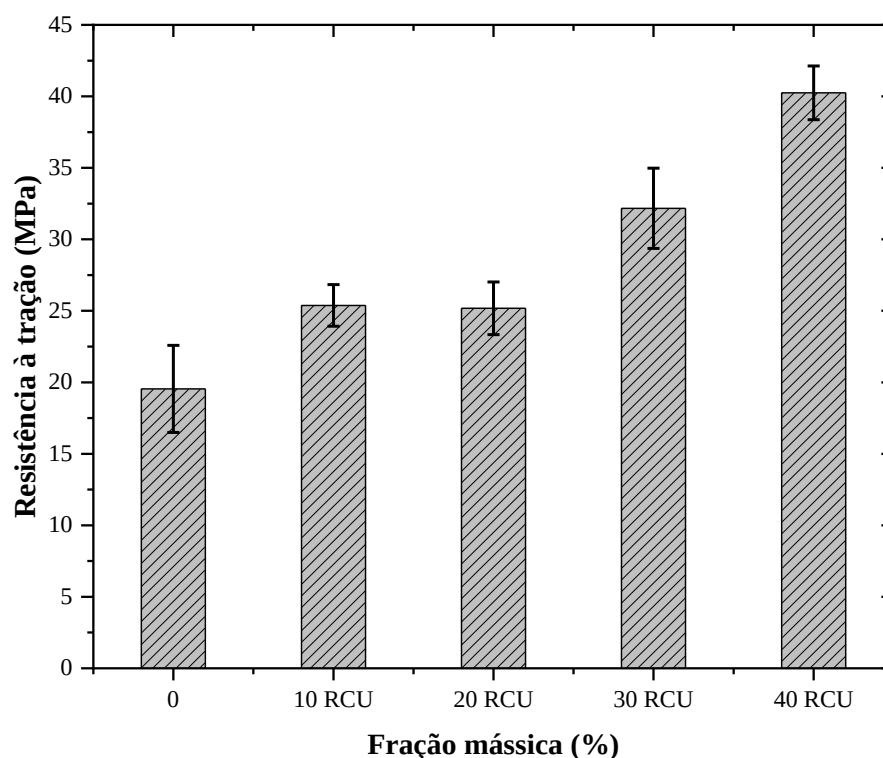
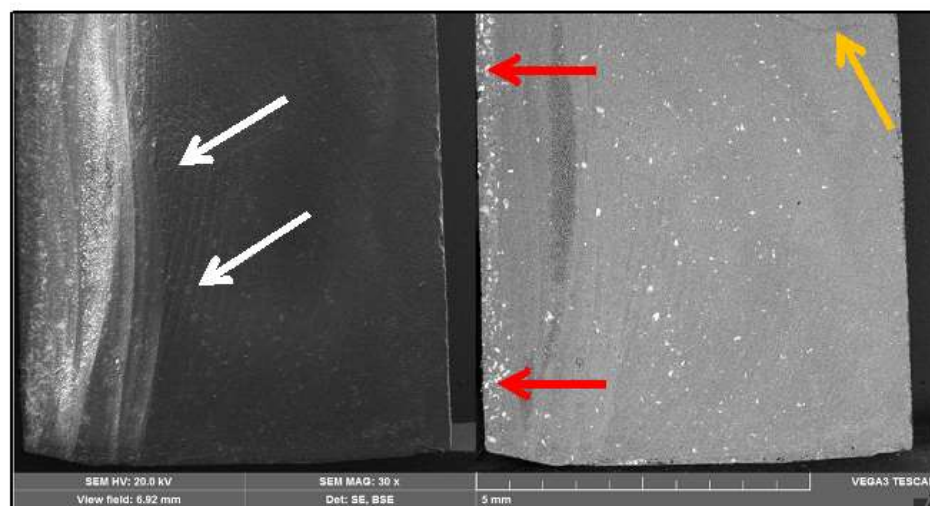


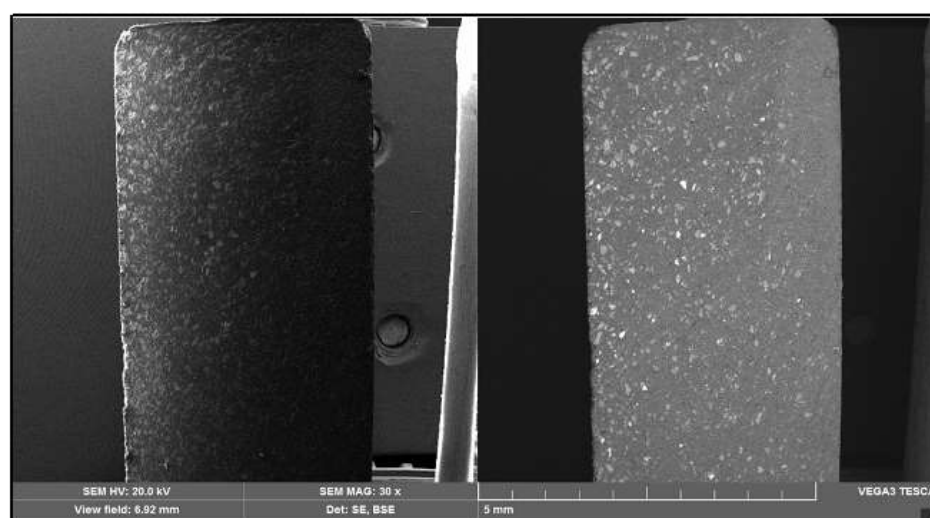
Figura 4.28 - Comportamento de resistência à tração material compósito em função dos resíduos de cobre.

Na análise do gráfico de resistência a tração, com adição do resíduo de cobre, nota-se um aumento dessa resistência em valores bem significativos quando comparados com a matriz plena, chegando a um desempenho 105,98% superior do compósito com 40% de RCU em relação a matriz plena.

Na figura 4.29 são mostradas superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com inserção de resíduo de cobre.



(a)



(b)

Figura 4.29 - Microscopia eletrônica de varredura: Compósito com inserção de resíduos de cobre.

As superfícies de fratura da Figura 4.29 (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 4.29 (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.

- **Compósitos poliméricos com 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 avaliadas quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados conforme mostrado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - 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 (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	19,54 ($\pm$ 3,05)	4,84	0,81
RCU/3FB15NT	10RCU/3FB15NT	37,94 ($\pm$ 1,82)	6,44	1,25
	20RCU/3FB15NT	20,95 ($\pm$ 2,99)	4,72	0,94
	30RCU/3FB15NT	32,20 ($\pm$ 3,61)	5,42	1,22

Observa-se na tabela 4.14 um aumento da resistência a tração no compósito híbrido com 10RCU/3 FB15NT quando comparado com a matriz plena, enquanto que no compósito híbrido com 20RCU/3FB15NT percebe-se uma resistência a tração semelhante a matriz plena e no compósito híbrido com 30RCU/3FB15NT um aumento de sua resistência a tração, observa-se também que todos os compósitos híbridos apresentaram módulo de elasticidade superior ao da matriz plena. Nota-se que os compósitos híbridos com 10RCU/3FB15NT, 20RCU/3FB15NT e 30RCU/3FB15NT apresentaram as maiores resistências 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.

No gráfico de barra da figura 4.30, mostra-se o comparativo da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre nas frações de 10 RCU, 20 RCU, 30 RCU e reforço de fibras de bambu na fração 3 FB 15 mm não tratadas, quanto as suas resistências à tração.

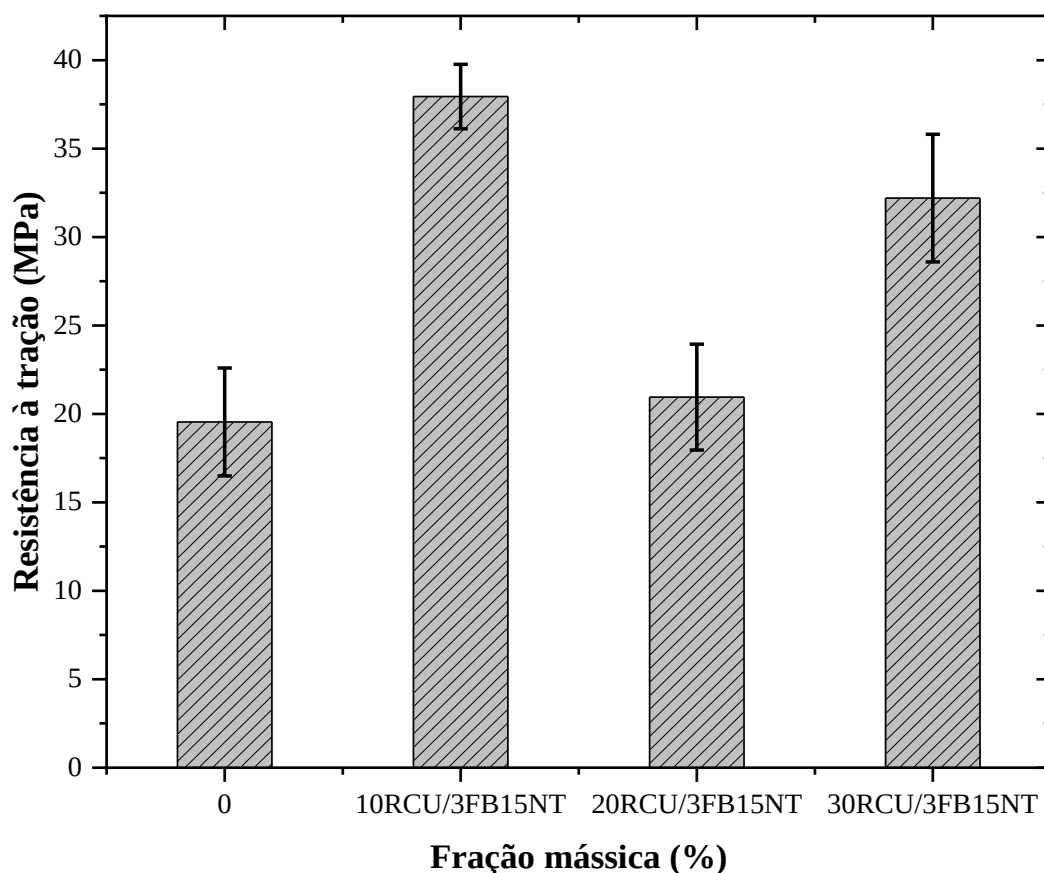


Figura 4.30 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 15 mm não tratadas

No gráfico da figura 4.30 observa-se a alternância do comportamento com o aumento da quantidade de resíduo de cobre e as fibras de bambu, Comportamento que pode ser justificado pelo descolamento de fibras presentes na matriz, o que se denota que houve baixa interação da interface fibra/matriz. Conforme identificado por análise de MEV da próxima figura.

Na Figura 4.31 são mostradas superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos 15 mm não tratada.

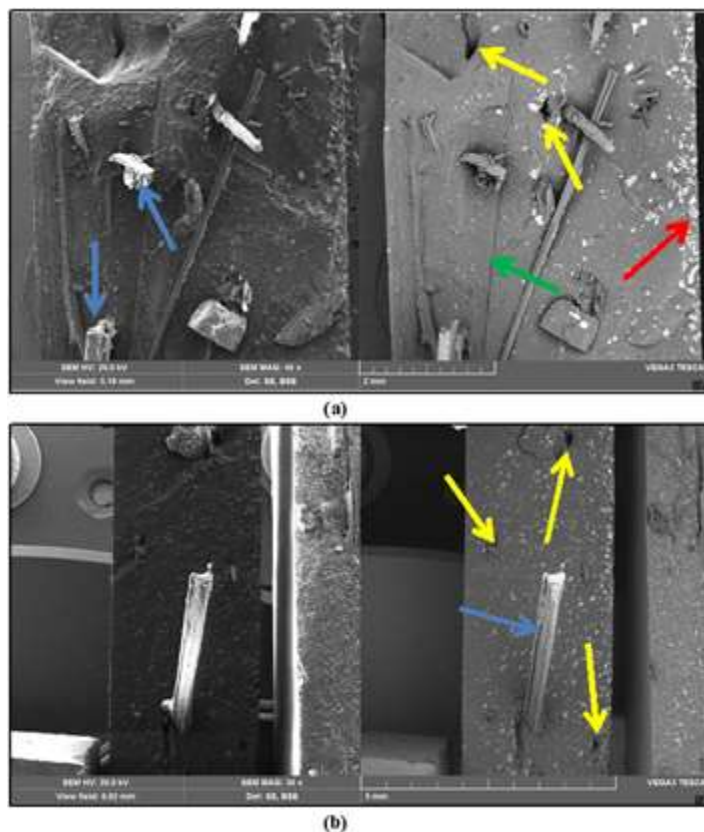


Figura 4.31 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 15 mm não tratado: (a) 20RCU/3FB15NT e (b) 10RCU/3FB15NT

Em 4.31 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido 20RCU/3FB15NT, 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. Em 4.31 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido 10RCU/3FB15NT, 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.

- **Matriz polimérica com 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 mostrado na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - 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 (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	19,54 ($\pm$ 4,05)	4,84	0,81
RCU/3FB15TR	10RCU/3FB15TR	30,22 ($\pm$ 1,82)	5,02	1,23
	20RCU/3FB15TR	34,46 ($\pm$ 2,21)	5,59	1,26
	20RCU/3FB15TR	25,94 ($\pm$ 1,88)	4,98	1,04

Na Tabela 4.15 são mostrados 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 RCU, 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 4.32 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre nas frações de 10 RCU, 20 RCU, 30 RCU e reforço de fibras de bambu na fração 3FB15TR, quanto as suas resistências à tração.

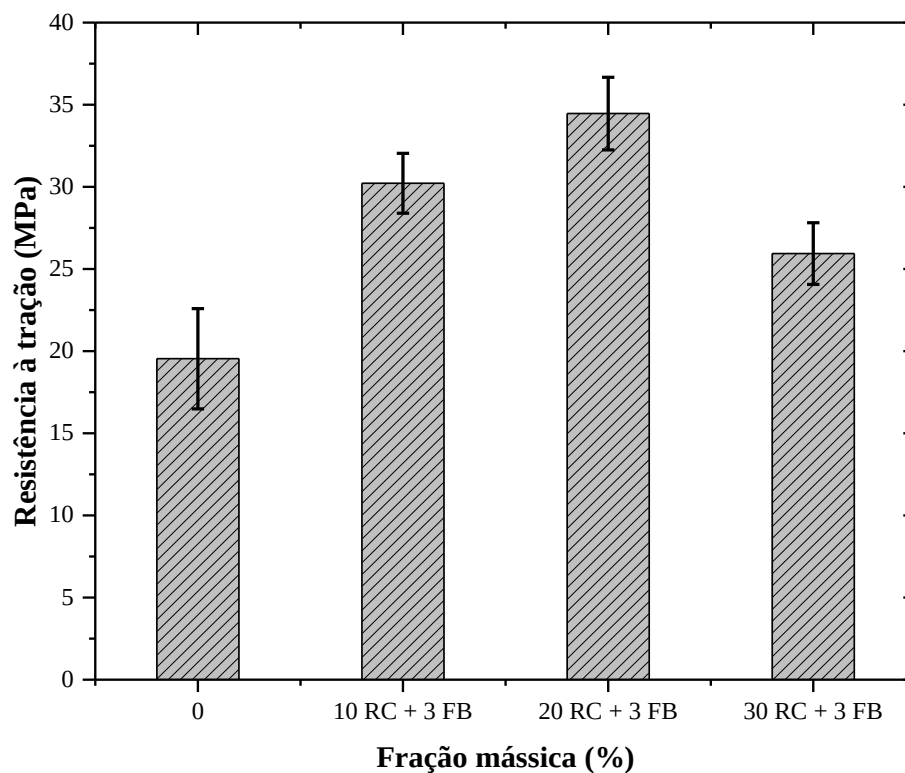
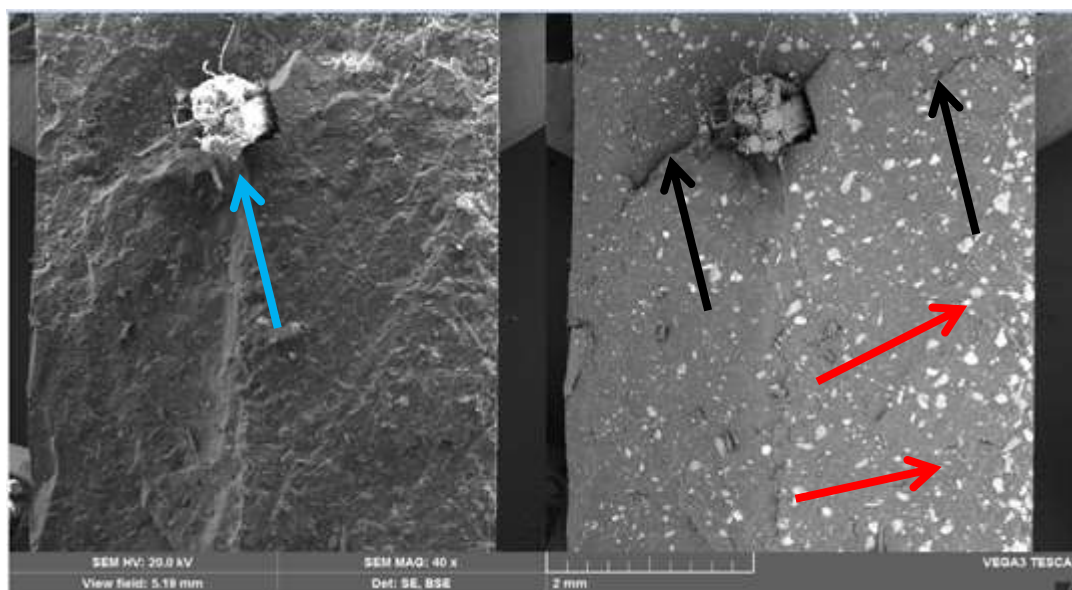
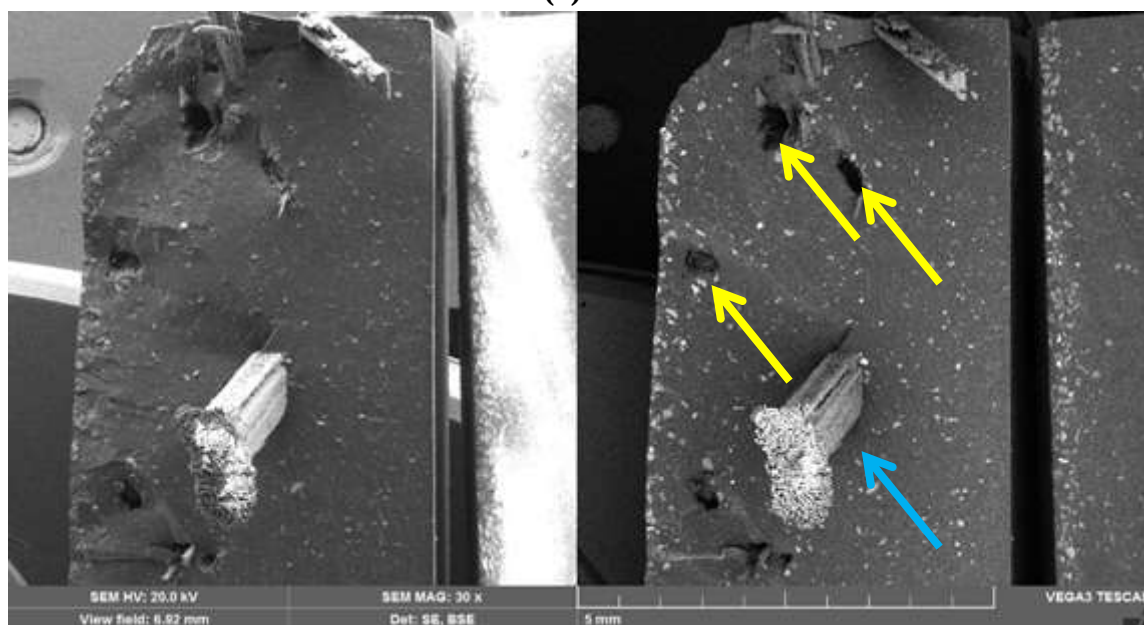


Figura 4.32 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu de 15 mm tratadas.

Na Figura 4.33 mostram-se as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos 15 mm tratada.



(a)



(b)

Figura 4.33 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 15 mm tratada: (a) 10RCU/3FB15TR e (b) 20RCU/3FB15TR.

Nota-se que em 4.33 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido 10RCU/3FB15TR, 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. Em 4.33 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido 20RCU/3FB15TR, 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.

- **Matriz polimérica com 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 mostrado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - 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)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	19,54 ($\pm$ 4,05)	4,84	0,81
	10RCU/3FB30NT	25,87 ($\pm$ 3,30)	4,94	1.05
RCU/3FB30NT	20RCU/3FB30NT	32,10 ($\pm$ 4,21)	5,41	1,28
	30RCU/3FB30NT	26,31 ($\pm$ 3,22)	6,24	0,88

Na Tabela 4.16 são mostrados 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 RCU, onde ocorre uma diminuição da resistência à tração, entretanto observa-se também que os compósitos híbridos tiveram a sua rigidez aumentada nas frações de 10RCU3FB e 20RCU3FB quando comparado com a matriz plena.

O gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos híbridos com inserção de resíduo de cobre nas frações de 10 RCU, 20 RCU, 30 RCU e reforço de fibras de bambu na fração 3 FB 30 mm não tratadas, quanto as suas resistências à tração é mostrado na figura 4.34.

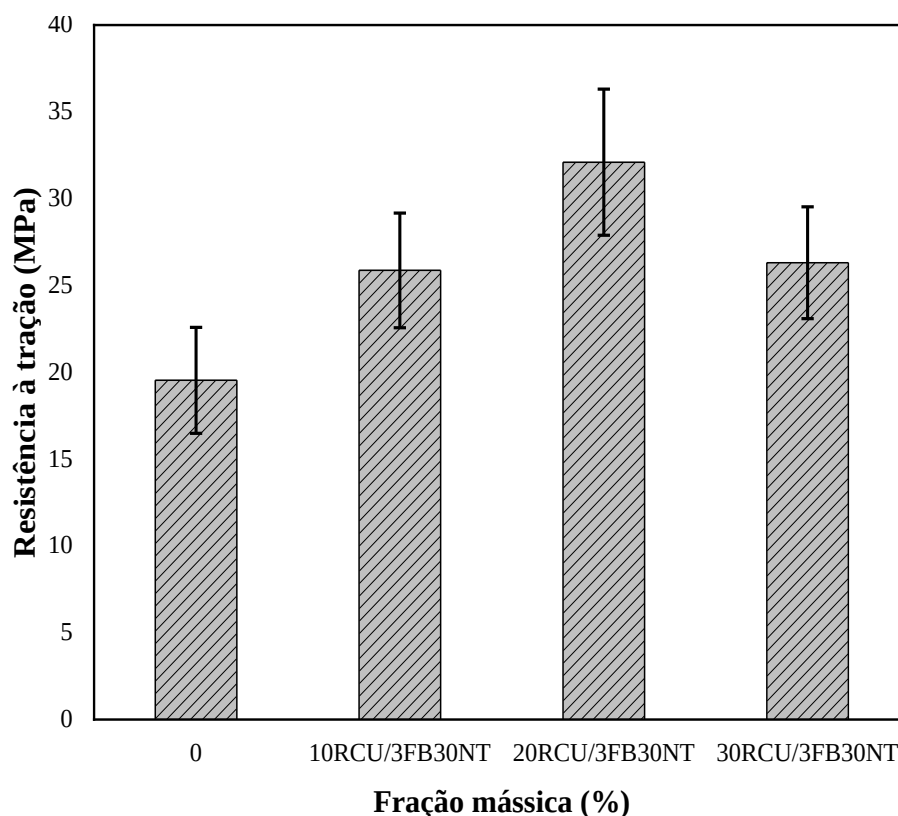


Figura 4.34 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da Inserção de Resíduo de Cobre e Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm não Tratadas.

Na análise do gráfico mostrado na figura 4.34 com resíduos de cobre e as fibras de bambu sem tratamento com valores superiores a matriz plena chegando a 64,28% superior em relação a matriz plena, quando acrescentado 20% de resíduo de cobre e fibras de bambu de 30 mm não tratadas na matriz (20RCU/3FB30NT).

A Figura 4.35 mostram-se as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos 30 mm não tratada.

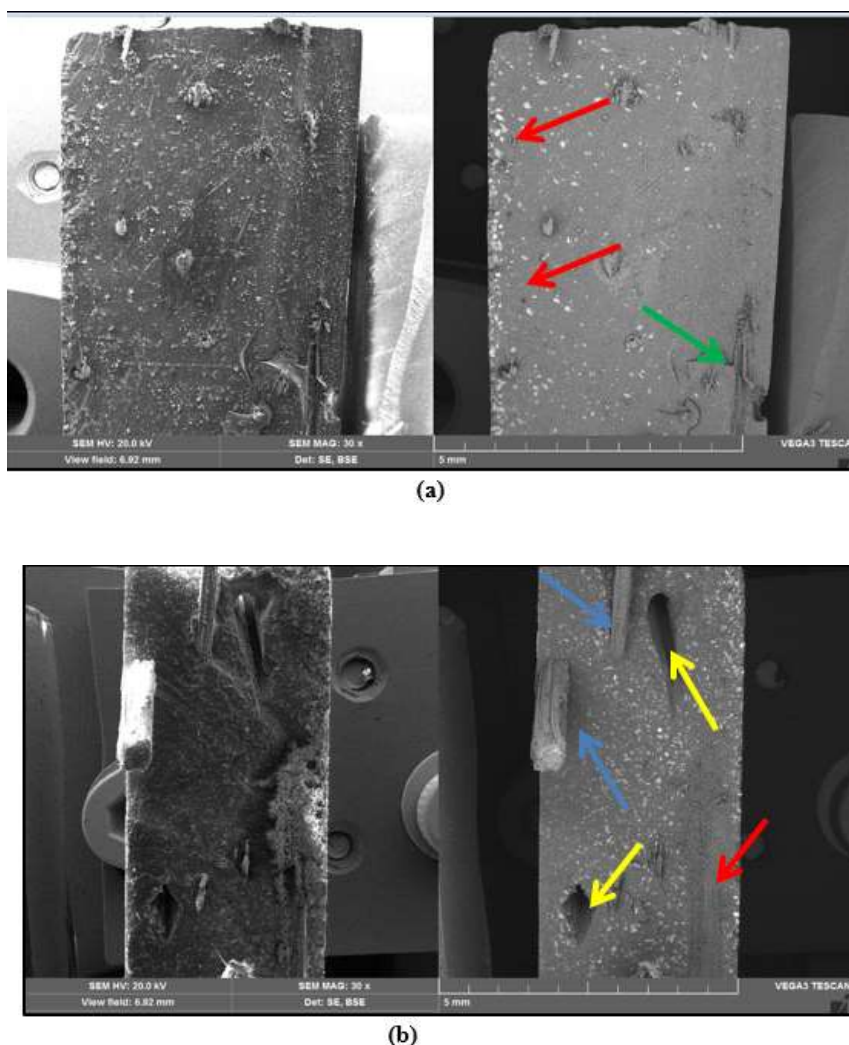


Figura 4.35 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 30 mm não tratada: (a) 30RCU/3FB30NT e (b) 20RCU/3FB30NT.

Na Figura 4.35 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido 30RCU/3FB30NT, onde pode-se notar a presença de fibras descoladas (seta verde) e dispostas na matriz transversalmente à direção do carregamento, evidenciando uma fraca adesão fibra/matriz. Observa-se também uma concentração do resíduo de cobre em um dos lados da seção transversal do CP e alguns defeitos de confecção do compósito, fatores que afetam negativamente o desempenho do compósito. A figura 4.35 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido 20RCU/3FB30NT, 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.

- **Matriz polimérica com 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 4.17.

Tabela 4.17 - 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 (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	19,54 ($\pm$ 4,05)	4,84	0,81
	10RCU/3FB30TR	22,74 ($\pm$ 2,30)	6,21	0,93
RCU/3FB30TR	20RCU/3FB30TR	31,96 ($\pm$ 2,58)	5,35	1,25
	30RCU/3FB30TR	31,31 ($\pm$ 2,11)	5,60	1,18

Na Tabela 4.17 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 RCU 10 do compósito híbrido a propriedade analisada (Resistência à tração) não apresentou um aumento significativo, enquanto que nas frações de RCU 20 e RCU 30 do compósito híbrido teve um aumento significativo da resistência à 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.

Na Figura 4.36 ilustra-se o gráfico de barra comparativo da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com incorporação de resíduo de cobre nas frações de 10 RCU, 20 RCU, 30 RCU e reforço de fibras de bambu na fração 3 FB 30 mm tratadas, quanto as suas resistências à tração.

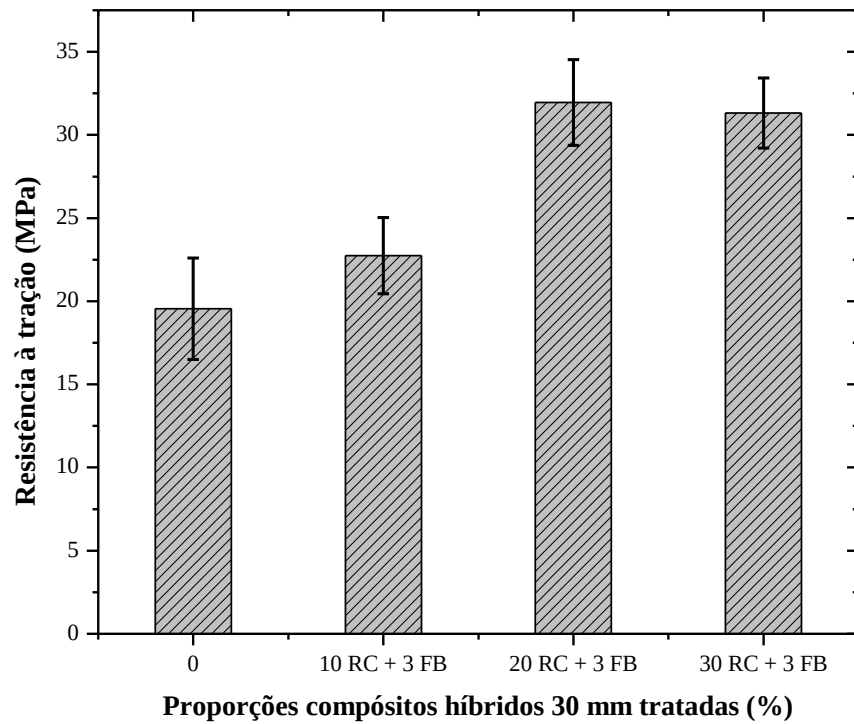
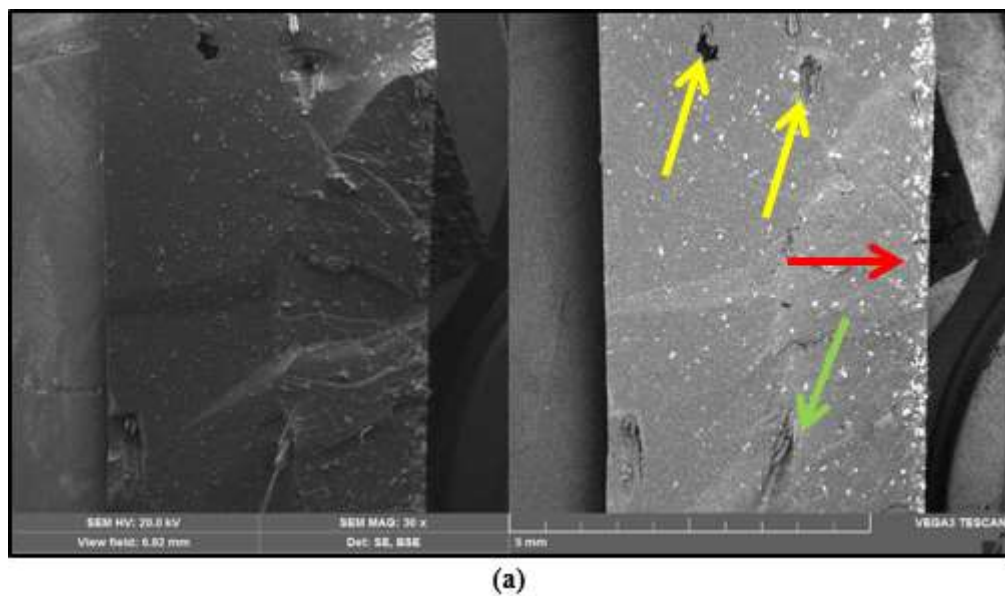


Figura 4.36 - Comportamento de resistência à tração do material compósito híbrido em função da incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de 30 mm tratadas.

A Figura 4.37 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos 30 mm com tratamento químico.



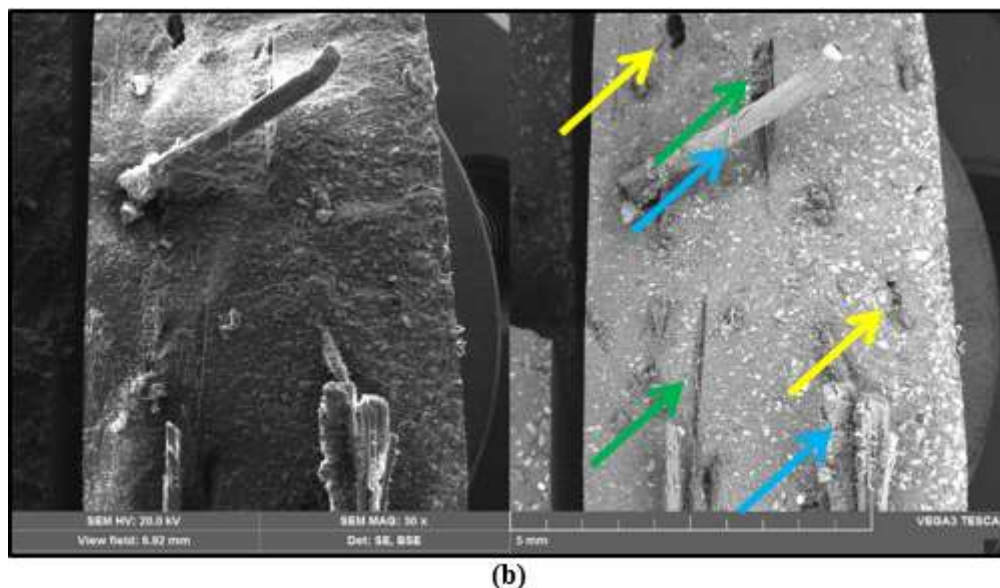


Figura 4.37 - Microscopia eletrônica de varredura: compósito híbrido 30 mm tratada: (a) 10RCU/3FB30TR e (b) 20RCU/3FB30TR.

Na Figura 4.37 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito 10RCU/3FB30TR, onde se pode notar a presença de fibras rompidas (seta amarela). Observa-se também uma concentração do resíduo de cobre na superfície da matriz (setas vermelhas), fatores que ocasionam negativamente o desempenho do compósito. Em 4.37 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido 20RCU/3FB30TR, onde nota-se fibra sendo descolada (seta amarela superior e setas verdes), fibras com *pull out* (seta verde) 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.

- **Matriz polimérica com lama vermelha**

Na tabela 4.18 são mostrados resultados da caracterização mecânica em relação a resistência a tração da matriz polimérica sem carga e compósitos com lama vermelha.

Tabela 4.18 – Resistência mecânica a tração dos compósitos com LV.

Fração Mássica Lama Vermelha (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0	24,24 ($\pm$ 2,38)	4,08	1,03
LV 10	32,99 ($\pm$ 5,05)	4,47	1,38
LV 20	36,63 ($\pm$ 1,91)	5,27	1,36
LV 30	30,90 ($\pm$ 3,21)	4,79	1,26
LV 40	29,00 ($\pm$ 1,93)	3,94	1,35

Nesta tabela 4.18 nota-se que as resistências a tração dos compósitos com resíduo de lama vermelha são maiores do que a resistência a tração da matriz polimérica sem carga, demonstrando que o resíduo de lama vermelha apresentou desempenho de reforço efetivo, promovendo elevação da resistência à tração dos compósitos. Com relação ao módulo de elasticidade não houve diferenças expressiva entre os compósitos e a matriz sem carga, mantendo resultados próximos.

A fração de compósito produzido com lama vermelha que apresentou os melhores resultados foram o LV 20 % com a resistência de 36,63 MPa, e o compósito que apresentou menor desempenho foi o LV 40 % com a resistência de 29,00 MPa.

Segundo Cunha (2015), com o aumento da fração de resíduo dentro da matriz, a possibilidades de aglomeração das partículas de LV, dificultando a dispersão destas no polímero, favorece o enfraquecimento da adesão poliéster/LV. Com a não dispersão das partículas há uma tendência de diminuição da resistência a tração conforme aumenta-se a proporção de lama vermelha dentro da matriz polimérica.

É mostrado na Figura 4.38 o gráfico de barra comparativo dos compósitos de matriz sem carga e dos compósitos com adição de lama vermelha nas frações de LV 10 %, LV 20 %, LV 30 % e LV 40 %.

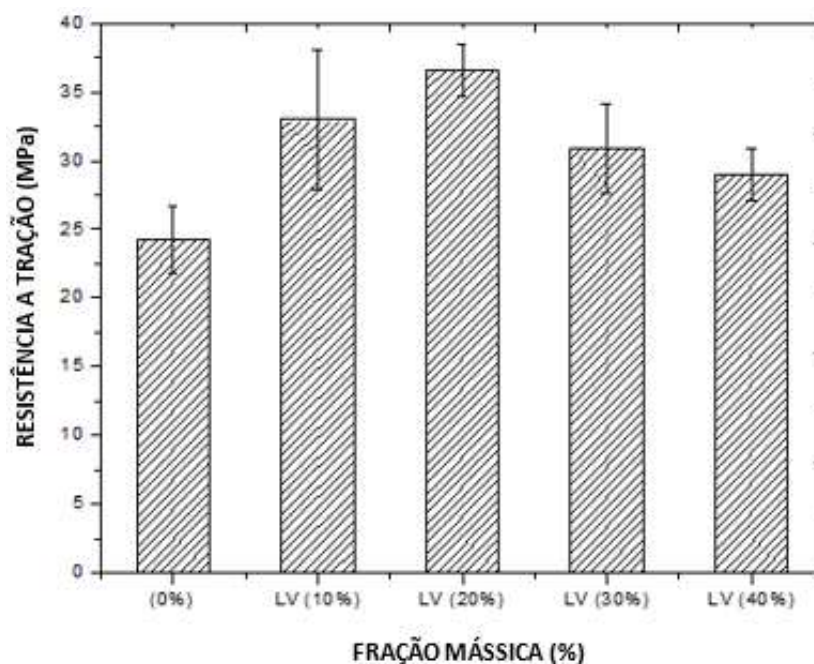


Figura 4.38 - Comparação da resistência mecânica de tração dos compósitos LV.

Pode-se observar que a fração de resíduo de LV 20 % se destaca das demais e apresenta um desvio padrão inferior das outras proporções.

A Figura 4.39 mostra o resultado da análise fractográfica realizada por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas superfícies de fraturas após o ensaio de tração dos compósitos com incorporação de lama vermelha nas proporções de 10 % e 20 % de resíduo.

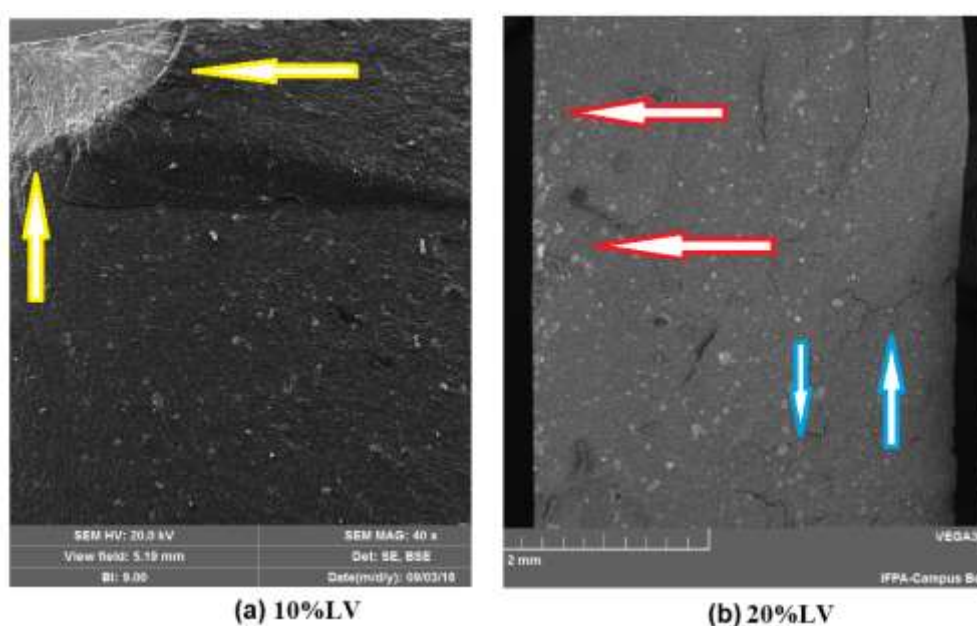


Figura 4.39 – Análise microscópica dos compósitos incorporados com lama vermelha

O resultado da análise microscópica do compósito com incorporação de 10 % de lama vermelha é mostrado na Figura 4.39, onde em (a) mostra-se a propagação de fraturas (setas amarelas). Já em 4.39 (b) mostra a análise realizada no material com 20 % de resíduo, onde, mostra (setas azuis) presença de trincas, e aglomerados (setas vermelhas). Os aglomerados surgem devido ao processo de homogeneização entre o sistema resíduo/matriz, podendo originar pontos de concentração de tensões que influem negativamente no desempenho mecânico dos compósitos.

Nas duas imagens é possível observar que houve uma boa dispersão do resíduo por toda matriz polimérica, o que pode ter ocorrido devido uma boa interação do resíduo com a matriz, acompanhado de uma boa homogeneização e compactação dos compósitos.

Costa (2016) ao analisar microscopicamente compósitos de poliéster e lama vermelha observou a ocorrência de porosidades, vazios e microcavidades, o que conforme o autor contribui para uma diminuição na resistência dos compósitos.

- **Matriz polimérica com lama vermelha e fibras de bambu de 15 mm não tratadas**

Os compósitos híbridos compostos por 3 % de fibras de bambu não tratadas quimicamente com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % foram analisados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração e os resultados encontram-se na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Comportamento de resistência dos compósitos híbridos com inserção de fibras de bambu 15mm sem tratamento.

Fração Mássica (%)	Resist. Tração Média (MPa) (Desv. Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0	24,24 ($\pm$ 2,38)	4,08	1,03
LV10/3FB15NT	36,25 ($\pm$ 2,48)	4,72	1,44
LV20/3FB15NT	35,17 ($\pm$ 4, 28)	4,66	1,44
LV30/3FB15NT	28,48 ($\pm$ 1,12)	4,71	1,55
LV40/3FB15NT	26,46 ($\pm$ 4,40)	4,86	1,20

Os resultados do ensaio de tração mostram, na tabela 4.19 uma diminuição gradativa na resistência à tração dos compósitos híbridos com inserção de 3 % de fibras de bambu não

tratadas e lama vermelha nas proporções 10 %, 20 %, 30 % e 40 % à medida que aumentava a proporção de resíduo na matriz. Essa diminuição pode ser justificada por surgimentos de falhas originadas por possíveis dificuldades de adesão entre os componentes durante o processo de fabricação ou devido ao excesso de componentes utilizados. Porém, todos os compósitos híbridos estudados neste trabalho apresentaram resistência à tração bem como módulos de elasticidades superiores em relação a matriz poliéster plena estudada por Barbosa (2018).

Os melhores resultados do compósito híbrido em relação à matriz plena mostram que à lama vermelha e as fibras funcionaram como agentes de reforços, conferindo boas propriedades mecânicas ao material fabricado.

Os compósitos híbridos de fibras de bambu não tratadas e lama vermelha estudados neste trabalho apresentaram limites de resistência à tração inferiores nas proporções 3 %/10 % e 3 %/30 % e superior na proporção 3 %/20 % em relação aos compósitos híbridos de fibras de bambu 15 mm não tratadas e resíduo de cobre estudados por Borges (2018) e por Barbosa (2018).

A Figura 4.40 mostra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos híbridos nas proporções de 3 %/10 %, 3 %/20 %, 3 %/30 % e 3 %/40 % (Fibra/Resíduo) quanto as suas resistências à tração. Na figura 4.34 a seguir pode-se observar que à proporção que apresentou melhor resistência à tração média foi a de 3 % de fibra com 10 % de lama vermelha.

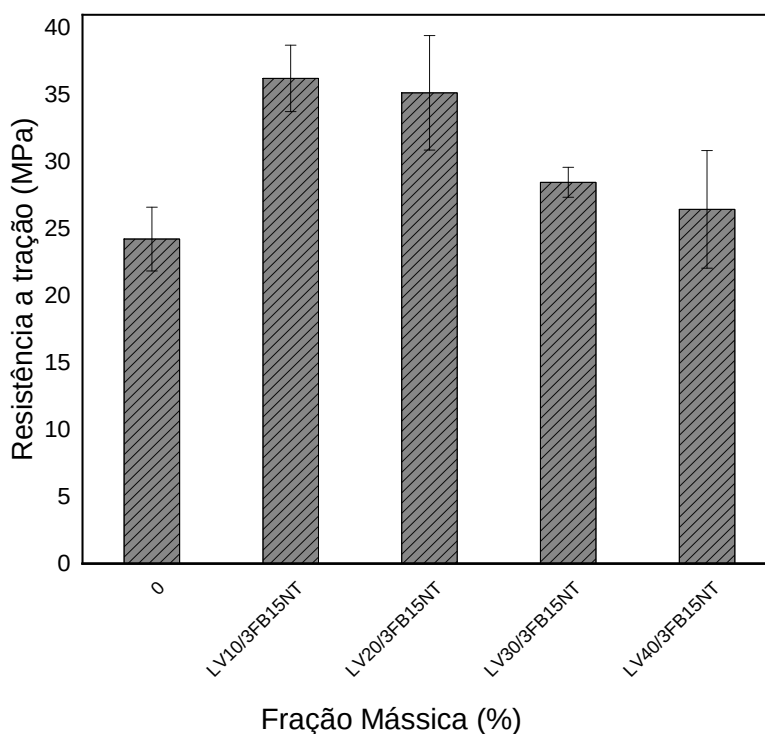


Figura 4.40 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos com Lama Vermelha e fibras 15mm não tratadas

A Figura 4.41 mostra os resultados da análise fractográfica realizadas nos compósitos híbridos reforçados com 3 % fibras de bambu não tratadas quimicamente e resíduo de lama vermelha nas proporções de 10 % e 20 %.

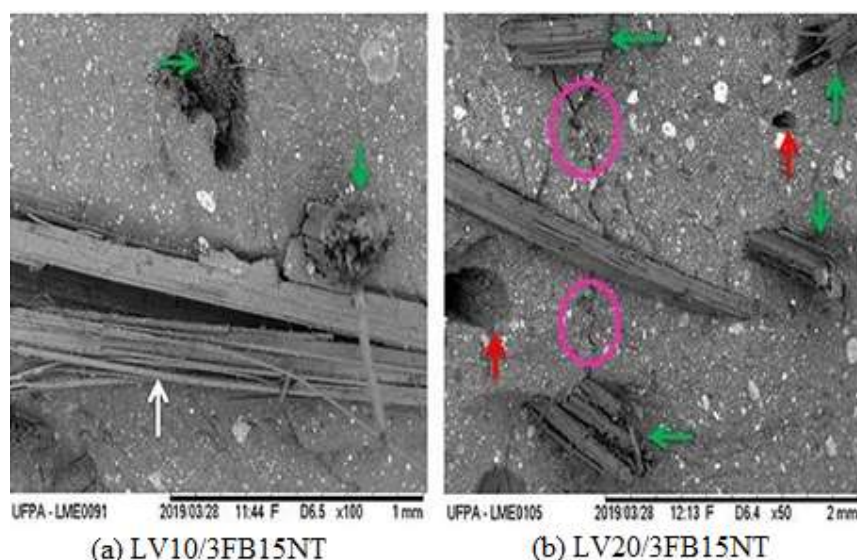


Figura 4.41 – Análise microscópica dos compósitos híbridos com LV/3FB15NT.

Os resultados da análise fractográfica da figura 4.41, mostram que o material apresentou mecanismos de falhas como: fibras arrancadas (pull-out), fibras rompidas, trincas na matriz, descolamento e desfibrilamento de fibras.

Na figura 4.41 em (a) mostra a superfície de fratura do material compósito híbrido na proporção de LV10/3FB15NT onde mostram presenças de mecanismos de fibras rompidas (setas verdes), mecanismos estes que demonstram que houve uma boa adesão na interface fibra/matriz/resíduo resultando em melhorias de resistência à tração. Outro mecanismo de falha observado é a presença de descolamento e desfibrilamento de fibra (seta branca); pode-se citar também a presença de fibra disposta transversalmente na direção de aplicação da força, o que pode depreciar a resistência do compósito.

Já em 4.41 (b) mostra-se a superfície fraturada do material compósito híbrido composto por 3 %/20 % (Fibra/Resíduo). Nesta imagem pode-se observar trincas (círculos rosas), fibras rompidas (setas verdes) e fibras arrancadas (pull-out) (setas vermelhas). O mecanismo de fibras arrancadas (pull-out) refere-se às fibras sendo sacadas da matriz, demonstrando que não houve uma boa adesão na interface fibras/matriz/resíduo, o que pode depreciar a resistência dos compósitos.

De acordo com Borges (2018), o mecanismo dominante de fibras rompidas indica uma boa adesão entre a fibra e a matriz; já a distribuição mais homogênea do resíduo na matriz provoca uma melhora positiva nas propriedades mecânicas.

- **Matriz polimérica com lama vermelha e fibras de bambu de 15 mm tratadas**

Os compósitos híbridos com inserção de 3 % de fibras curtas de bambu tratadas quimicamente com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % foram analisados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração e os resultados encontram-se na Tabela 4.17.

Tabela 4.20 – Resultado dos ensaios de tração realizados no material compósito híbrido com lama vermelha e fibras de 15mm tratadas.

Fração Mássica (%)	Resist. Tração Média (MPa) (Desv. Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0	24,24 ($\pm$ 2,38)	4,08	1,03
LV10/3FB15TR	35,30 ($\pm$ 3,22)	5,35	1,48
LV20/3FB15TR	30,91 ($\pm$ 3,36)	4,97	1,31
LV30/3FB15TR	30,53 ($\pm$ 1,50)	5,11	1,28
LV40/3FB15TR	25,73 ($\pm$ 1,60)	4,64	1,12

Os resultados do ensaio de tração dos compósitos híbridos com inserção de 3 % de fibras de bambu nos comprimentos de 15 mm tratadas com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e lama vermelha mostram uma diminuição de resistência à medida que aumenta a proporção de resíduo na matriz, efeito este já observado anteriormente nos compósitos híbridos de lama vermelha e fibras de bambu não tratadas. Os resultados mostram que os compósitos híbridos apresentaram melhores desempenhos mecânicos de tração e de módulos de elasticidades do que à matriz compósita poliéster plena estudada por Barbosa (2018).

Os resultados mostram ainda que o tratamento químico não acrescentou melhorias nas propriedades mecânicas de tração, uma vez que os compósitos híbridos de fibras tratadas e lama vermelha demonstraram comportamentos similares aos compósitos híbridos de lama vermelha e fibras não tratadas.

Os compósitos híbridos de fibras tratadas e lama vermelha estudados neste trabalho apresentaram resistência à tração superior em relação aos compósitos híbridos de fibras de bambu 15 mm e resíduo de cobre estudado por Borges (2018). E, resistência inferior em relação aos compósitos híbridos de fibras de bambu 15 mm tratadas e resíduo de caulim estudado por Santos (2018).

A Figura 4.42 ilustra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos híbridos com 3 % de fibras de bambu tratadas e lama vermelha quanto as suas resistências à tração média. Na figura nota-se que a proporção que suportou mais força foi de 3 %/10 % (Fibra/Resíduo).

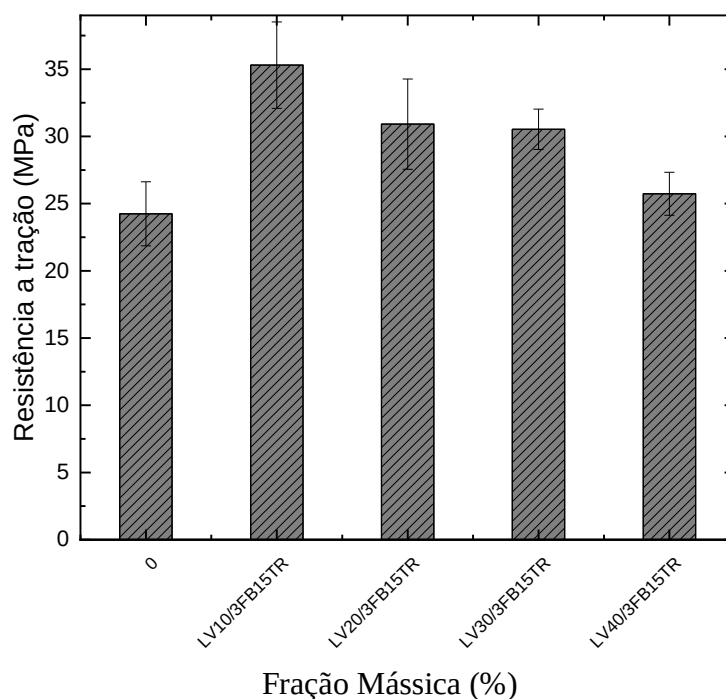


Figura 4.42 – Comportamento de resistência à tração da matriz plena e dos compósitos com lama vermelha e de 15 mm tratadas

A Figura 4.43 mostra os resultados da análise microscópica de varredura dos compósitos híbridos com 3 % de fibras de bambu de 15mm tratadas quimicamente e lama vermelha nas proporções 10 % e 20 %.

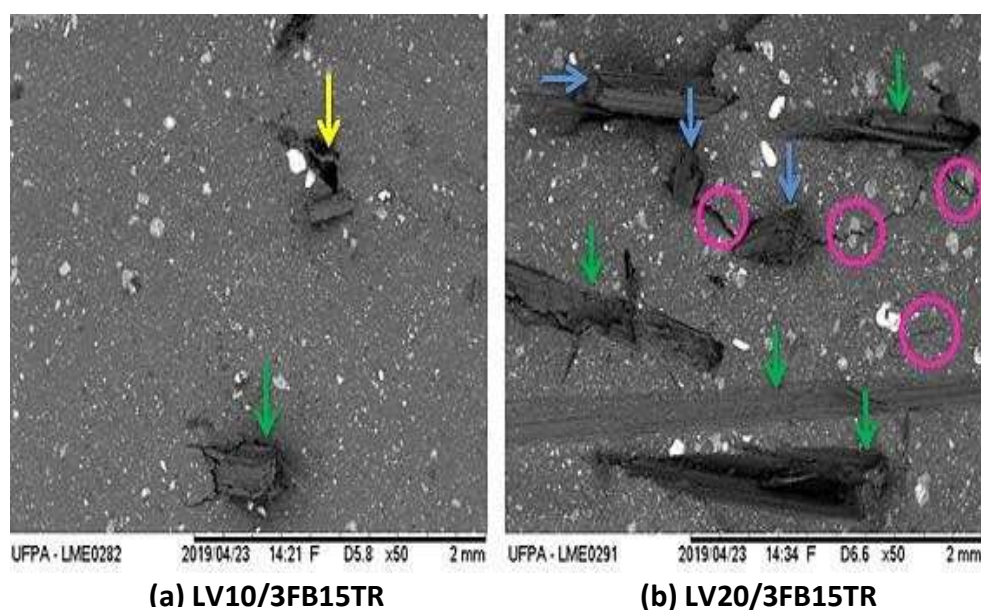


Figura 4.43 – Análise microscópica dos compósitos híbridos com LV/3FB15TR .

A Figura 4.37 (a) mostra o resultado da análise por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizada no material compósito híbrido de 3 %/10 % (Fibra/Resíduo). A imagem mostra (seta amarela) a presença de fibras arrancadas (*pull-out*) e mecanismo de fibra rompida (seta verde). O mecanismo de fibras arrancadas pode interferir negativamente no desempenho mecânico dos compósitos, já o mecanismo de rompimento de fibras demonstra que houve uma boa adesão entre os componentes envolvidos, conferindo melhorias na resistência à tração dos compósitos.

O resultado da análise microscópica realizada no material compósito híbrido de 3 % de fibras de bambu tratadas e 20 % de lama vermelha mostrado na Figura 4.37 (b) demonstra que o material apresentou descolamento, desfibrilamento e fibras dispostas transversalmente na direção de aplicação da força (setas verdes), fibras rompidas (setas azuis) e presença de trincas (círculos rosas).

- **Matriz polimérica com lama vermelha e fibras de bambu de 30 mm sem tratamento**

Os compósitos híbridos com inserção de lama vermelha e fibra de bambu de 30 mm sem tratamento foram caracterizados em relação a resistência a tração, onde foram obtidos os seguintes resultados, como mostra a Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Resistência mecânica de tração dos compósitos híbridos LV/3FB30NT.

Fração mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
0	24,24 ($\pm$ 2,38)	4,08	1,03
LV10/3FB30NT	31,06 ($\pm$ 4,28)	5,92	1,05
LV20/3FB30NT	27,83 ($\pm$ 3,18)	5,63	0,92
LV30/3FB30NT	21,14 ($\pm$ 3,91)	5,20	0,71
LV40/3FB30NT	26,53 ($\pm$ 4,39)	5,03	1,00

Nos resultados de resistência à tração da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com inserção de lama vermelha e reforço de fibras de bambu 30 mm não tratadas, observou-se que a medida que aumenta a fração de resíduo, ocorre uma sutil diminuição na resistência, com exceção do compósito LV30/3FB30NT que ocorreu uma diminuição, onde o resíduo e as fibras não funcionaram como carga de reforço, pois sua resistência foi inferior ao da matriz sem carga. Tal situação pode ser justificada por conta do processo de fabricação, que pelo fato de ser manual, pode ter ocasionado algum problema na impregnação e compactação dos compósitos. Mostram-se esses resultados graficamente na figura seguir.

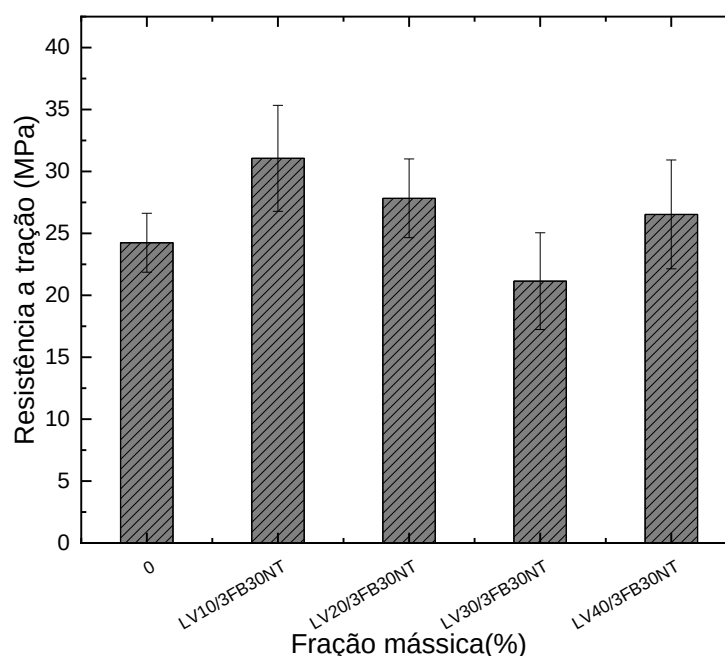


Figura 4.44 - Comportamento de resistência mecânica a tração dos compósitos híbridos LV/3FB30NT

Com o gráfico verificasse visualmente o comportamento dos compósitos com relação a sua resistência mecânica, ratificando o que anteriormente já identificado como o melhor resultado apresentado.

Na análise microestrutural dos compósitos de lama vermelha com fibras de bambu de 30 mm não tratadas (figura 4.45). Foram realizadas as análises nos compósitos LV10/3FB30NT e LV30/3FB30NT, os quais apresentaram o maior e o menor resultado nos ensaios mecânicos de tração respectivamente.

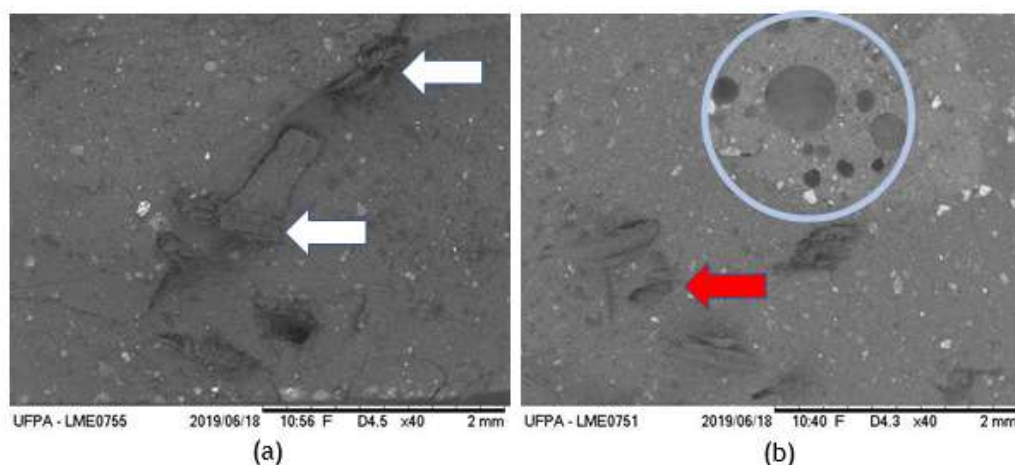


Figura 4.45– Microscopia eletrônica de varredura de LV/3FB30NT: (a) LV10/3FB30NT, (b) LV30/3FB30NT

Na figura 4.45 (a) mostra-se a microestrutura do compósito híbrido com inserção de lama vermelha na fração de 10 % com fibras de bambu de 30 mm não tratadas, nota-se uma predominância de fibras rompidas (setas brancas), o que pode ter contribuído para o aumento da resistência.

Já em 4.45 (b) nota-se uma concentração de vazios (círculo azul) que pode ter sido ocasionado no processo de fabricação, como dificuldade de homogeneização dos constituintes, fatores que podem ter contribuído para a baixa resistência do compósito. Também pode ser observado no círculo verde, uma coloração esbranquiçada, que sugere que houve um aglomerado de resíduo que pode ter colaborado para diminuição da resistência a tração. É possível verificar nas imagens fibras arrancadas *pull out* (seta vermelho) que evidência que não houve uma boa adesão entre a fibra/ matriz, fato este que pode ter contribuído para a diminuição da resistência mecânica de tração do compósito.

Costa (2016) analisou a superfície de fratura de compósitos híbridos de lama vermelha e fibra de sisal, e observou que na fração de 30 % de LV o compósito apresentou características semelhante a apresentada na Figura (b) como vazios, bolhas, e fibras descoladas da matriz.

- **Matriz polimérica com lama vermelha e fibras de bambu de 30 mm com tratamento**

Os compósitos poliméricos com inserção de lama vermelha e reforço de fibra de bambu de 30 mm tratadas quimicamente, foram submetidos a avaliação mecânica, para verificação da resistência por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados como mostra a Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Resistência mecânica de tração dos compósitos híbridos LV/3FB30TR.

Fração mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
0%	24,24 ($\pm$ 2,38)	4,08	1,03
LV10/3FB30TR	28,85 ($\pm$ 0,67)	6,19	0,97
LV20/3FB30TR	28,87 ($\pm$ 1,27)	5,12	1,09
LV30/3FB30TR	24,47 ($\pm$ 3,05)	5,00	0,89
LV40/3FB30TR	24,73 ($\pm$ 1,23)	5,07	0,94

Observa-se na tabela 4.22 que os resultados de resistência a tração encontrados nos compósitos híbridos produzidos foram superiores a resistência apresentada pela matriz sem carga nas frações de LV10/3FB30TR e LV20/3FB30TR, obtendo-se um aumento da resistência à tração do compósito híbridos quando as fibras são tratadas quimicamente.

O híbrido que apresentou melhor resultado foi o LV10/3FB30TR com a resistência de 28,85 MPa, em comparação com a fração de LV20/3FB30TR que apresentou uma resistência de 28,87 MPa, mas com desvio padrão menor. Os compósitos híbridos com inserção de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu 30 mm tratadas produzidos por Borges (2017) alcançaram resultados de 22,74; 31,96; 31,31 MPa nas frações de 10, 20 e 30 % respectivamente, sendo superior a matriz plena que apresentou uma resistência de 19,54 MPa.

Quando comparado os compósitos híbridos com inserção de lama vermelha e fibra tratadas e não tratadas quimicamente, verificasse que não houve ganhos expressivos com relação a resistência mecânica nos compósitos produzidos com lama vermelha e fibras tratadas quimicamente.

No gráfico da figura 4.46, a seguir, mostra-se o comparativo da matriz sem carga e dos compósitos híbridos com inserção de lama vermelha nas frações de 10, 20, 30 e 40 % com

fibras de bambu na fração de 3 % no comprimento de 30 mm tratadas, quanto as suas resistências à tração.

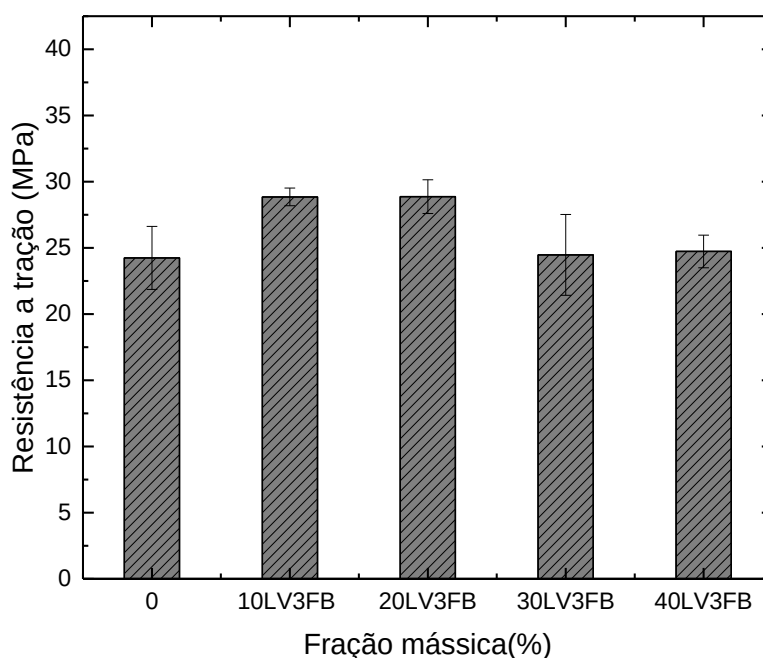


Figura 4.46 - Comportamento de resistência mecânica dos compósitos híbridos LV/3FB30TR.

Na figura 4.46 mostram-se os resultados do comportamento de resistência à tração em função da proporção de resíduo e as fibras de 30 mm tratadas. Pode-se observar que a fração de resíduo de LV10/3FB30TR e LV20/3FB30TR se destacam das demais, apresentando resultados superiores das outras proporções.

A caracterização fractográfica dos compósitos de lama vermelha com fibras de bambu de 30 mm tratadas quimicamente é mostrada na figura 4.47.

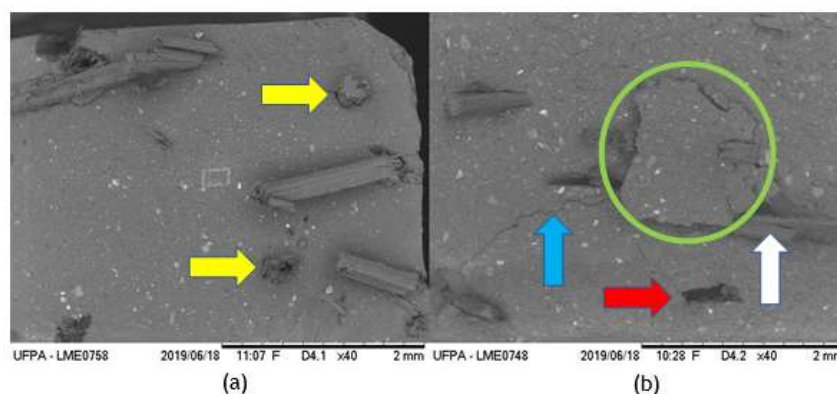


Figura 4.47 – Microscopia eletrônica de varredura de LV/3FB30TR: (a) LV10/3FB30TR, (b) LV30/3FB30T

Foram realizadas as análises de microscopia eletrônica por varredura (MEV) nos compósitos LV10/3FB30TR e LV30/3FB30TR os quais apresentaram o maior e o menor resultado nos ensaios mecânicos de tração respectivamente. Na Figura 4.47 (a) as setas amarelas destacam o rompimento de fibras, resultado de boa ancoragem das fibras na matriz, já em 4.47 (b) a área circulada inicia a propagação de trinca indicadas pela seta azul, além da presença de vazios indicado pela seta vermelha. Formações que contribuíram para a diminuição da resistência a tração nesta composição.

- **Matriz polimérica com resíduo de caulim**

Foram obtidos os seguintes resultados dos ensaios de tração dos compósitos poliméricos reforçados com resíduo de caulim como mostra na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos poliméricos reforçados com resíduo de caulim.

Fração Mássica (%)	Resistência à Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
0	21,34 ($\pm$ 1,84)	4,04	1,01
RCA10	31,43 ($\pm$ 4,13)	4,88	1,87
RCA20	37,05 ($\pm$ 4,53)	5,07	1,17
RCA30	33,05 ($\pm$ 2,28)	4,93	1,59
RCA40	26,92 ($\pm$ 1,50)	4,31	1,09

Na Tabela 4.23 nota-se um aumento da resistência à tração, quando há o aumento da fração de resíduos de caulim nos compósitos poliméricos até a fração de 20 % de resíduo, e uma gradativa diminuição quando aumentado à fração de resíduo até 40 % de resíduo. Essa diminuição na resistência à tração mostra que o RCA agiu como carga de reforço, ocasionado por defeitos gerados durante o processo da sua confecção.

Mesmo com a diminuição do limite de resistência à tração, todos os compósitos reforçados com resíduo de caulim apresentaram resistência à tração e alongamentos superiores ao comparado a matriz plena.

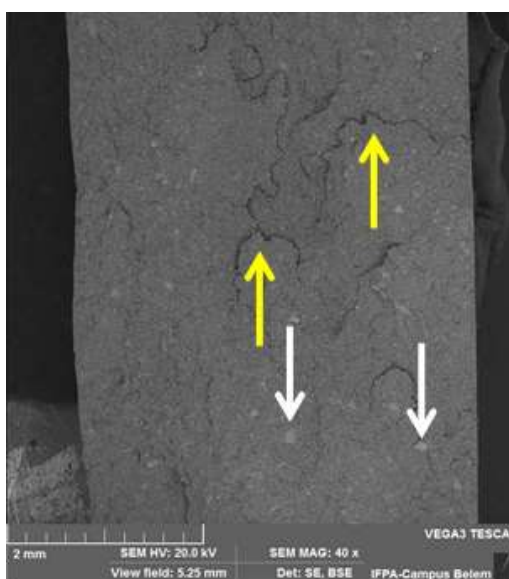
Segundo Silva (2018), que trabalhou com o resíduo de caulim com as frações mássicas de 10%, 20%, 30% e 40%, observou-se um aumento na resistência à tração, sendo que na fração

de 20 % de resíduo de caulim obteve o maior valor, de 41,35 MPa, já nas frações de RCA10 e RCA30 houve uma menor resistência à tração, mais ainda superiores a matriz plena, na fração de 40 % apresentou a menor resistência à tração, justificada por ele devido a maior quantidade de resíduo de caulim e menor quantidade de resina no material.

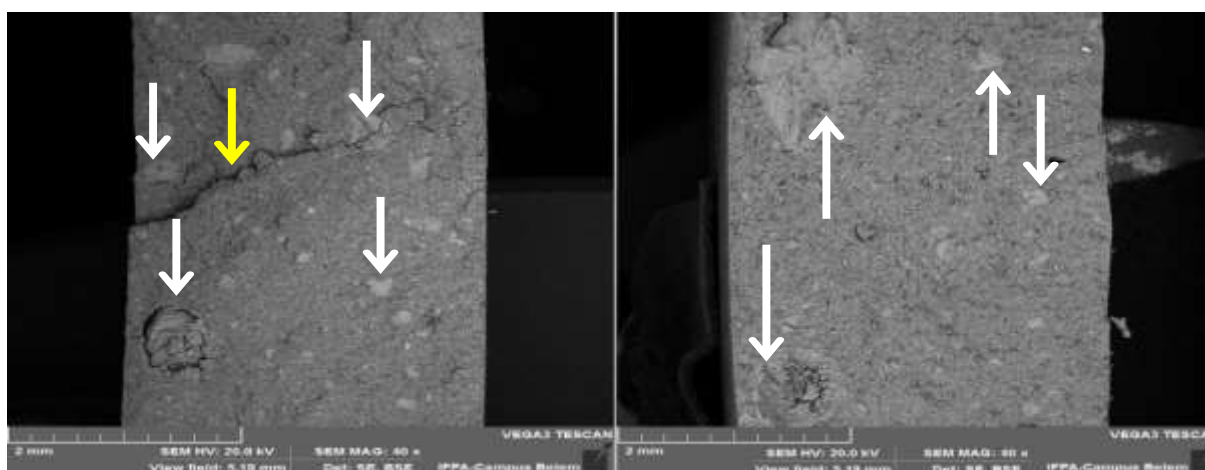
Costa (2016), trabalhou com o resíduo de caulim com as frações mássicas de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, entre as frações observou-se um aumento na resistência à tração na fração de 10 % de resíduo de caulim, no valor de 23,83 MPa, já nas outras frações houve menor resistência à tração, todas inferiores a matriz plena, indicando que o resíduo de caulim atuou como carga de enchimento passiva dentro da matriz polimérica e não atuando como reforço, ocasionado pela dificuldade de homogeneização, impregnação e compactação na interface matriz/reforço, além de, o aumento de resíduo de caulim aumenta a porosidade no compósito, o que deprecia sua resistência à tração.

Os resultados de resistência à tração obtidos nos compósitos poliméricos reforçados com resíduo de caulim foram inferiores aos comparados com resultados obtidos por Silva (2018), e superiores aos comparados aos encontrados por Costa (2016).

Nas superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos reforçados com resíduo de caulim (figura 4.48), notou se defeitos formados no processo de fabricação e áreas de pontos sedimentados, ocasionados pela dificuldade de homogeneização, impregnação e compactação na interface matriz/reforço, o que, segundo Costa (2016), repercute na diminuição da resistência à tração nos compósitos reforçados com resíduo de caulim na fração mássica de 40 %, como mostrado nos valores obtidos.



(a)



(b)

Figura 4.48– Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos reforçados com resíduo de caulim: (a) RCA30 e (b) RCA40

Na figura 4.48 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito reforçado com 30 % de resíduo de caulim e em 4.48 (b) tem-se a superfície de fratura do compósito reforçado com 40 % de resíduo de caulim, onde pode-se observar nas duas figuras a presença de trincas na matriz (seta amarela) e de pontos sedimentados (seta branca) e alguns defeitos ocasionados pela sedimentação, esses fatores ocasionam negativamente o desempenho do compósito.

- **Matriz polimérica com resíduo de caulim e fibras de bambu de 15 mm não tratadas**

Foram obtidos os seguintes resultados dos ensaios de tração dos compósitos poliméricos híbridos reforçados com resíduo de caulim e fibra de bambu 15 mm não tratadas conforme mostrado na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos híbridos com resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm não tratadas

Fração Mássica (%)	Resistência à Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
0	21,34 ($\pm 1,84$)	4,04	1,01
RCA10/3FB15NT	23,91 ($\pm 2,57$)	4,53	1,44
RCA20/3FB15NT	18,78 ($\pm 1,73$)	4,22	1,18
RCA30/3FB15NT	28,54 ($\pm 4,72$)	4,81	1,67

As fibras de bambu melhoram a ancoragem na matriz, juntamente com o resíduo do beneficiamento do caulim, contribuem para a melhora na resistência à tração dos compósitos. O aumento na fração mássica de resíduo de caulim ocasiona uma queda na resistência à tração, que pode ser gerado pela dificuldade de impregnação da interface fibra/matriz/particulado.

Na Tabela 4.24 observa-se um aumento da resistência à tração no compósito híbrido reforçados com RCA10/3FB15NT quando comparado com a matriz plena, enquanto que no compósito híbrido com RCA20/3FB15NT nota-se uma resistência à tração inferior a matriz plena e no compósito híbrido com RCA30/3FB15NT há um aumento da resistência à tração, maior da série, onde apresentou o resultado de 28,54 MPa.

Barbosa (2018) confeccionou compósitos reforçados com resíduo de caulim flint e fibras de bambu 15 mm não tratadas e como resultado de resistência à tração, obteve o valor máximo de 24,47 MPa para o compósito com fração de 10 % de resíduo e 3 % de fibra, valor superior somente ao compósito de 20 % de resíduo e 3 % de fibra não tratada, deste trabalho, no valor de 18,78 MPa. O limite de resistência à tração avaliado por Santos et al. (2017) em compósitos híbridos reforçados com resíduo de cobre e fibra de bambu 15 mm não tratadas foram superiores comparado aos compósitos híbridos com as fibras não tratada deste trabalhado.

- **Matriz polimérica com resíduo de caulim e fibras de bambu de 15 mm tratadas**

Na tabela 4.25 são mostrados os limites de resistência a tração dos compósitos com resíduos de caulim e fibras de bambu de 15 mm tratadas.

Tabela 4.25 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos com resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm tratadas

Fração Mássica (%)	Resistência à Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear(mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
0	21,34 ($\pm$ 1,84)	4,04	1,01
RCA10/3FB15TR	36,88 ($\pm$ 3,57)	5,02	1,13
RCA20/3FB15TR	41,07 ($\pm$ 2,33)	5,22	1,25
RCA30/3FB15TR	35,20 ($\pm$ 3,40)	4,72	1,10

Nos compósitos híbridos reforçados com resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm tratadas, apresenta um aumento à medida que é aumentada a fração de resíduo de caulim na

matriz polimérica até a fração de 20 % de resíduo, onde o resultado apresentado foi de 41,07 MPa. Aumentando a fração de resíduo de caulim acima de 20 %, nota-se uma diminuição da resistência à tração.

A Figura 4.49 mostra o gráfico de barra comparativo da matriz plena e dos compósitos reforçados com resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm não tratadas e tratadas, onde pode se observar que houve grande diferença entre as séries com fibras tratadas e não tratadas. Mas pouca variação entre os híbridos com fibras tratadas e, uma grande variação entre os compósitos com fibras não tratadas.

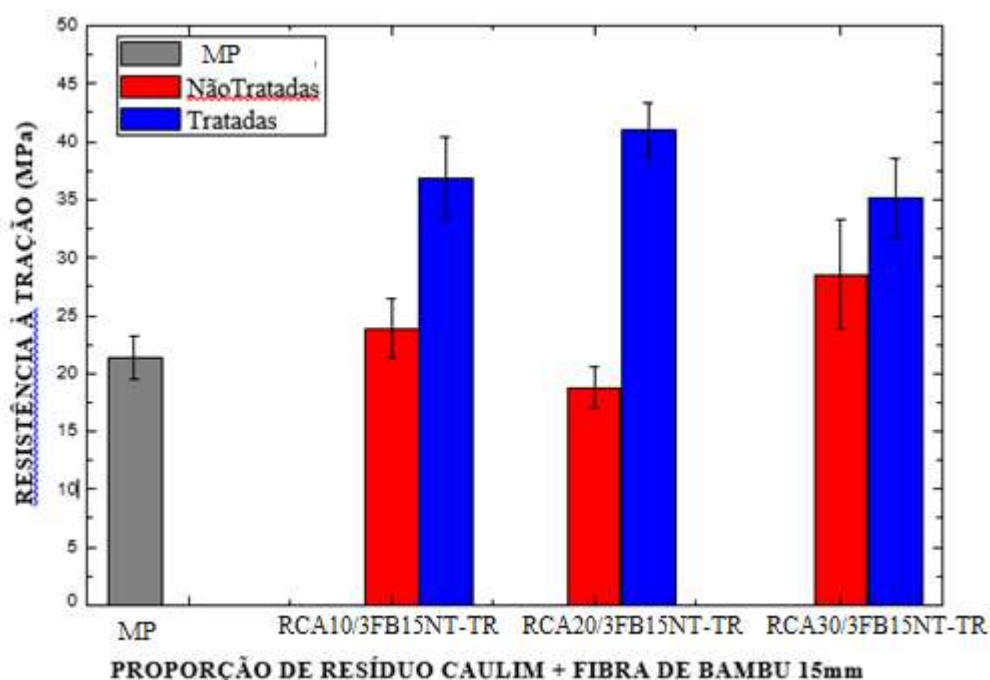


Figura 4.49 – Comportamento de resistência à tração dos compósitos em função das frações de resíduo de caulim e fibras de bambu 15 mm com e sem tratamento

O desempenho obtido pelos compósitos híbridos com fibras tratadas, houve devido ao eficiente tratamento químico nas fibras e pela boa interação entre matriz/fibra tratada/particulado, como mencionado na literatura. Nos compósitos híbridos com fibras não tratadas a variação do limite de resistência à tração, com redução do desempenho é devido as fibras apresentam grande variação das propriedades físicas e mecânicas, sofrem degradação em ambientes naturais, alta absorção de umidade e variações dimensionais como geometria, superfície, comprimento e conteúdo.

Na figura 4.50, mostra-se as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos reforçados com resíduo de caulim e com fibra de bambu 15 mm tratadas e não tratadas. Observa-se imperfeição (vazio) e áreas com sedimentação do resíduo do caulim

decorrente do processo de fabricação, ocorrido pela má homogeneização e impregnação do resíduo/matriz. O vazio gera um ponto de concentração de tensão, gerando a propagação de trincas, fazendo que ocorra uma fratura precoce nessa região, já a sedimentação do resíduo atua como carga de enchimento no compósito, não influenciando no aumento da resistência à tração. Apresentam pouca presença de fibras nos compósitos analisados, das quais apresentaram como fibras rompidas e arrancadas, gerando um aumento de resistências à tração nesses compósitos.

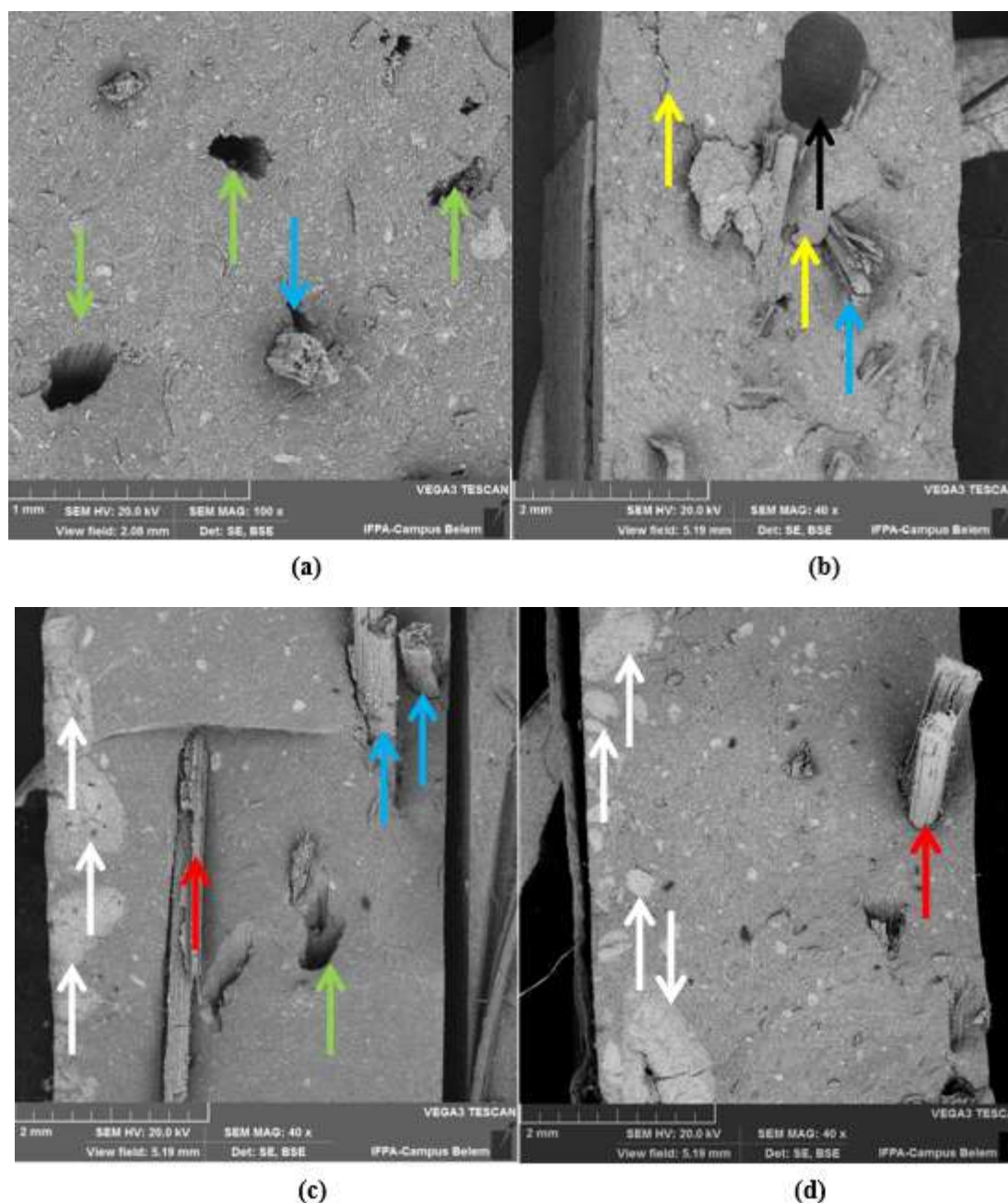


Figura 4.50 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos com resíduo de caulim e com fibra de bambu 15 mm: tratadas (a) RCA10/3FB15TR e (b) RCA30/3FB15TR; não tratadas (c) RCA10/3FB15NT e (d) RCA20/3FB15NT.

Na figura 4.50 (a) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com 3 % de fibra de bambu 15 mm tratada e 10 % de resíduo de caulim, onde pode-se observar a presença de fibras sendo arrancadas (seta verde) e de fibras rompidas (setas azuis), nota-se uma boa aderência entre fibra e matriz que contribuem para um aumento na propriedade mecânica de tração dos compósitos. Em 4.50 (b) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com 3 % de fibra de bambu 15 mm tratada e 30 % de resíduo de caulim, pode-se observar a presença de vazio (seta preta) gerando um ponto de concentração de tensão, ocasionando a propagação de trincas na matriz (seta amarela), que influenciam negativamente na propriedade mecânica do compósito. Já em 4.50 (c) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com 3 % de fibra de bambu 15 mm não tratada e 10 % de resíduo de caulim, pode-se observar a presença de pontos sedimentados (seta branca), fibras sendo arrancadas (seta verde) e fibras descoladas (seta vermelha) e dispostas na matriz transversalmente à direção do carregamento, esses fatores ocasionam negativamente o desempenho do compósito. Em 4.50 (d) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com 3 % de fibra de bambu 15 mm não tratada e 20 % de resíduo de caulim, pode-se observar a presença de fibras descoladas (seta vermelha) e pontos sedimentados (seta branca) que influenciam negativamente na propriedade mecânica do compósito.

Não foi possível confeccionar compósitos híbridos com fração de resíduo superior a 30 %, pois a mistura atinge o ponto de gel muito rápido, não conseguindo distribuir a mistura de resina e resíduo de caulim sobre as fibras no molde uniformemente.

- **Matriz polimérica com resíduo de caulim e fibras de bambu de 30 mm não tratadas**

Os compósitos poliméricos com inserção de resíduo de caulim e reforço de fibra de bambu de 30 mm foram avaliados de acordo com sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados como mostra a tabela 4.26.

Tabela 4.26 - Resultados do ensaio de tração de compósitos com Inserção de Resíduo de Caulim e Reforço de Fibras de Bambu de 30 mm NT

Tipo de Amostra	Fração Mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
MP	0	24,24 ($\pm 2,38$)	4,08	1,03
RCA/3FB30NT	RCA10/3FB30NT	22,73 ($\pm 4,91$)	4,62	0,92
	RCA20/3FB30NT	33,75 ($\pm 9,89$)	5,24	1,32
	RCA30/3FB30NT	22,07 ($\pm 4,73$)	4,06	1,01

Na tabela 4.26, na proporção de RCA20/3FB30NT na matriz polimérica nota-se um aumento na resistência à tração e no módulo de elasticidades em relação à matriz plena.

As porcentagens de RCA10/3FB30NT e RCA30/3FB30NT foi possível observar um valor menor comparado com a matriz plena.

Na figura 4.51, a seguir, são mostrados graficamente o comportamento mecânico por meio dos ensaios de tração dos resíduos de caulim com as fibras de bambu de 30 mm não tratadas.

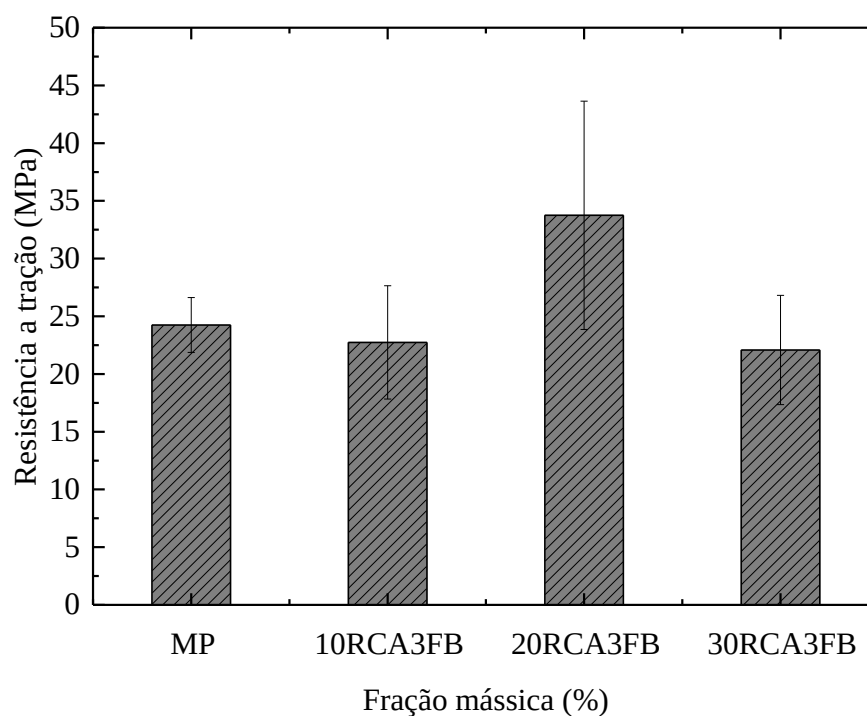


Figura 4.51 – Comportamento de resistência à tração de material compósito híbrido em função da proporção RCA20/3FB30NT

Nesta figura pode-se observar que os compósitos de 20 % de resíduo de caulim e 3 % de fibras no comprimento de 30 mm obtiveram um valor de resistência á tração maiores, além dos desvios padrões de cada proporção.

Na próxima figura 4.52 são apresentadas as superfícies de fratura após a realização do ensaio mecânico evidenciando as características de ruptura do compósito.

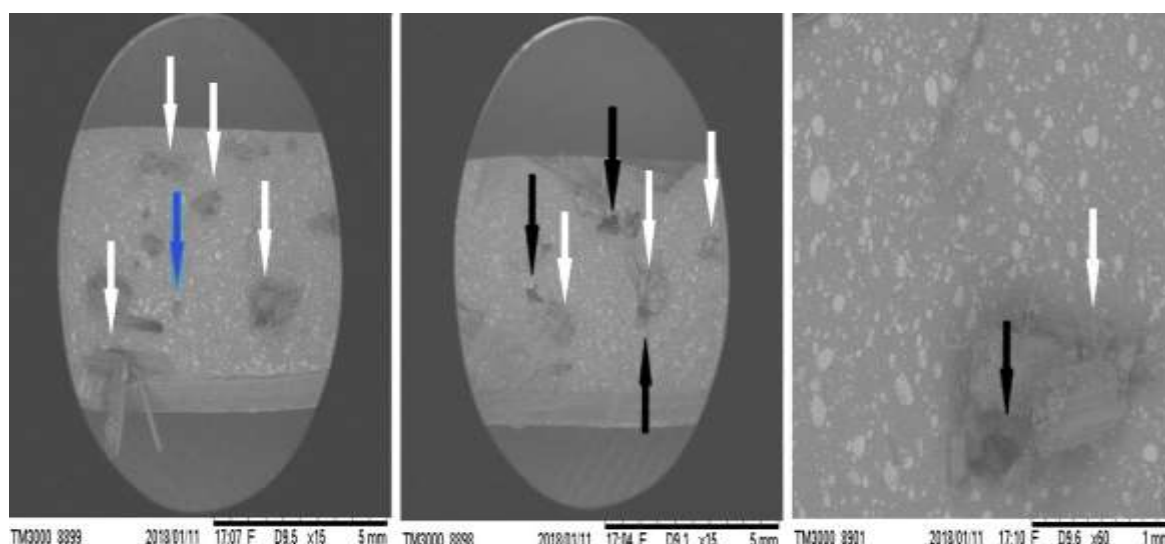


Figura 4.52 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos poliméricos com adição de resíduo e fibras de bambu 30 mm sem tratamento

A fratura da figura 4.52 de compósito de matriz polimérica com adição de resíduo de caulim e fibras de bambu 30 mm mostra uma superfície de fratura com bastantes fibras rompidas (setas brancas), os fenômenos de descolamento de fibras da matriz (setas pretas), prejudicando a resistência dos compósitos.

- **Matriz polimérica com resíduo de caulim e fibras de bambu de 30 mm tratadas**

Na tabela 4.27 a seguir são apresentados os resultados dos limites de resistência a tração dos compósitos com a incorporação do resíduo de caulim e fibras de bambu de 30 mm com tratamento químico;

Tabela 4.27 - Resultados do ensaio de tração de compósitos com Inserção de Resíduo de Caulim e Fibras de Bambu de 30 mm com tratamento

Frassão Mássica (%)	Resist. Tração (MPa) (Desvio Padrão)	Alongamento Linear (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0	24,24 ($\pm 2,38$)	4,08	1,03
RCA10/3FB30TR	31,01 ($\pm 5,24$)	4,87	1,24
RCA20/3FB30TR	34,85 ($\pm 5,37$)	4,82	1,33
RCA30/3FB30TR	31,25 ($\pm 5,09$)	4,46	1,26

Na análise da tabela 4.27 com a adição dos resíduos de caulim com as fibras de bambu com 30mm tratadas, observa-se o aumento da resistência a tração com a incorporação dos materiais, chegando ao valor de 34,85 MP para a proporção de 20% de caulim.

Já no gráfico da figura 4.53, são apresentados os valores do limite de resistência a tração para esta série de compósitos produzidos.

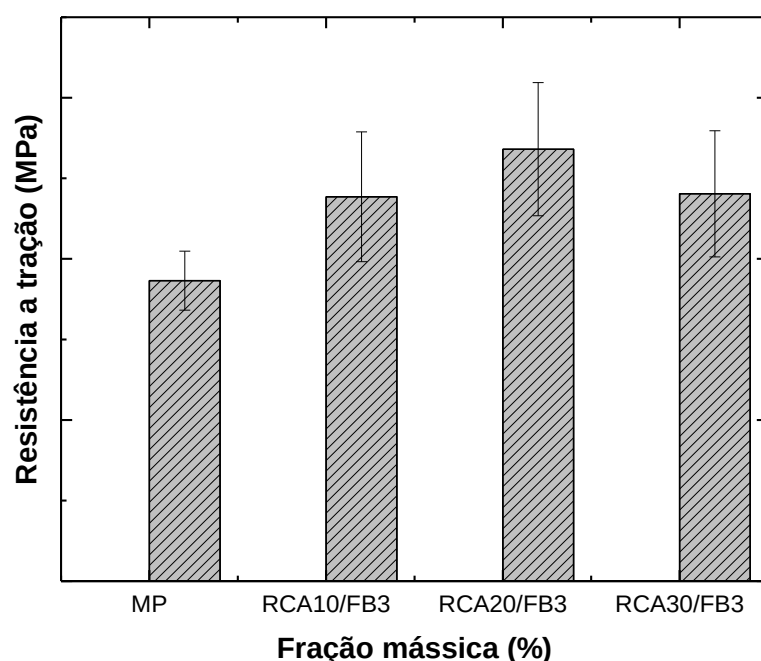
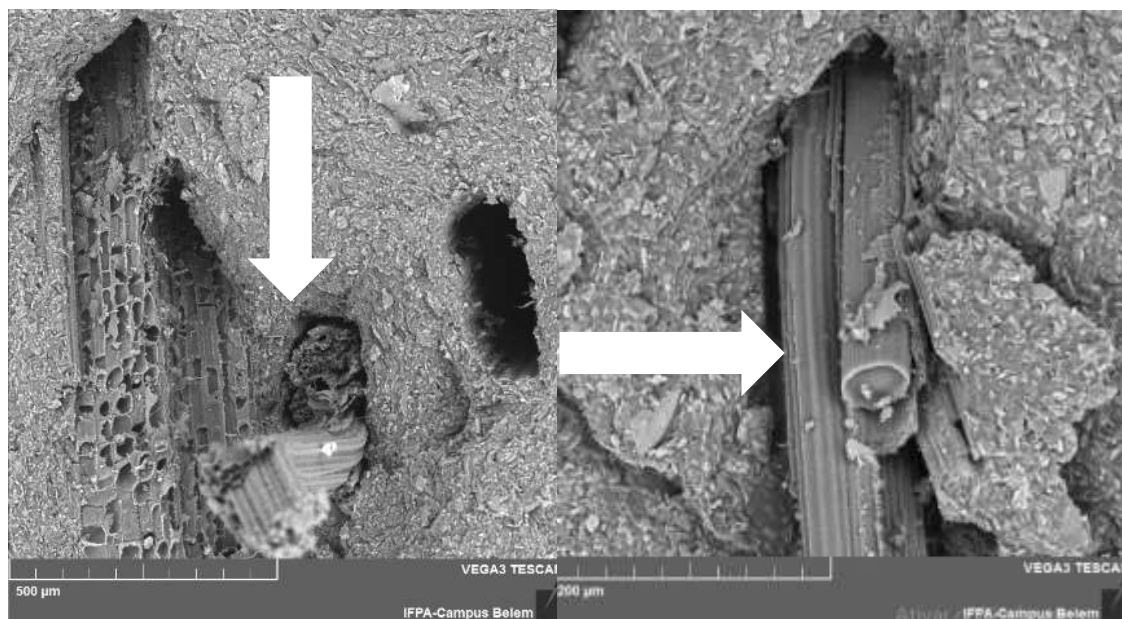


Figura 4.53 – Comportamento mecânico a tração dos compósitos com adição de resíduos de caulim e fibras de bambu de 30 mm com tratamento

Observa-se o aumento, mesmo que alternado, junto com a adição de resíduo de caulim ficando a valores de 43,77% superiores a matriz plena que foi produzida.

Na figura 4.54 a seguir são mostradas as superfícies de fratura, por meio de MEV, com adição dos resíduos de caulim e das fibras de bambu de 30 mm tratadas.



(a) RCA20/3FB30TR

(b) RCA30/3FB30TR

Figura 4.54 – Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos após os ensaios de tração com adição do resíduo de caulim e das fibras de bambu de 30 mm com tratamento.

Na análise das imagens são mostrados os mecanismos predominantes na região da fratura que em 4.54 (a) identifica-se que houveram rompimentos das fibras no momento da fratura, junto com o resíduo de caulim a matriz, essa combinação contribuiu para uma maior interação da interface fibra/resíduo/matriz. Já em 4.54 (b) com a proporção de 30% do resíduo de caulim, nota-se que houve o *pull out* das fibras inseridas na matriz.

4.4.2.2 - Ensaio de Resistência à Flexão

- **Matriz polimérica com fibras de bambu de 15 mm**

Os compósitos de Matriz polimérica com incorporação das fibras de bambu nos comprimentos de 15 mm foram avaliados por meio do ensaio de resistência a flexão em 3 (três) pontos, onde foram gerados os resultados referentes a tensão de flexão, deflexão e modulo de flexão, conforme mostrado na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão MP + FB15mm

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
MP	82,86(±3,19)	1,25(±0,38)	13,80(±1,22)
FB1% 15NT	84,54 (± 2,04)	1,41 (± 0,24)	16,91 (±1,94)
FB2% 15NT	94,77(±3,74)	2,29(±0,15)	16,10 (±2,06)
FB3% 15NT	102,77(±5,36)	1,52(±0,39)	14,12(±1,14)
FB1% 15TR	102,30(±9,19)	1,32(±0,30)	19,96(±1,35)
FB2% 15TR	120,90 (±8,77)	1,12(±0,16)	18,34(±0,14)
FB3% 15TR	124,06(±5,11)	1,50(±0,28)	19,88 (±0,81)

Observa-se nos resultados da tabela 4.28 que houve um aumento significativo com a incorporação das fibras de 15 mm, principalmente quando se aumenta a quantidade de fibras com tratamento alcalino, chegando ao valor de 124,06 MPa de resistência a flexão média.

A Figura 4.55, a seguir, ilustra-se o gráfico comparativo da matriz plena e dos compósitos incorporados com fibras de bambu de 15 mm nas frações 1%, 2% e 3% quanto aos seus resultados médios de resistência a flexão.

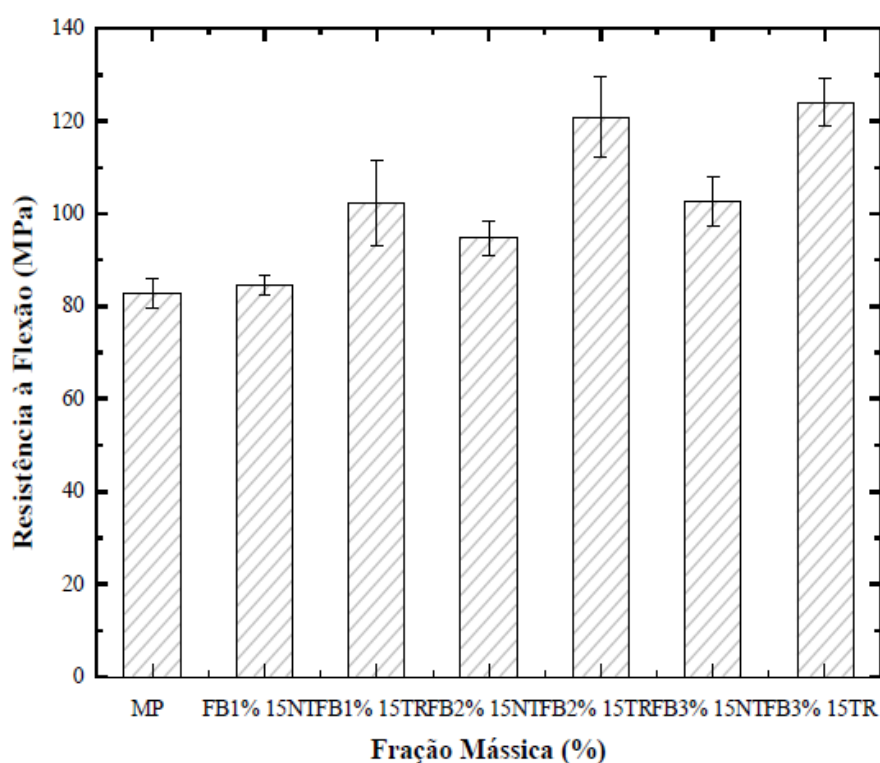


Figura 4.55 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão MP + FB 15 mm.

No gráfico da figura 4.55, nota-se esse crescimento da resistência a flexão observado na tabela anterior. Estes resultados desta série são compatíveis com os encontrados por GOUD *et al.*, 2019; MOHAN e KANNY (2019), mas inferiores quando comparados com SRIVASTAVA *et al.* (2019) que utilizou compósito de matriz epóxi com grafeno em sua estrutura.

Na análise das superfícies de fratura da figura 4.56 a seguir, mostram os compósitos sem e com a presença de fibras na sua estrutura para identificação dos principais mecanismos de falha predominantes nos compósitos com a inserção de fibras de bambu de 15mm após os ensaios de resistência a flexão.

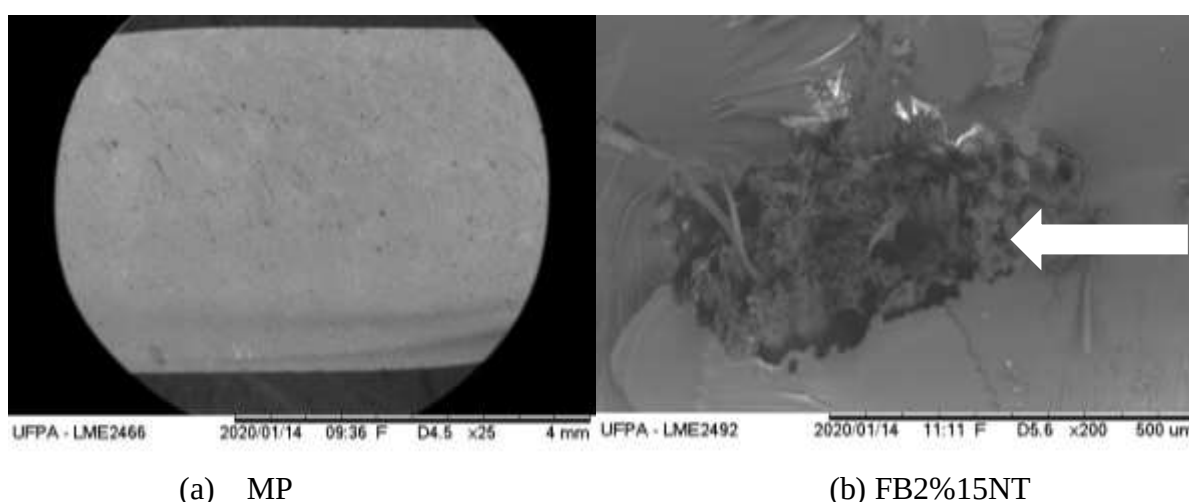


Figura 4.56 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com fibras de bambu de 15mm sem tratamento

As imagens mostradas identificam as superfícies de fratura da matriz plena (a) e em (b) a matriz com a presença de 2% de fibras de bambu com tratamento alcalino, na qual nota-se o rompimento das fibras no momento da fratura, denotando uma boa adesão da interface fibra/matriz, o que gerou uma boa resistência a flexão alcançando o valor de 120,90 MPa.

- **Matriz polimérica com fibras de bambu de 30 mm**

Os compósitos de Matriz polimérica com incorporação das fibras de bambu nos comprimentos de 30 mm foram avaliados por meio do ensaio de resistência a flexão em 3 (três) pontos, onde foram gerados os resultados referentes a tensão de flexão, deflexão e modulo de flexão, conforme mostrado na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão MP + FB30mm

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
MP	82,86(±3,19)	1,25(±0,38)	13,80(±1,22)
FB1% 30NT	133,55(±11,29)	1,32(±0,06)	17,86(±1,12)
FB2% 30NT	130,39 (±5,53)	2,21(±0,13)	19,59(±0,47)
FB3% 30NT	135,32(±3,10)	3,17(±0,26)	22,04(±1,97)
FB1% 30TR	107,14(±7,96)	1,54(±0,31)	18,38(±2,66)
FB2% 30TR	139,5(±2,03)	3,28(±0,49)	21,56(±1,03)
FB3% 30TR	150,94 (±2,88)	3,73(±0,17)	22,62(±0,50)

Observa-se na tabela 4.29 que com o aumento dos comprimentos das fibras de bambu que são inseridas na matriz, a resistência a flexão também tem um aumento significativo quando comparado com a matriz plena. Esses resultados obtidos são superiores aos encontrados por outros autores como PRASAD,2018; THREEPOP NATKUL e KULSETTHANCHALEE 2019; além de GHEITH, 2019.

Na próxima figura 4.57 esses resultados designa os comparativos dos valores obtidos nos compósitos com fibras de comprimentos de 30mm.

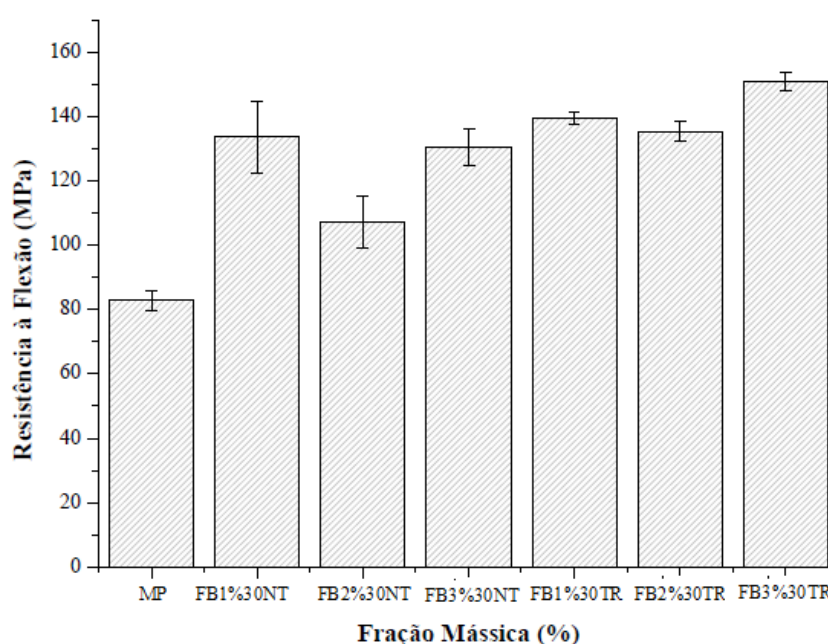


Figura 4.57 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão MP + FB 30 mm.

Observa-se o aumento consistente na resistência a flexão do compósito chegando ao valor de 82,16% maior em comparação com a matriz plena quando alcançado o valor de 150,94 MPa.

A seguir são analisadas na figura 4.58 as superfícies de fratura dos compósitos com a incorporação das fibras de bambu de 30 mm.

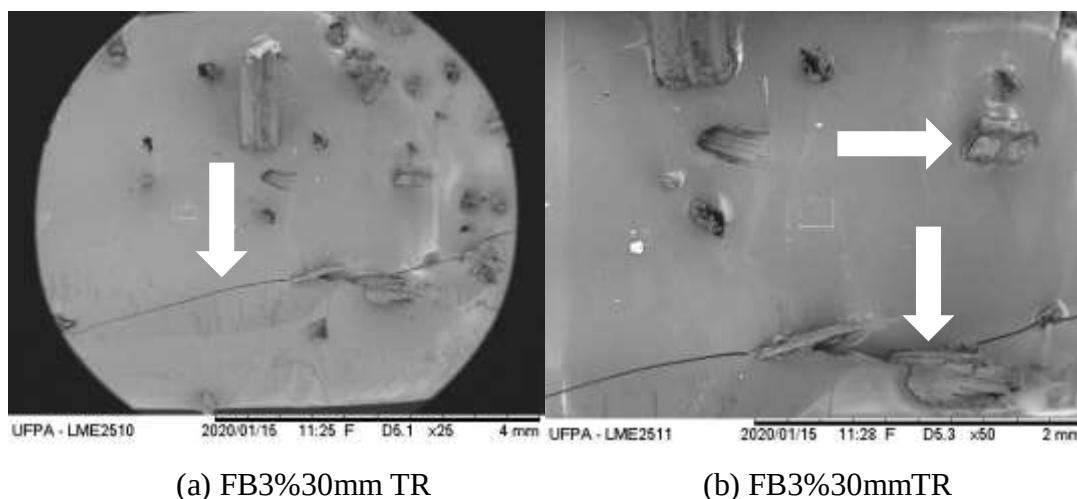


Figura 4.58 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com fibras de bambu de 30mm com tratamento

São destacados nas imagens com as proporções de 3% de fibras de bambu de 30 mm com tratamento alcalino e aumentos de 25x (a) e 50x (b), identificando que houve no aumento de 25x a propagação da trinca ao longo do corpo de prova e em 50x o rompimento das fibras junto com a matriz, resultando em uma matéria com resistência consistente.

- **Matriz polimérica com resíduo de cobre, lama vermelha e caulim**

Os compósitos de Matriz polimérica com incorporação dos resíduos industriais de cobre, lama vermelha e caulim foram avaliados por meio do ensaio de resistência a flexão em 3 (três) pontos, onde foram gerados os resultados referentes a tensão de flexão, deflexão e modulo de flexão, conforme mostrado na Tabela 4.30.

Tabela 4.30 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão dos resíduos

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
MP	82,86(±3,19)	1,25(±0,38)	13,80 (±1,22)
RCU10%	97,65(9,68)	1,31(±0,17)	20,16(±1,76)
RCU20%	101,46 (±3,99)	1,56(±0,18)	20,59(±1,19)
RCU30%	116,72(±3,72)	1,25(±0,16)	23,06(±2,4)
RCU40%	130,20(±2,73)	2,46(±0,17)	24,36(±1,71)
LV10%	105,18(±4,03)	1,66(±0,22)	19,46(±1,43)
LV20%	87,51(±4,06)	1,26(±0,32)	16,50(±1,58)
LV30%	95,60(±4,01)	1,43(±0,25)	19,48(±2,54)
LV40%	81,75(±3,04)	1,32(±0,33)	15,59(±1,86)
RCA10%	125,55(±5,7)	1,20(±0,09)	22,24(±1,95)
RCA20%	140,34(±12,53)	1,11(±0,09)	30,32(±4,41)
RCA30%	102,77(±6,66)	1,19(±0,15)	19,65(±2,41)
RCA40%	92,63(±3,77)	1,88(±0,16)	13,70(±1,71)

Houve uma alternância nos valores obtidos a partir da realização dos ensaios, mas observasse, no geral valores superiores ao da matriz plena, com exceção da série compósitos com a incorporação de 40% de lama vermelha.

Esses comportamentos com a variação dos resíduos industriais na matriz, são descritos no gráfico da figura 4.59 a seguir.

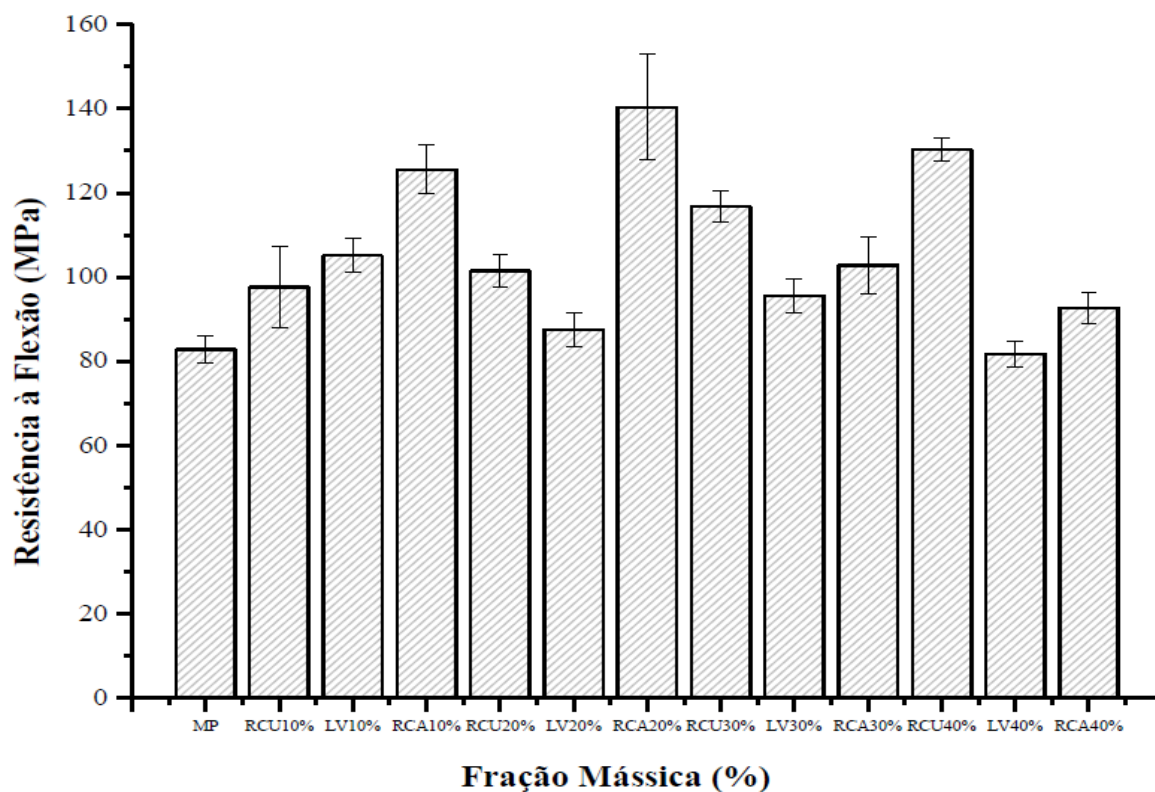


Figura 4.59 – Comportamento dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos resíduos na matriz polimérica

Nota-se na leitura do gráfico apresentado anteriormente, as escalas de comportamento de resistência a flexão alcançando o valor de 140,34 MPa, o qual é equivalente a um percentual de 69,37% superior se comparado com a matriz plena.

A seguir, na figura 4.60, são identificadas as superfícies de fratura dos compósitos com adição do resíduo de cobre e sua estrutura.

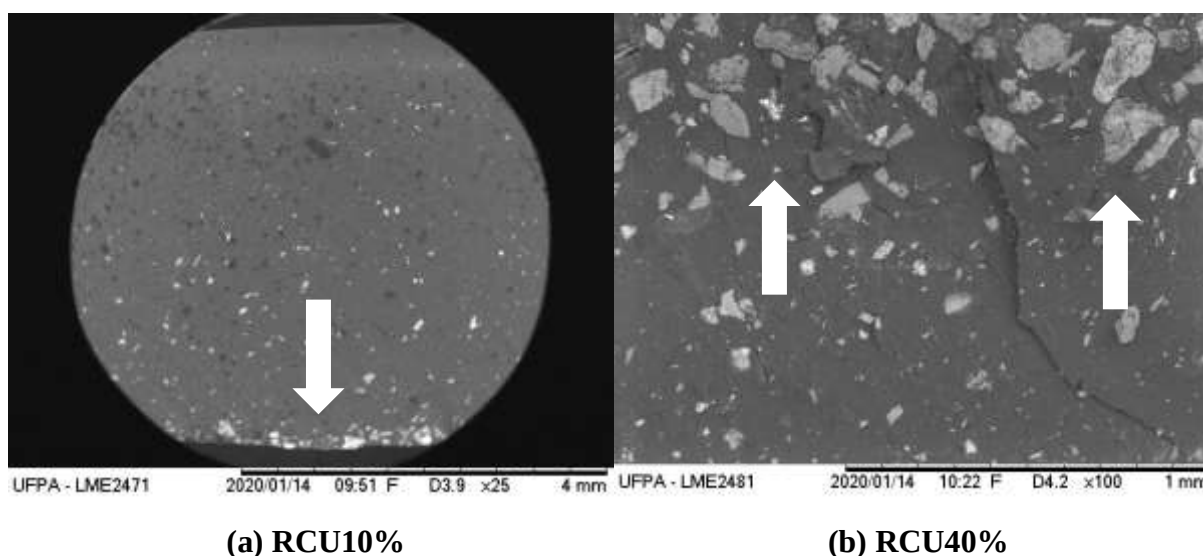


Figura 4.60 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com os resíduos

Observa-se que com a adição de 10% de resíduo de cobre (a) e de 40% desse material a distribuição de ais resíduo proporcionou um aumento da resistência apresentados no gráfico de comportamento desses compósitos, o que pode ser explicado pela melhor ligação da matriz com esse tipo de material. Comportamento este que já tinha sido observado nos ensaios de tração.

- **Matriz polimérica com resíduo de cobre e fibras de bambu**

Os compósitos de Matriz polimérica com incorporação do resíduo de cobre e das fibras de bambu foram avaliados por meio do ensaio de resistência a flexão em 3 (três) pontos, onde foram gerados os resultados referentes a tensão de flexão, deflexão e módulo de flexão, conforme mostrado na Tabela 4.31.

Tabela 4.31 – Resultados do ensaio de flexão dos resíduos de cobre e as fibras de bambu

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
MP	82,86(±3,19)	1,25(±0,38)	13,80 (±1,22)
RCU10%FB15mmNT	86,86 (±3,11)	1,64(±0,18)	14,04(±1,69)
RCU20%FB15mmNT	92,91 (±3,64)	1,65(±0,17)	14,68(±1,76)
RCU30%FB15mmNT	104,35(±3,09)	3,18(±0,72)	17,24(±1,98)
RCU10%FB15mmTR	101,28(±2,62)	3,47(±0,88)	17,13(±1,23)
RCU20%FB15mmTR	115,04(±5,36)	3,90(±0,76)	20,80(±2,09)
RCU30%FB15mmTR	123,13(±6,34)	3,55(±0,55)	23,02(±2,78)
RCU10%FB30mmNT	90,30(±6,19)	1,64(±0,29)	14,59(±1,98)
RCU20%FB30mmNT	83,70(±5,10)	2,41(±0,32)	14,95(±2,37)
RCU30%FB30mmNT	95,98(±5,91)	2,44(±0,67)	14,97(±2,40)
RCU10%FB30mmTR	103,42(±4,23)	2,76(±0,64)	19,35(±2,51)
RCU20%FB30mmTR	109,37(±4,05)	2,80(±0,52)	22,83(±1,99)
RCU30%FB30mmTR	121,64(±4,93)	2,43(±0,60)	24,68(±1,67)

Na análise da tabela 4.31 com os compósitos poliméricos com o resíduo de cobre e com as fibras de bambu destaca-se a fração mássica com 30% de resíduo de cobre e as fibras de bambu de 15 mm com tratamento alcalino alcançando o valor de 123,13 MPA de resistência a tensão de flexão e 23,04 GPa no módulo de flexão.

De posse desses dados foram gerados os comportamentos de tensão de flexão no gráfico da figura 4.61.

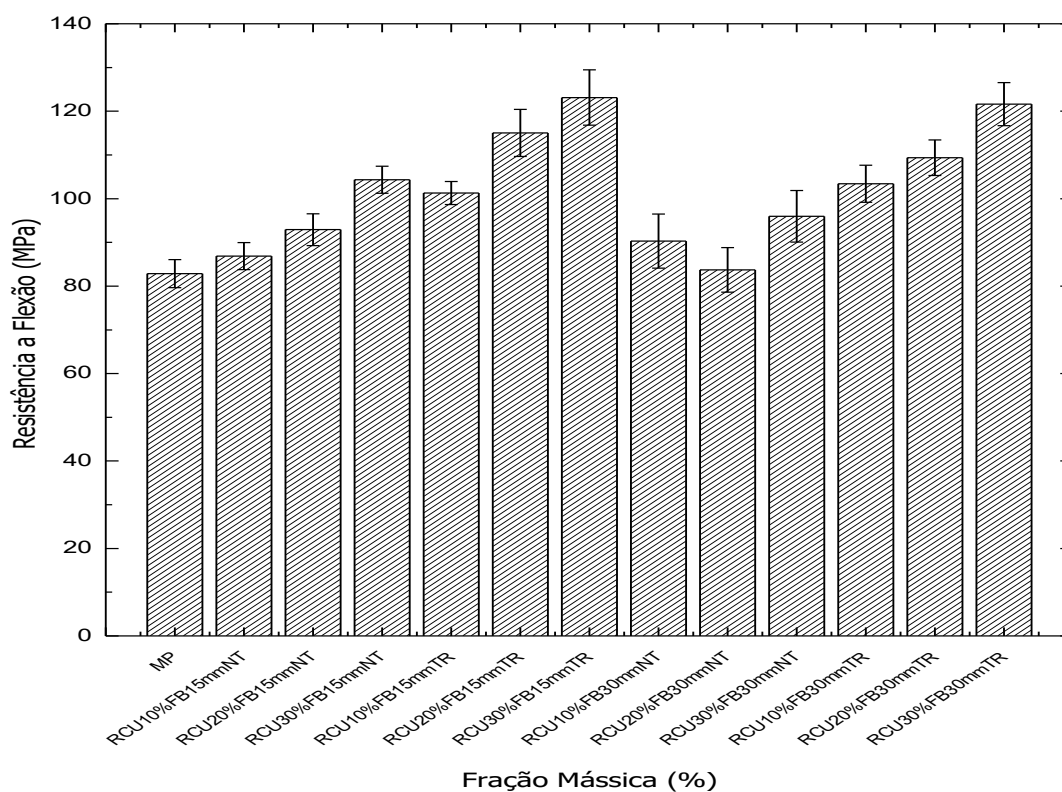


Figura 4.61 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão com resíduos de cobre e as fibras de bambu

Na figura 4.61, o gráfico de comportamento dessa série de compósitos mostrou a superioridade de todas frações e relação a matriz plena, com o aumento principalmente com as adições de fibras que passaram pelo processo de tratamento alcalino. Que são valores aproximados aos obtidos por GHEITH, et al. (2019).

Nas análises por meio de MEV, na figura 4.62, são identificadas superfícies com as variações do resíduo de cobre e as fibras de bambu, com os comprimentos variando de 15 e 30 mm.

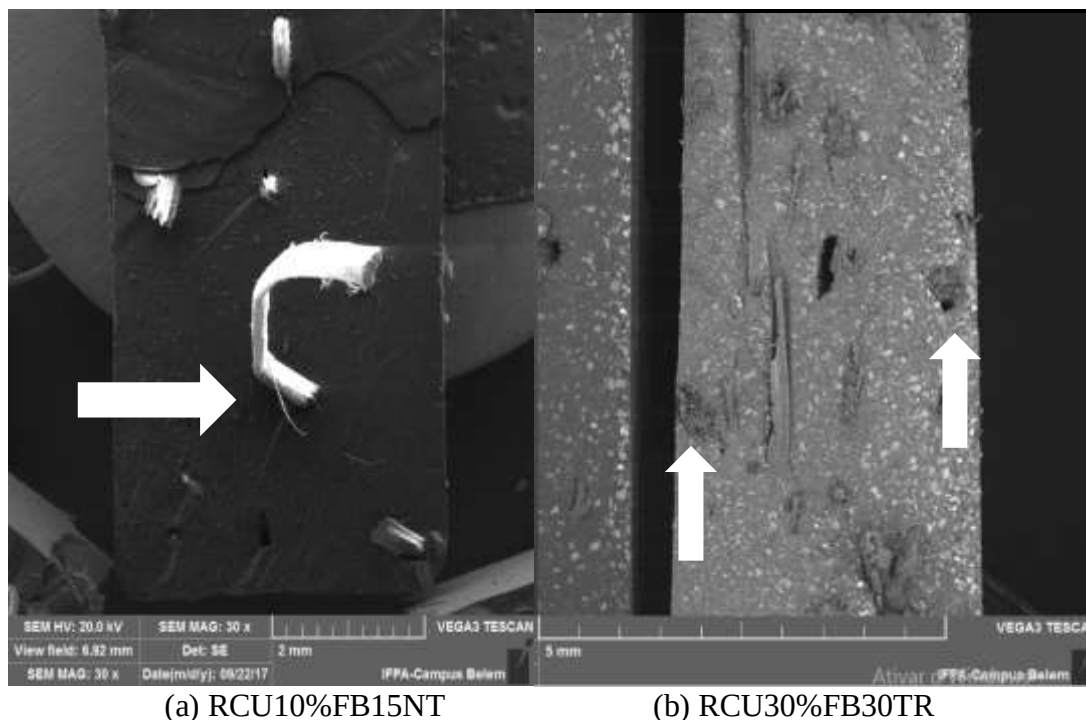


Figura 4.62 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com os resíduos de cobre e as fibras de bambu

Na figura 4.62 (a) é mostrada a superfície de fratura com a fração de 10% de cobre com fibras de bambu com 15 mm sem tratamento, destacando-se o descolamento de fibras da matriz, mostrando uma diminuição no comportamento de tensão de flexão dessa série e relação às outras proporções. Já na figura 4.62 (b) é identificada a superfície de fratura com resíduo de cobre com 30% e fibras de 30 mm com tratamento em NaOH, onde são mostrados os rompimentos de fibras junto com os resíduos presentes na matriz, dando consistência no processo de formação.

- **Matriz polimérica com lama vermelha e fibras de bambu**

Os compósitos de Matriz polimérica com incorporação da lama vermelha e das fibras de bambu foram avaliados por meio do ensaio de resistência a flexão em 3 (três) pontos, onde foram gerados os resultados referentes a tensão de flexão, deflexão e modulo de flexão, conforme mostrado na Tabela 4.32.

Tabela 4.32 – Resultados do ensaio de flexão da lama vermelha e as fibras de bambu

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
MP	82,86(±3,19)	1,25(±0,38)	13,80 (±1,22)
LV10%FB15mmNT	104,53(±4,07)	1,84(±0,21)	16,07(±1,60)
LV20%FB15mmNT	115,51(±5,96)	2,78(±0,40)	23,48(±1,79)
LV30%FB15mmNT	83,79(±3,23)	1,86(±0,22)	16,80(±1,82)
LV10%FB15mmTR	100,44(±4,64)	2,80(±0,36)	16,04(±1,40)
LV20%FB15mmTR	113,93(±3,36)	1,91(±0,29)	21,81(±1,47)
LV30%FB15mmTR	97,65(±3,59)	3,97(±0,59)	25,44(±1,46)
LV10%FB30mmNT	86,68(±3,39)	1,55(±0,25)	12,91(±1,05)
LV20%FB30mmNT	88,26(±3,73)	2,11(±0,24)	13,67(±1,47)
LV30%FB30mmNT	84,72(±4,96)	2,66(±0,51)	12,38(±1,18)
LV10%FB30mmTR	103,70(±5,60)	1,24(±0,33)	19,26(±2,93)
LV20%FB30mmTR	111,97(±5,48)	2,76(±0,57)	19,47(±1,28)
LV30%FB30mmTR	124,71(±4,35)	2,16(±0,33)	15,79(±1,13)

Na tabela 4.32 com adição de lama vermelha e fibras de bambu nos comprimentos de 15 e 30 mm, as composições aumentaram em até 49,86% e relação a matriz plena para a série de 30% de lama vermelha e fibras de 30 m tratadas.

Esses valores estão em destaque também no gráfico da figura 4.63, para o comportamento dos ensaios de flexão.

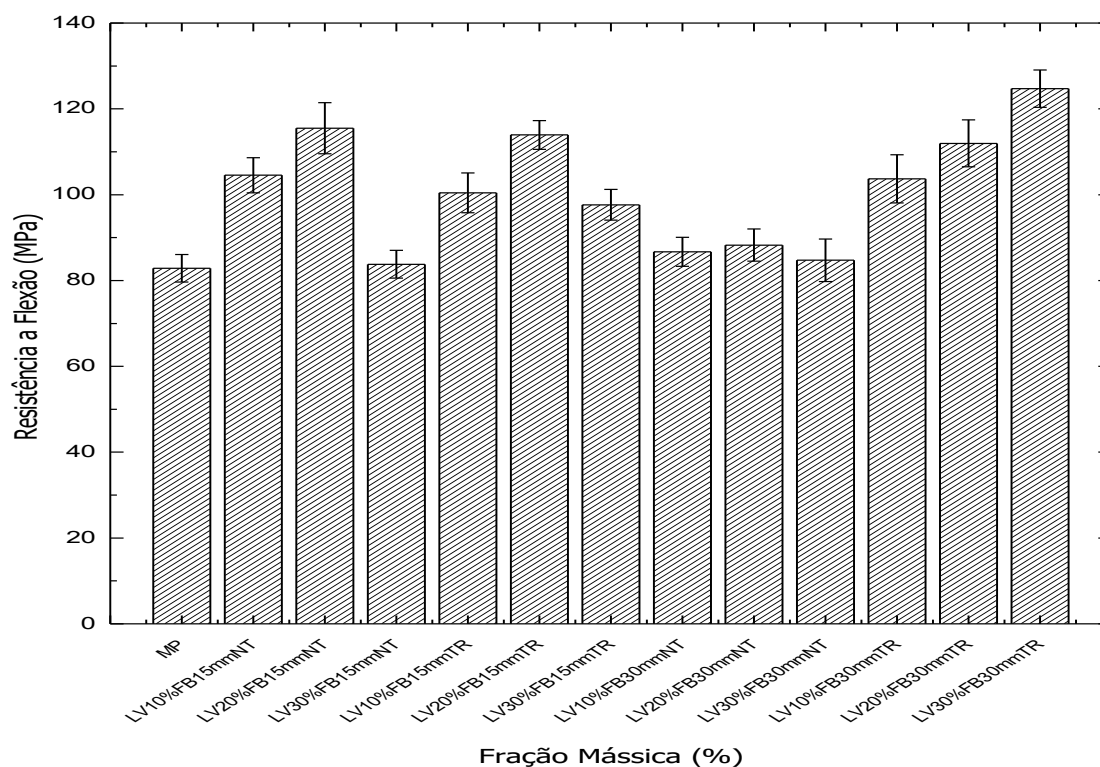


Figura 4.63 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão com lama vermelha e as fibras de bambu

O valor atingido de 124,71 MPa no limite de resistência a flexão demonstra que quanto maior foi o aumento de resíduo com fibra tratada de 30 mm foi gradativamente aumentando a resistência do material, diferentemente quando comparados com as fibras de 15 mm com tratamento que foi de apenas 83,79 MPa para a proporção de 30% de lama vermelha e fibras de bambu com 15 mm de comprimento, equivalente a 1,12% superior e ralação a matriz plena.

Na próxima análise da figura 4.64, por meio de MEV, identificaram-se meios de falhas predominantes dos compósitos com a série de fabricação com incorporação de lama vermelha e das fibras de bambu.

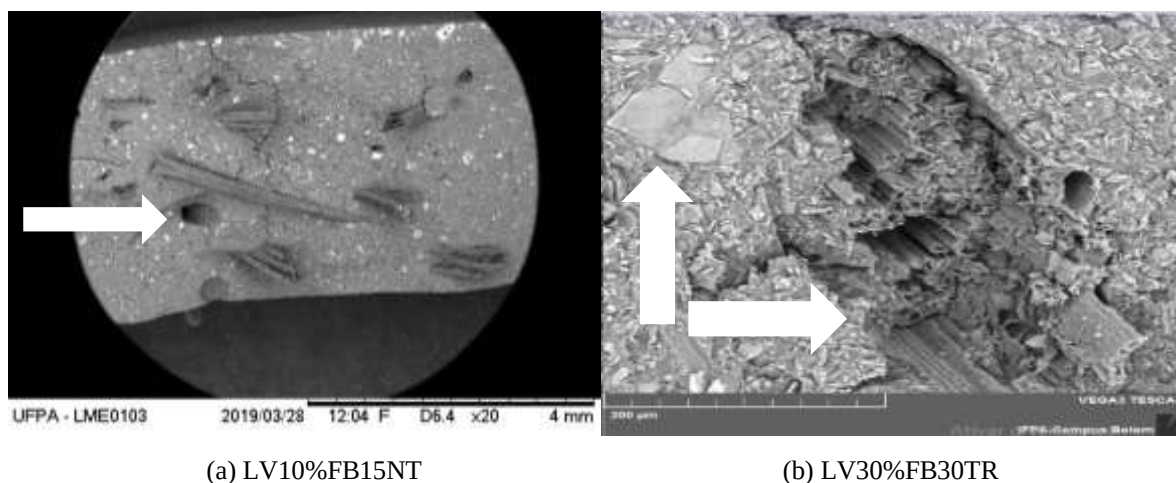


Figura 4.64 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com lama vermelha e as fibras de bambu

Na análise das imagens geradas na figura 4.64, para as proporções de lama vermelha de 10% e fibras com 15 mm sem tratamento (a) mostrando a presença de vazios e descolamento das fibras da matriz. Já em (b) com a adição de lama vermelha e fibras de 30 mm com tratamento mostra a presença de resíduos aglomerados na matriz e o rompimento de fibras, o que gerou um material com maior nível de resistência a flexão.

- **Matriz polimérica com resíduo de caulim e fibras de bambu**

Os compósitos de Matriz polimérica com incorporação do resíduo de caulim e das fibras de bambu foram avaliados por meio do ensaio de resistência flexão em 3 (três) pontos, onde foram gerados os resultados referentes a tensão de flexão, deflexão e módulo de flexão, conforme a mostrado na Tabela 4.33.

Tabela 4.33 – Resultados do ensaio de flexão dos resíduos de caulim e as fibras de bambu

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
MP	82,86(±3,19)	1,25(±0,38)	13,80 (±1,22)
RCA10%FB15mmNT	105,93(±10,18)	2,08(±0,60)	20,28(±2,75)
RCA20%FB15mmNT	86,58 (±3,07)	3,20(±0,24)	18,44(±1,09)
RCA30%FB15mmNT	98,30(±6,97)	1,24(±0,32)	19,89(±1,68)
RCA10%FB15mmTR	97,56(±3,68)	1,49(±0,43)	19,51(±1,36)
RCA20%FB15mmTR	116,44(±3,98)	1,37(±0,42)	21,30(±2,22)
RCA30%FB15mmTR	130,67(±4,62)	1,67(±0,33)	23,06(±2,42)
RCA10%FB30mmNT	83,33(±3,92)	0,96(±0,07)	18,10(±1,43)
RCA20%FB30mmNT	96,16(±3,47)	1,66(±0,28)	22,31(±1,77)
RCA30%FB30mmNT	111,04(±4,11)	2,42(±0,33)	25,01(±1,03)
RCA10%FB30mmTR	96,72(±2,67)	1,03(±0,16)	19,19(±1,37)
RCA20%FB30mmTR	115,13(±5,33)	1,13(±0,14)	20,53(±2,26)
RCA30%FB30mmTR	137,27(±4,16)	1,59(±0,42)	19,27(±1,71)

Com a obtenção dos resultados mostrados na tabela 4.33 destaca-se novamente um resultado relevante da pesquisa. Foi o de adição de 30% com resíduo de caulim a as fibras de bambu com 30 mm tratadas, alcançando o valor de 137,27 MPa na tensão de flexão e 19,27 GPa de módulo de flexão, os quais são bem superiores em comparação com a matriz plena.

No gráfico da figura 4.65 seguir são separados por séries os valores obtidos nos ensaios de flexão de três pontos para a matriz polimérica com o resíduo de caulim e as fibras de bambu.

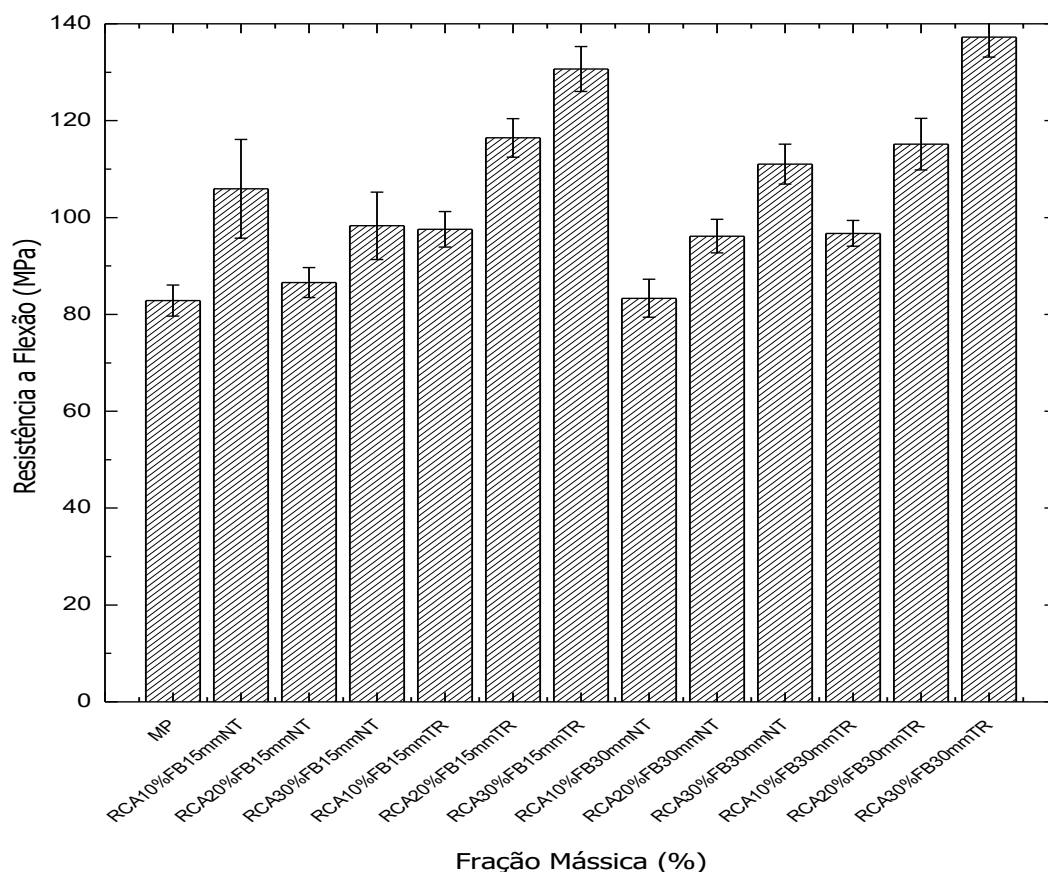
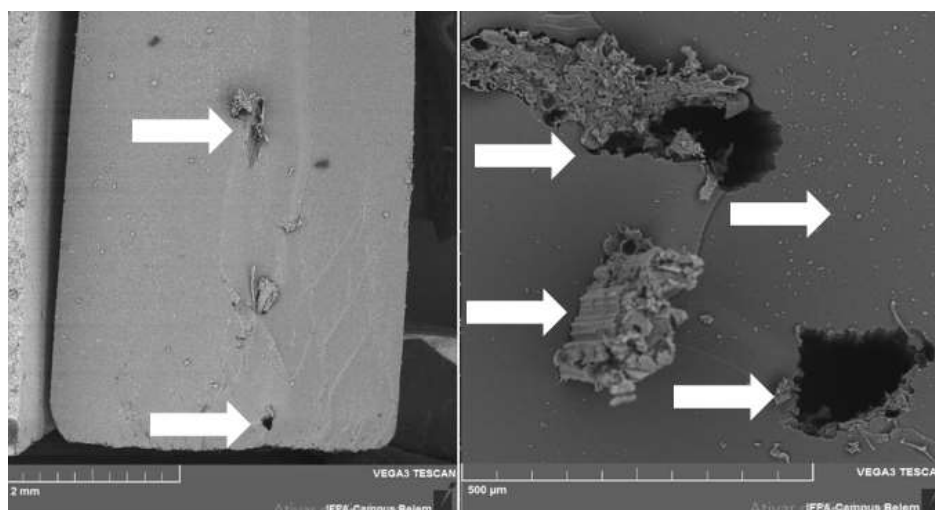


Figura 4.65 – Gráfico dos resultados obtidos através do ensaio de flexão com resíduos de caulim e as fibras de bambu

No gráfico é possível ser observado que com o aumento da proporção de caulim houve um aumento da resistência a flexão, alcançando na série em destaque de resíduo de caulim 30% com fibras de bambu de 30mm tratadas, superando a matriz plena em um valor de 65,66%.

A microscopia dos compósitos com o resíduo de caulim e as fibras de bambu mostrou também a superfície de fratura após os ensaios de flexão, com destaques predominantes de rompimentos da matriz. Conforme identificado na figura 4.66.



(a) RCA10%FB15NT

(b) RCA10%FB15TR

Figura 4.66 – MEV dos compósitos após os ensaios de flexão com os resíduos de caulim e as fibras de bambu

Nas imagens geradas mostra os compósitos com resíduo de caulim 10% e as fibras de 15 mm sem tratamento (a) e com tratamento (b). Com destaque para o rompimento (*pull out*) das fibras presente principalmente em (b), ficando evidente a interação com a matriz.

4.4.2.3 - Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy

- **Matriz polimérica com Resíduo de Cobre**

Na tabela 4.34 a seguir são identificados os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a incorporação de resíduos de cobre em sua estrutura.

Tabela 4.34 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + resíduo de cobre

Fração mássica (%)	Resistência média ao impacto (kJ/m ²)
MP 100	19,38 (±2,44)
RCU 10	23,02 (±3,18)
RCU 20	20,33 (±1,03)

Observa-se na tabela 4.34 que os valores foram diminuindo em relação a matriz plena com o aumento do resíduo de cobre na matriz, mas ainda assim sendo, mesmo que ligeiramente, superiores a matriz plena.

No gráfico da figura 4.67 a seguir os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a incorporação de resíduos de cobre são comparados.

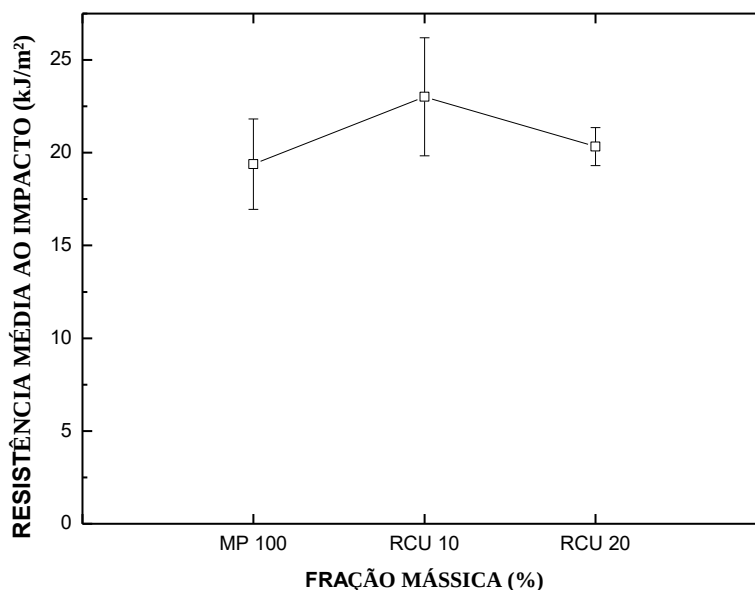


Figura 4.67 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição do resíduo industrial de cobre

Neste gráfico fica clara a alternância dos valores encontrados durante os ensaios de impacto, com um aumento de apenas 2,52% superior em relação a matriz plena para a proporção de 20% de resíduo de cobre e as fibras de bambu tratadas. Esses resultados estão equivalentes aos comparados por outros autores pesquisados na literatura que utilizaram outros tipos de reforços (TORRES-TELLO *et al.* 2017 e Caminero *et al.* 2018).

Na análise das superfícies fractográfica dessa série de compósitos, a figura 4.68 destaca os meios de mecanismos de falha predominantes.

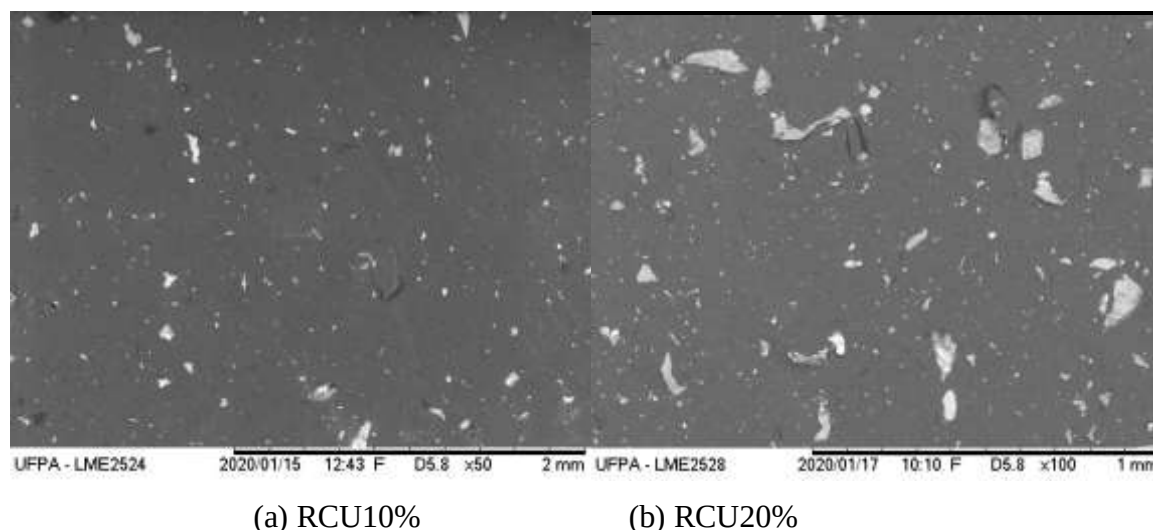


Figura 4.68– MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com os resíduos de cobre

Nota-se nas superfícies fraturadas dos compósitos com resíduo de cobre que a fratura característica foi plana, com poucos vazios, porosidades ou defeitos, porém, também, por conta dos resultados obtidos, são identificadas algumas imperfeições que podem ser do resultado da irradiação de trinca.

- **Matriz polimérica com Lama Vermelha**

Na próxima tabela 4.35 são mostrados os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a inserção de lama vermelha em sua estrutura.

Tabela 4.35 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Lama Vermelha

Fração mássica (%)		Resistência média ao impacto (kJ/m ²)
MP 100		19,38 (±2,44)
LV 10		21,50 (±3,68)
LV 20		17,81 (±2,05)

Analisando a tabela 4.35 identifica-se que houve uma redução de resistência ao impacto para a produção dos compósitos apenas com lama vermelha. Mas este resultado ainda é superior se comparado com outros autores, como Binhussain e El-Tonsy (2013).

No gráfico da figura 4.69 a seguir os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a incorporação de lama vermelha são comparados.

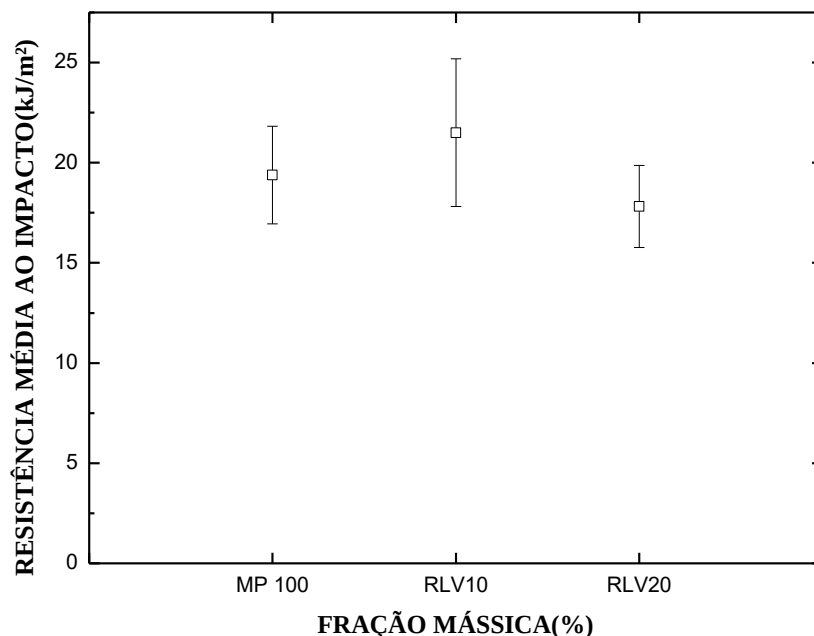


Figura 4.69 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição da lama vermelha.

Nota-se que a redução pode estar associada a baixa incorporação da lama vermelha durante o processo de ancoragem da interface resíduo/matriz. Estes processos de formação são identificados na interface de ruptura dos compósitos após os ensaios de impacto conforme mostrado na figura 4.70 a seguir.

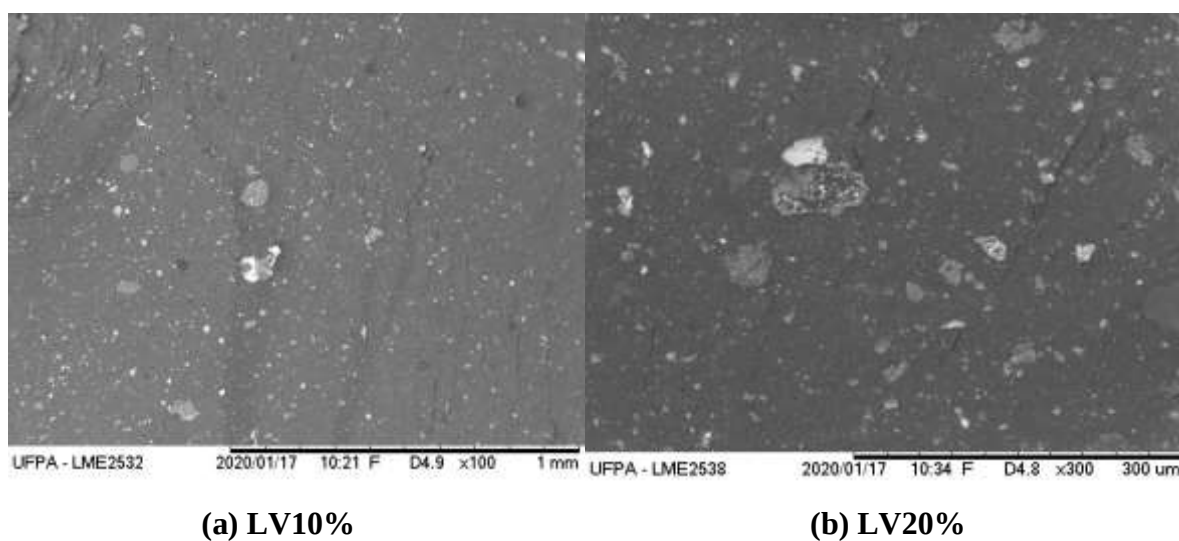


Figura 4.70 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com lama vermelha

Na observação das análises por meio de MEV, nota-se que a sedimentação da lama vermelha ao longo da matriz pode ter contribuído para um resultado pouco eficaz após os ensaios de resistência ao impacto, fato esse que reflete na concentração de tensões na região de deposição do material sedimentado na matriz.

- **Matriz polimérica com Resíduo de Caulim**

Já na tabela 4.36 são mostrados os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a inserção de resíduo de caulim em sua estrutura.

Tabela 4.36 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Resíduo de Caulim

Fração mássica (%)	Resistência média ao impacto (kJ/m²)
MP 100	19,38 ($\pm 2,44$)
RCA 10	19,96 ($\pm 1,71$)
RCA 20	21,20 ($\pm 2,47$)

Observa-se na tabela 4.36 uma pequena alteração, para mais, da resistência ao impacto com adição do resíduo de caulim. Aumento esse de 9,39% de resíduo de caulim com 20% em fração mássica na matriz.

No gráfico da figura 4.71 a seguir os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a incorporação de resíduos de caulim são comparados.

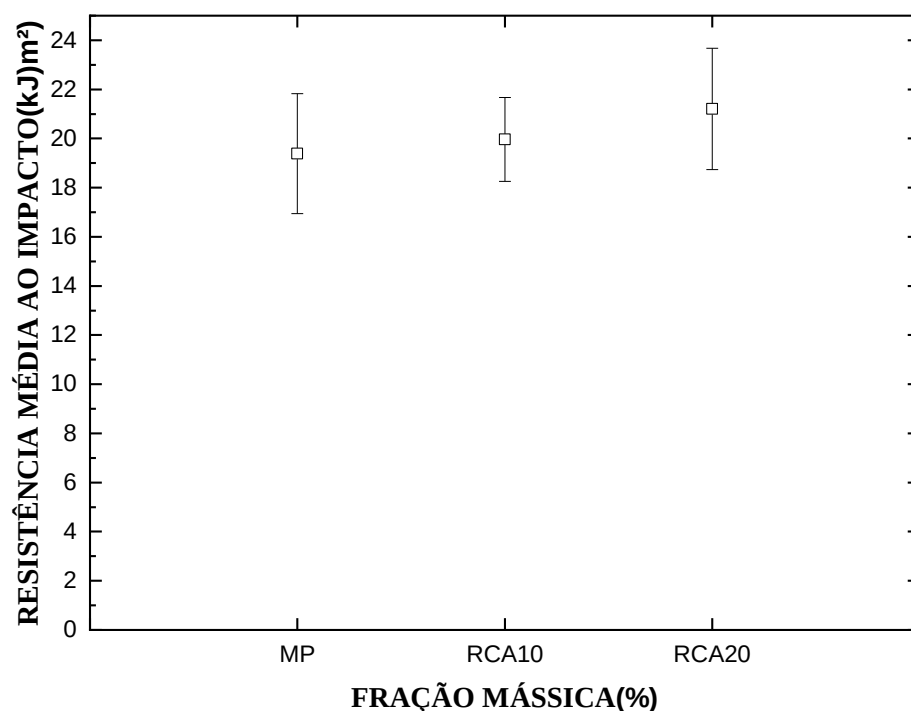


Figura 4.71 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição do resíduo industrial de Caulim

Observa-se neste gráfico um aumento pouco significativo, mas ainda sim superior em comparação com a matriz plena. E valores próximos aos encontrados na literatura por Srinivasababu (2014).

Na Figura 4.72, são mostradas as superfícies de fratura com o aumento na proporção do resíduo de caulim na matriz.

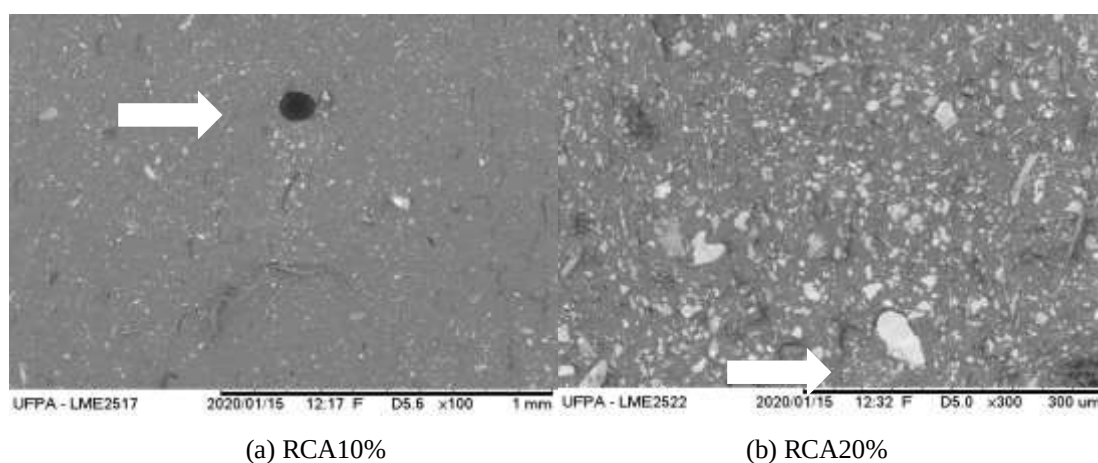


Figura 4.72 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com os resíduos de caulim

Mostra-se em destaque em 4.72 (a) a presença de vazios na matriz, o que gera menores resistência a esse tipo de material, com relação a matriz plena analisada. Já com 20%, em 4.72 (b) a sedimentação do resíduo de caulim contribuiu para o aumento da resistência ao impacto desse material.

- **Matriz polimérica com Resíduo de Cobre e Fibras de Bambu**

Nota-se na tabela 4.37 a seguir são identificados os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a incorporação de resíduos de cobre em sua estrutura e as fibras de bambu.

Tabela 4.37 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Resíduo de Cobre e fibras de Bambu

Fração mássica (%)	Resistência média ao impacto (kJ/m²)
MP 100	19,38 ($\pm 2,44$)
RCU 10 + FBTR	33,38 ($\pm 5,07$)
RCU 20 + FBTR	38,56($\pm 3,30$)

A adição do resíduo de cobre e as fibras de bambu com tratamento alcalino geraram resultados consistentes no compósito polimérico, quando submetidos ao ensaio de resistência ao impacto.

São comparados no gráfico na figura 4.73 a seguir os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos com a incorporação de resíduos de cobre e as fibras de bambu.

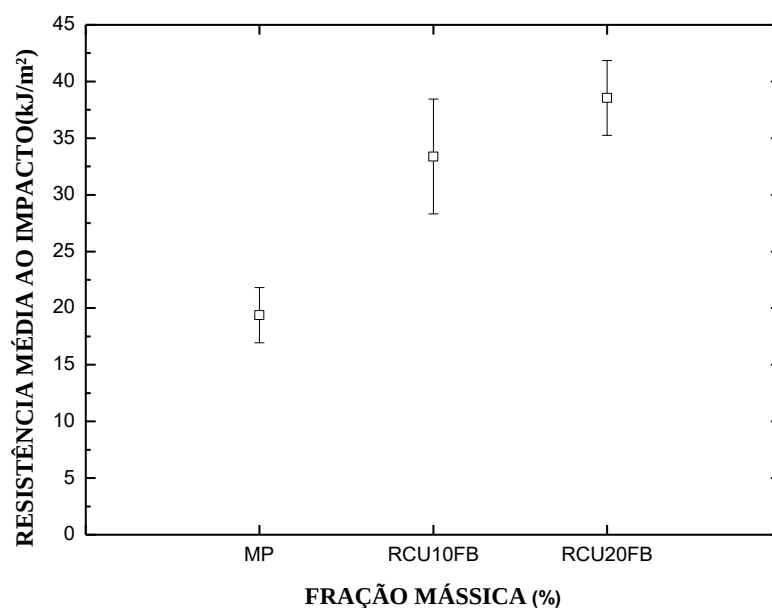


Figura 4.73 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição do resíduo industrial de Cobre e as fibras de bambu.

O comportamento destacado no gráfico da figura 4.73 com resistência média ao impacto chegou ao valor de 98,97% superior em relação a matriz plena.

As superfícies de fratura por meio de MEV desta série são mostradas na figura 4.74, a seguir.

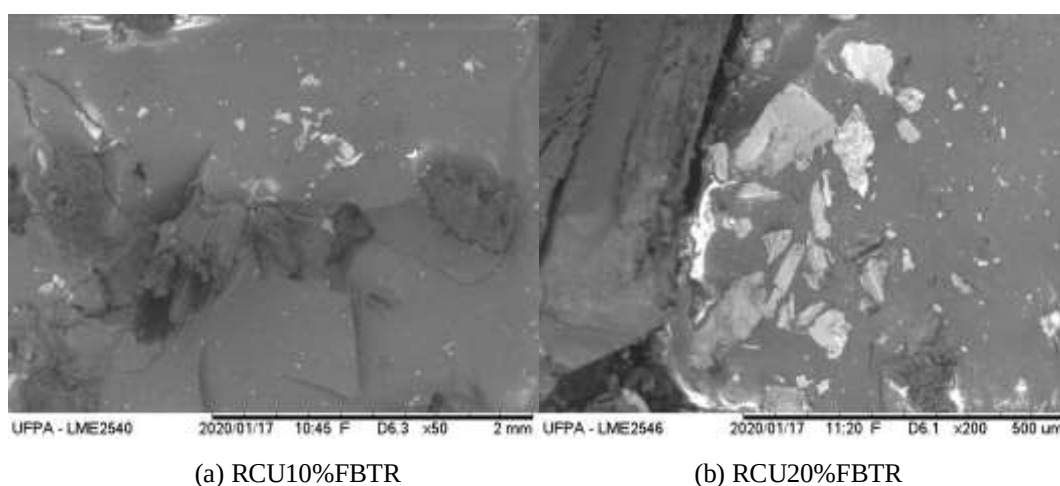


Figura 4.74 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com os resíduos de cobre e as fibras de bambu.

Mostra-se nessa figura, a predominância das frações de resíduos de cobre 10% (a) e 20% (b) com a adição das fibras de bambu com tratamento. Os bons resultados de resistência ao impacto estão relacionados diretamente aos rompimentos das fibras e da sedimentação dos resíduos de cobre na matriz identificados nestas fractografias.

- **Matriz polimérica com Lama Vermelha e Fibras de Bambu**

A seguir observa-se que na tabela 4.38 são mostrados os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a inserção de lama vermelha em sua estrutura a as fibras de bambu.

Tabela 4.38 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Lama Vermelha e fibras de Bambu

Fração mássica (%)	Resistência média ao impacto (kJ/m²)
MP 100	19,38 ($\pm 2,44$)
LV 10 + FBTR	27,10 ($\pm 2,64$)
LV 20 + FBTR	36,90 ($\pm 2,22$)

A tabela 4.38 destaca os valores de resistência média ao impacto para a incorporação de lama vermelha e fibras tratadas de bambu com o valor alcançando 36,90 kJ/m², para 20% de resíduo adicionado.

São comparados no gráfico a seguir os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos com a incorporação de lama vermelha e as fibras de bambu.

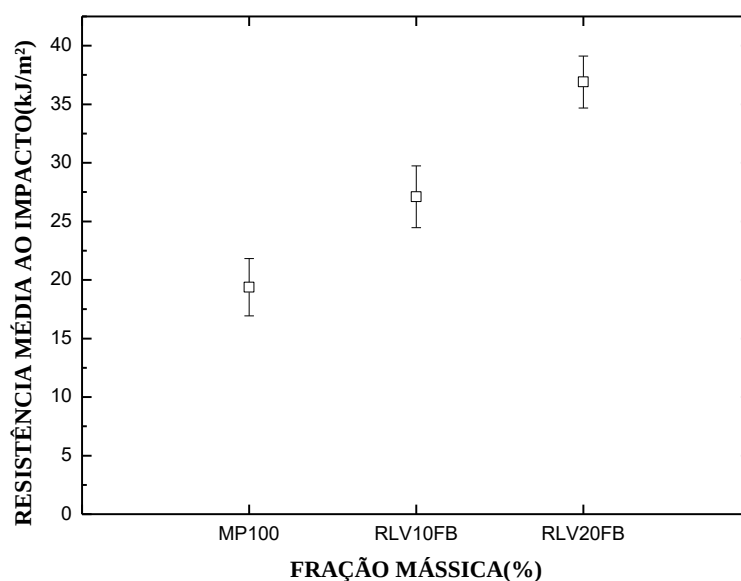
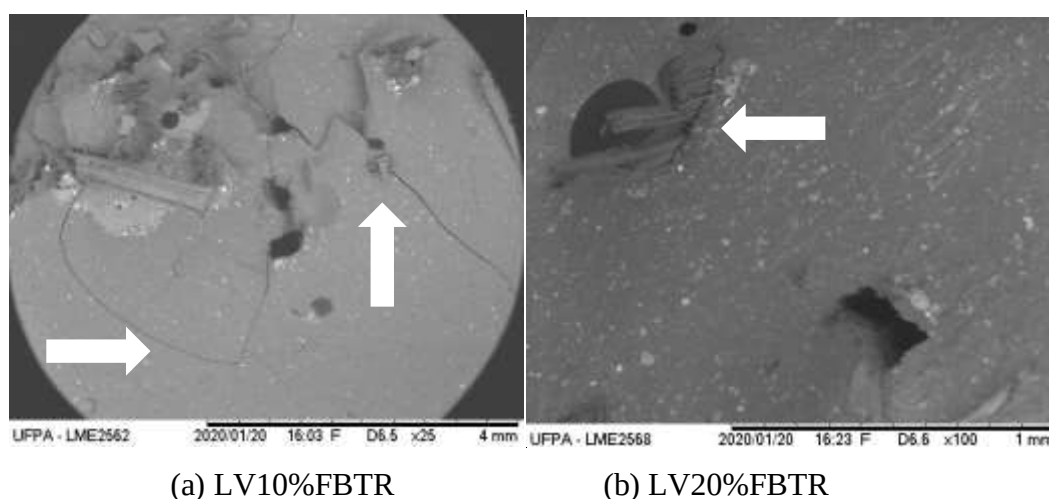


Figura 4.75 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição de lama vermelha e as fibras de bambu

Na análise do gráfico com lama vermelha e as fibras com tratamento químico, o aumento de resistência ao impacto foi superior a matriz plena com valores gerando em torno de 90,4%.

As imagens geradas por meio de MEV da proporção desta série de corpos de prova são identificados na figura 4.76, a seguir.



(a) LV10%FBTR

(b) LV20%FBTR

Figura 4.76 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com lama vermelha e as fibras de bambu

Nota-se a presença de propagação de trincas a partir (a) de vazios e concentração de resíduos na matriz e também se destaca o rompimento de fibras junto a resíduos incorporados

na matriz. Essa característica de *pull out* possibilita a propagação inicial a partir dessa geração de concentrações de tensão no momento desse arrancamento da fibra da interface da matriz polimérica.

- **Matriz polimérica com Resíduo de Caulim e Fibras de Bambu**

Apresenta-se na tabela 4.39 os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos poliméricos com a inserção de resíduo de caulim em sua estrutura e as fibras de bambu.

Tabela 4.39 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto MP + Resíduo de Caulim e fibras de Bambu

Fração mássica (%)	Resistência média ao impacto (kJ/m ²)
MP 100	19,38 (±2,44)
RCA 10 + FBTR	31,86 (±6,15)
RCA 20 + FBTR	34,47 (±3,21)

Nesta tabela 4.39 os resultados do ensaio de impacto não destacados com o aumento da quantidade de resíduo de caulim e as fibras tratadas, chegando ao valor de 34,37 kJ/m². Esses valores são também próximos aos pesquisados na literatura como obtidos por SRINIVASABABU (2014).

São comparados no gráfico da figura 4.77 a seguir os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência ao impacto dos compósitos com a incorporação de resíduos de caulim e as fibras de bambu.

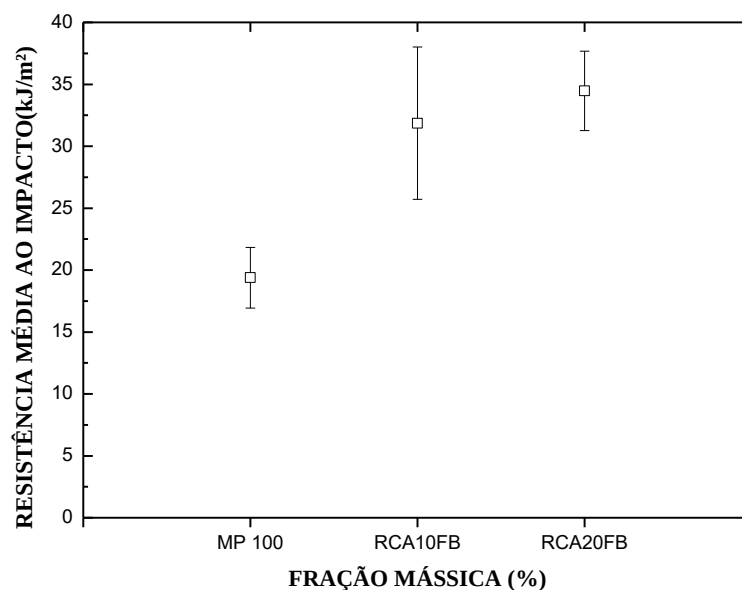


Figura 4.77 – gráfico dos ensaios de resistência ao impacto com adição do resíduo industrial de Caulim e fibras de bambu

A incorporação dos resíduos de caulim e das fibras de bambu com tratamento também contribuíram para um aumento na resistência ao impacto chegando ao valor que corresponde a 77,86% superior a matriz plena.

Na figura 4.78 são mostradas as superfícies fraturadas dos compósitos com resíduo de caulim e as fibras de bambu após os ensaios de impacto.

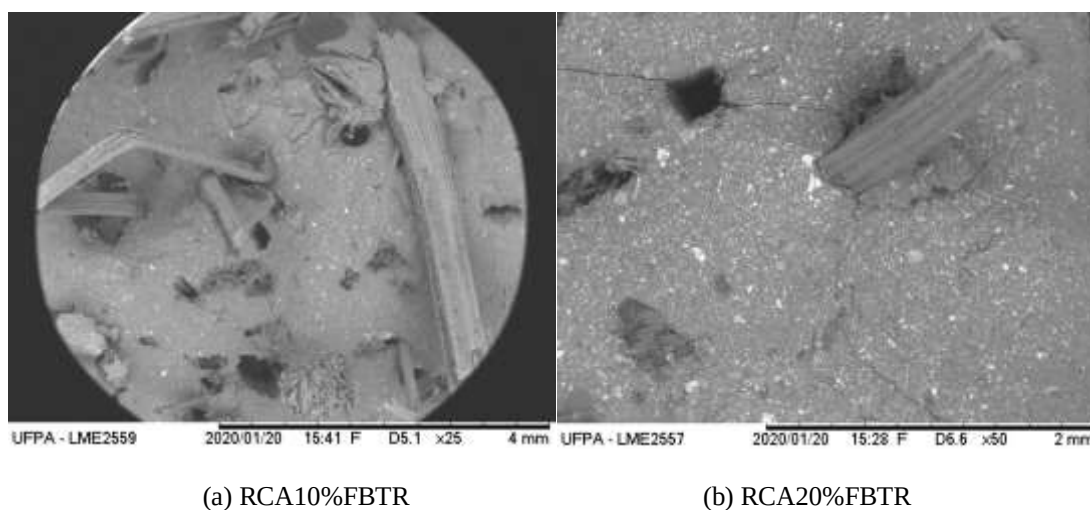


Figura 4.78 – MEV dos compósitos após os ensaios de impacto com os resíduos de caulim e as fibras de bambu

Na figura do MEV nota-se algumas características que contribuíram de forma significativa para o aumento da resistência ao impacto em relação a matriz plena. Como é o caso do arranchamento das fibras da matriz (*pull out*), fazendo com que aconteça uma dissipação de energia no processo de rompimento da matriz. Nota-se também uma regularidade da distribuição de fibras e dos resíduos na matriz, o que contribui na distribuição de carga.

4.4.3 - Caracterização de Flamabilidade

4.4.3.1 - Ensaio de Resistência à Chama

4.4.3.1.1 - Norma ASTM D635-10

Na tabela 4.40 a seguir são apresentados os valores dos ensaios feitos na posição de lima horizontal com a variação dos compósitos produzidos para determinação se seriam encaixados na classificação HB. Considerando a relação da velocidade e do tempo que houve a queima.

Tabela 4.40 – Resultados do ensaio de Flamabilidade horizontal dos compósitos

Fração mássica (%)	Tempo (s)	Velocidade (mm/min)	Queima total	Classificação
MP	203,28	23,81	Sim	HB
RCU 10	322,91	14,51	Sim	HB
RCU 20	266,23	19,82	Sim	HB
RCU 30	307,44	14,81	Sim	HB
RCU 40	266,92	22,31	Sim	HB
LV 10	322,19	14,85	Sim	HB
LV 20	266,02	16,78	Sim	HB
LV 30	307,47	14,81	Sim	HB
LV 40	266,28	17,12	Sim	HB
RCA 10	298,92	14,51	Sim	HB
RCA 20	291,75	17,12	Sim	HB
RCA 30	305,27	14,81	Sim	HB
RCA 40	314,84	17,12	Sim	HB

Observa-se que após a análise de 5 CP's de cada série, a média dos resultados mostrou que as amostras não sofreram interrompimento da chama e com queima total das superfícies analisadas. De acordo com a resolução do CONTRAN nº 675, para os revestimentos internos da aplicados na indústria de automóveis são recomendáveis velocidades de propagação de chama de 250 mm/min

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

Observou-se que de acordo com a fabricação dos compósitos poliméricos, estes demonstraram que sua fabricação dos corpos de prova foi consistente no processo de obtenção do produto final. Os materiais apresentaram boa aparência superficial e interligação da matriz com a inserção dos resíduos e das fibras de bambu.

Procurou-se alinhar a produção desses materiais com o mínimo de recurso tecnológico possível, o máximo de sustentabilidade e renovação de recursos disponíveis para obtenção dos produtos finais.

A caracterização química das fibras de bambu foi considerada eficaz, pois as medias dos teores de holocelulose, lignina e extrativos estão de acordo com o encontrado na literatura. As características físicas e anatômicas dos colmos foram classificadas como boas, pois tais características influenciam na quantidade de componentes químicos.

Analisou-se as fibras de bambu em sua composição química e foram consideradas adequadas para diversos fins dentro de fabricação de compósitos. Assim como as características anatômicas dos colmos que apresentam em suas estruturas as características ideais para a extração de fibras utilizadas na matriz.

A caracterização física por meio de 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.

A análise por meio do DRX mostrou os principais componentes dos resíduos de cobre, lama vermelha e caulim. Com a obtenção eficiente dos picos característicos de composição desses materiais, condizente com os encontrados na literatura.

Os ensaios de tração apresentaram valores relevantes para a fabricação de produtos a partir dos resultados obtidos nas diferentes proporções. Chegando a 40,25 MPa para adição de 40% de resíduo de cobre e de 41,07 MPa para a composição de híbrido com adição de 20% de resíduo de caulim/3% de fibras de bambu, com tratamento químico, nos comprimentos de 15mm.

Nos ensaios de flexão os resultados foram de 150,94 MPa para a adição de FB30mmTR, de 140,34 MPa para adição de 20% de RCA e nos híbridos de 137,27 MPa para a adição de

RCA30%/3% FB30mmTR.

Como resultados dos ensaios de impacto foram obtidos valores de 23,02 kJ/m² para adição de RCU10% e de 38,56 kJ/m² para a adição de RCA20%/3% de FB30mmTR.

Nos resultados de Flamabilidade horizontal foi observado o enquadramento a classificação HB e utilização útil para aplicação na indústria de automóveis. Um material de baixo custo que pode atender diversos segmentos na indústria.

CAPÍTULO VI

6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Produzir compósitos com fibras de bambu na disposição na matriz contínuas e alinhadas, com a adição dos mesmos resíduos utilizados, para efeitos de comparação com o que foi produzido neste trabalho, utilizando as caracterizações aqui realizadas.

Fazer um levantamento buscando evidenciar a razão de aspecto das fibras de bambu, tanto *in natura*, como com tratamento alcalino.

Fabricar produtos finais a partir dos resultados de caracterizações encontrados para a fabricação dos corpos de prova, para que estes possam ser comercializados como produtos finais, como é o caso de divisórias, forros, além de caixilhos de portas e janelas, entre outros.

Elaborar uma caracterização uma econômica para gerar valores a serem atribuídos aos produtos obtidos a partir dos compósitos fabricados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) **NBR 14660: Madeira – Amostragem e preparação para análise**. 13p. Rio de Janeiro. 2004.

Ahmaruzzaman, M.. **Industrial wastes as low- cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals**. Adv. Colloid Interface Sci., 166: 36-59, 2011.

ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B. (Eds.). **Manual de agregados para a construção civil**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 432p. 2012

ANTAL, M. J. Effects of reactor severity on the gas-phase pyrolysis of cellulose and kraft lignin derived volatile matter. **Indian Engineering Chemistry Research**, New Delhi, v. 22, n. 2, p. 366-375, July 1983.

AQUINO, R. C. M. P.; ALMEIDA, J. R. M; MONTEIRO, S.N. (2005). **Análise do Compósito de Piaçava/Resina poliéster, como substituto da Madeira**. In: 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 24-27 de julho de 2006, Belo Horizonte, MG, Brasil.

ASTM D 3030 - 2000 "**Standard Test Method for Volatile Matter (Including Water) of Vinyl Chloride Resins**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 3039 - 2000 "**Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 3822 - 2001, "**Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 6110 - 2004 "**Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 635 - 2010 "**Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

- ASTM D 790 - 2010 "**Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D1984 - 1969 (1992) e1, "**Standard Specification for Tall Oil Fatty Acids**", ASTM International, West Conshohocken, PA, 1992.
- AZWA, Z. N., YOUSIF, B. F., MANALO, A. C. et al, A review on the Degradability of Polymeric Composites Based on Natural Fibers, **Materials and Design**, v. 47, pp. 424 – 442, 2013.
- BENDEZÚ, R. J. H. **Los plásticos reforzados en fibras de vidrio (PRFV), sus aplicaciones y desarrollo em la industria nacional**. Monografia: Título profissional de Engenheiro Industrial, Universidad Mayor de San Marcos. Peru, 132 p., 2002.
- BINHUSSAIN, M. A., EL-TONSY, M. M (2013). "Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures". **Construction and Building Materials** 47 (2013) 1431–1435
- BLEDZKI, A. K., GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science (Oxford)**, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999. (Bledzki & Gassan, 1999)
- CABLIK, V. **Characterization and applications of red mud from bauxite processing**. **Gospodarka Surowcami Mineralnymi**, vol. 23, nº 4, 2007.
- Callister, WD . **Materials science and engineering: an introduction**. 9th ed. New York: John Wiley & Sons, 2018.
- CAMINERO, M. A. CHACÓN, J.M., García-Morenoa, I., Rodrígueza, G.P. (2018) "Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling". **Composites Part B** 148 (2018) 93–103
- CASARIL, A. **ANÁLISE MICROMECAÂNICA DOS COMPÓSITOS COM FIBRAS CURTAS E PARTÍCULAS**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Graduação em Engenharia de Materiais. Trabalho de Conclusão de Curso. 69f. 2004.
- CASAS, G. R. C. **A biotecnologia à serviço da indústria automotiva**. Mai. 2010. Disponível em: <<http://www.portaldomeioambiente.org.br/ciencia-e-tecnologia/4097a-biotecnologia-a-servico-da-industria-automotiva.html>>. Acessado em: 02 mar. 2017.
- CASSIS, F. A.; TALBOT, R. C. **Polyester and vinyl ester resins**. In: Handbook composites, London: Chapman & hall, p. 2-47, 1998.
- Carvalho, L. H.& Cavalcanti, W. S. - **Polímeros**, 16, p.33 (2006).

- COSTA, D. S. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS GERADOS PELA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS**. 229p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais - PRODERNA), Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2016.
- COSTA, E. **Carro elétrico no Brasil: mito ou realidade**. Jun. 2010. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/destaques/2010/destaque10020.asp>>. Acessado em: 28 nov. 2010.
- COUTTS, R. S. P.; NI, Y. Autoclaved Bamboo Pulp Fibre Reinforced Cement. **Cement & Concrets Composites**, n. 17, p. 99-106, 1995.
- COUTTS, R. S. P.; NI, Y.; TOBIAS, B. C. Air-cured bamboo pulp reinforced cement. **Journal of Materials Science Letters**. n. 13, p. 283-285, 1994.
- CROCKER, J. (2008). **Natural materials - Innovative natural composites**. Mater. Technol., v. 2-3 n. 3 p. 174-178.
- 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)**. 152p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais - PRODERNA), Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2014.
- DALPIAZ, G. **ESTUDO DO EFEITO DAS CARGAS MINERAIS EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS PARTICULADOS EM MATRIZ DE POLIPROPILENO**, 236f. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- DHAL, J. P.; MISHRA, S. C. Processing and properties of natural fiberreinforced polymer composite. **Journal of Materials**, v. 2013, 6 p., 2013.
- DNPM - **Departamento Nacional da Produção Mineral**. Sumário Mineral 2014. Brasília, 2015.
- EICHHORN, S. J.; BAILLIE, C.A.; ZAFEIROPOULOS, N.; MWAKAMBO, L.Y.; ANSELL, M.P.; DUFRESNE, A. (2001) **Review of current international research into cellulosic fibres and composites**. J. Mater. Science, v. 36, p. 2107-2113, 2001.
- EL BANNA, W. R., **INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE COBRE NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMOFIXA E FIBRAS DE BANANEIRA (Musa Sapientum,**

Musacae). 150p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais - PRODERNA), Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2017.

FARUK, O. et al. Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, maio. 2012.

FERNANDO, L. A. O. **Conhecendo Bambus e suas Potencialidades Para o uso na Construção Civil.** 2013. 90 F. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerias 2013.

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais.** Universidade Federal de são Carlos. São Carlos: Editora UFSCar, 2ª ed., 2002.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais.** LTC: Rio de Janeiro, 2000.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais.** Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GHEITH, M. H., AZIZ, A. M., GHORI, W., SABA, N., ASIM, M., JAWAID, M., ALOTHMAN, O. Y., 2019. “Flexural, thermal and dynamic mechanical properties of date palm fibres reinforced epoxy composites”. **Journal of Materials Research and Technology** . 2019; 8 (1) : 853–860.

GOUD, V., ALAGIRUSAMYA, R., DASA, A., KALYANASUNDARAMB, D., 2019. “Influence of various forms of polypropylene matrix (fiber, powder and film states) on the flexural strength of carbon-polypropylene composites”. **Composites Part B** 166 (2019) 56–64.

GURUNATHAN, T., MOHANTY, S., NAYAK, S. K. A Review of the Recent Developments in Biocomposites Based on Natural Fibres and Their Application Perspectives. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 77, p. 1– 25, 2015.

HANCOX, N. L. “**Hight performace composites with resin matrices**”; Handbook of Composites, Amsterdam: Elsevier Science Publisher; vol.4, p.1-29; 1991.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 146, nº 1-3, p. 359-374, 1999.

HOLLAWAY, L. **Handbook of Polymer and Composites for Engineer.** Wood head Publishing LTDA. Cambridge, England, 1994.

JOHN, M.; THOMAS, S., “Biofibres and biocomposites”, **Carbohydrate Polymers**, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.

- JOSHI, S.V. L.T. DRZAL, A.K. MOHANTY, S. ARORA. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites. **Composites: Part A**. Vol.35 p.371–376, 2004.
- Kuwahara, M; Santos, G. C.; Paz, P. F. C; Pinheiro, Y. R. G. P.; Costa, D. S.; Fujiyama, R. T. **ASPECTOS FRACTOGRAFICOS DE COMPÓSITOS POLIÉSTER REFORÇADOS POR FIBRAS PARTICULADAS DE BAMBU E SISAL** , p. 2162-2169. In: 70º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2015.
- LEVCHIK, S. V. (2007). **Introduction to flame retardant and polymer flammability**. [A. do livro] Alexander B. Morgan e Charles A. Wilkie. Flame retardant polymer nanocomposites. New York : John Wiley & Sons, 2007.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.
- LIMA, A.B.T. **Aplicações de Cargas Minerais em Polímeros**. São Paulo. 87p., 2007.
- LIU, D.; WU, C. **Stockpiling and comprehensive utilization of red mud research progress**. **Materials**, vol. 5, nº 7, p. 1232-1246, 2012.
- LUMINGKEWAS, R. H. **DEVELOPMENT OF MATERIALS FOR CONSTRUCTION WITH LOW ENVIRONMENTAL IMPACT MADE WITH LOW CONTENT OF CEMENT AND WITH NATURAL FIBERS**. THESE / UNIVERISTE DE BRETAGNE SUD sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne, p. 10, 2015.
- MANIKANDAN, V.; ARUMUNGA PRABU, V.; KALIRASU, S.; UTHAYAKUMAR, M. Processing and characterization of red mud filled sisal fibre reinforced polymer composite. **International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)**, 2012.
- MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011.
- Ministério do meio ambiente. Construção Sustentável**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidadessustentaveis/urbanismo-sustentavel/construção-sustentavel>>. Acesso em: 15 jul. 2018.
- MOHAN,T.P., K. KANNY, K. (2019). “Compressive characteristics of unmodified and nanoclay treated banana fiber reinforced epoxy composite cylinders”. **Composites Part B**, 169 (2019) 118–125

- MORO, P.; PANDOLFO, A.; MORO, L.; Barbacovi, N. E.; TAGLIARI, L. D.; Diagnóstico ambiental de indústrias de fabricação de estruturas metálicas e esquadrias de metal de pequeno e médio porte. **Revista Gestão e Produção**, São Carlos, v. 22, n. 1, p. 229-237, 2016.
- PEREIRA, J. C. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. UFSC, 99 p., 2000.
- PRADO, V. J. S. **MOLDAGEM DE COMPÓSITOS PELO PROCESSO DE INFUSÃO DE RESINA: CORRELAÇÃO DE PROPRIEDADES**. 190 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.
- PRASAD, A.V.R.; RAO, K. M. Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: Jowar, sisal and bamboo. **Materials and Design**, n. 32, p. 4658-4663, 2011.
- PRASAD, V. ,JOSEPH, M. A. , Sekar, K. , ALI, M., (2018). “Flexural and impact properties of flax fibre reinforced epoxy composite with nano TiO₂ addition”. **Materials Today: Proceedings** 5 (2018) 24862–24870
- RAGONDET, A. **EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THE VACUUM INFUSION PROCESS**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – University of Nottingham, Nottingham, 2005.
- RASHAD, A. M., Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview. **Construction and Building Materials**, n. 41, p. 303–318, 2013.
- REZENDE, M. L. S. **RESÍDUO DE CAULIM PRIMÁRIO COMO MATERIAL POZOLÂNICO EM CONCRETO SECO: PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E DURABILIDADE**, Campina Grande-PB. Tese de doutorado. UFCG, 2013.
- RODRIGUES, J. S. **ESTUDO DA TÉCNICA DE INFUSÃO DE RESINA APLICADA À FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADOS POR FIBRAS NATURAIS DA AMAZÔNIA**. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recurso Naturais) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- ROMÃO, C. M. N. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS**. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade do Porto. Porto, 2003
- SANTOS A. J. G. **MATERIAIS COMPÓSITOS DE POLIÉSTER REFORÇADOS POR FIBRAS CURTAS DE TIMBÓ-AÇÚ (DERRISGUIANENSIS): AVALIAÇÃO MECÂNICA**. Trabalho de conclusão de curso – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

- SANTOS, D. H., **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SÍLICA E TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AGREGADOS SINTÉTICOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DO PROCESSO BAYER**. 96p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais - PRODERNA), Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2019.
- SANTOS, L. C. M. L.; MOURA, E. N.; VIEIRA, F. F.; GENUÍNO, V. A.; SALES, E. D. G. Síntese das principais ocorrências minerais de pegmatitos no seridó (PB-RN). In: **IV Simpósio de minerais industriais do nordeste**. João Pessoa, PB. 2016. Rio de Janeiro: CETEM, 2016.
- SALES, A. T. C., **RETRAÇÃO, FLUÊNCIA E FRATURA EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM POLPA DE BAMBU**. (Doutorado em Engenharia Civil - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC - Rio), Rio de Janeiro, 2006.
- SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F.; **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil**. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. Composites: Part A, v. 38, p. 1694-1709, 2007.
- SILAEX, **POLIESTER INSATURADO**:
Disponível em: <www.silaex.com.br/poliester.htm> Acesso em: 31 de outubro de 2017.
- Silva Filho, E. B.; Alves, M. C. M.; Motta, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**. 12: 322-338, 2007
- SILVA, A. L. M. F., **DESENVOLVIMENTO DE LIGANTE GEOPOLIMÉRICO UTILIZANDO RESÍDUOS INDUSTRIAIS**. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2019.
- SILVA, I. L. A. **PROPRIEDADES E ESTRUTURA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS DE JUTA**. 2014, 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ, 2014
- SILVA, R. V. **COMPÓSITO DE RESINA POLIURETANO DERIVADA DE ÓLEO DE MAMONA E FIBRAS VEGETAIS**. 2003. 157 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2003.
- NADENDLA SRINIVASABABU (2014) “Assessing the Mechanical Performance Cannabis Sativa Composites – Reinforced with Long Time Dried fibre”. *Procedia Engineering* 97 (2014) 986 – 993

- SRIVASTAVA, A. K., GUPTA, V. , YERRAMALLI, C. S., SINGH, A., (2019) “Flexural strength enhancement in carbon-fiber epoxy composites through graphene nano-platelets coating on fibers”. **Composites Part B** 179 (2019) 107539.
- 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**. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2010.
- SOUZA, W. B. de. **ESTUDO DA ADIÇÃO DE LAMA DE BAUXITA EM POLÍMERO DE POLI (METACRILATO DE METILA) POR MEIO DE POLIMERIZAÇÃO EM MASSA E MOLDAGEM EM CASTING**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2008.
- SUBRAHMANYAM, B. V. Bamboo reinforcement for cement matrices. **Concrete Technology and Design New Reinforced Concrete**, n. 2, p. 141-193, 1984.
- TAHERZADEH, M. J.; KARIMI, K. Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. **Bioresource**, v. 2, n. 3, p. 472-499, 2007.
- THREEPOP NATKUL, P., KULSETTHANCHALEE, C., “Effect of sisal fiber on flexural and impact properties of PMMA-b-PU composites”. **Materials Today: Proceedings** 17 (2019) 2002–2009
- TOLÊDO FILHO, R. D. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais vegetais**. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. (coord.). **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande, PB: UFPB/SBEA, cap. 2, p. 49-82, 1997.
- TOMCZAK, F. **ESTUDOS SOBRE A ESTRUTURA E PROPRIEDADES DE FIBRAS DE COCO E CURAUÁ DO BRASIL**. 2010, 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. D. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III - morphology and properties of Brazilian curauá fibers. **Composites: Part A**, n. 37, p. 2227-2236, 2007.
- TORRES-TELLO, E. V., ROBLEDO-ORTÍZ, J. R., GONZÁLEZ-GARCÍA, Y., PÉREZ-FONSECA, A. A., JASSO-GASTINEL, C. F., EDUARDO MENDIZÁBAL, E. (2017). “Effect of agave fiber content in the thermal and mechanical properties of green composites based on polyhydroxybutyrate or poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)”. **Industrial Crops and Products** 99 (2017) 117–125

VARNAVAS, S. P.; BOUFOUNOS, D.; FAFOUTIS, D. **An investigation of the potential application of bauxite residue in soil / sediment remediation.** Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes Island, Greece, 1-3 September, 2005.

VARNAVAS, S. P.; BOUFOUNOS, D.; FAFOUTIS, D. **An investigation of the potential application of bauxite residue for the improvement of the environmental conditions in a marsh environment.** Proceedings of the 10th International Conference on Environmental Science and Technology, Kos Island, Greece, 5-7 September, 2007.

VERONEZZI, Felipe. **O Impacto da Construção Civil no Meio Ambiente.** Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=23&Cod=1827>>. Acesso em: 14 jul. 2018.