



**INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE COBRE  
NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPOSTOS DE  
MATRIZ TERMOFIXA E FIBRAS DE BANANEIRA (*Musa Sapientum*,  
*Musacae*)**

**Wassim Raja El Banna**

**Belém-PA  
2017**



**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*)**

**Wassim Raja El Banna**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

**Belém-PA  
2017**

**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*)**

**Wassim Raja El Banna**

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  
(PRODERNA/ITEC/UFPA – Orientador)

---

Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria  
(PRODERNA/ITEC/UFPA – Membro)

---

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

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Lúcia Pereira Antunes  
(PPGCA/UNESP/SOROCABA – Membro Externo)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alba Lucia Ferreira de Almeida Lins  
(CBO/MUSEU EMILIO GOELDI – Membro Externo)

**Belém-PA  
2017**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus (Alá) por ter me ajudado a chegar até aqui e estar me propiciando essa oportunidade de conclusão do Doutorado. Sem Sua ajuda tenho certeza que não teria conseguido atingir nem um terço dos meus objetivos.

Agradeço em especial aos meus pais que sempre me ajudaram no que foi preciso para crescer na vida tanto no pessoal quanto no profissional. Sem eles não teria adquirido forças para vencer cada obstáculo que surgia na minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza, pela paciência e ajuda ao montar este trabalho com dedicação e vontade, sempre esclarecendo e corrigindo minhas dúvidas e erros, respectivamente.

Agradeço a Kamila Dias Bernardes, minha namorada, por toda paciência durante essa jornada, acompanhando desde o início, incentivando, ajudando, aconselhando e muito mais. Só tenho a agradecer, pois você era minha motivação para finalizar esta pesquisa.

Aos amigos (a) do LAMPS, em especial a, Iara Ferreira e Deibson Silva, os quais foram muito importantes para finalização desta pesquisa. E agradeço principalmente pela grande ajuda e importantíssima amizade que cresceu a cada dia. Sou eternamente grato a todos vocês e jamais irei esquecê-los por tudo que aprendi com cada um de vocês.

Agradeço aos meus amigos que fiz nessa trajetória dentro do Universidade Federal Pará/Campus de Tucuruí, Douglas Neves, Adry Kleber, Jessé Padilha, Udson Pacheco e Marcelo Rassy. Obrigado pelo suporte, incentivo e principalmente a amizades de vocês.

Agradeço aos meus alunos e amigos do BAJA, em especial, a Valéria Menezes, Druscilla Mafalda, Suene Oliveira e Jurandir Marcos, por toda ajuda, disponibilidade e paciência nas atividades de extração das fibras e ensaios mecânicos, sem vocês ainda estaria longe de realizar esse sonho.

Agradeço também a Eletronorte pela disponibilidade das bananeiras, a UNIFESPA na figura do Prof. Dr. Denílson da Costa e Prof. Marcio Mafra pela amizade e disponibilidade do resíduo de cobre, a EMBRAPA por ceder seu laboratório para realização do estudo da anatomia das fibras e Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Claudia e sua aluna Ana Claudia (UEPA) pela ajuda e paciência na realização desta pesquisa.

E a todos meus amigos que me ajudaram direta ou indiretamente nessa longa caminhada que é a nossa vida.

À banca examinadora pelo aceite do convite à apresentação deste trabalho.

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Raja Adib El Banna e Manwa Raja El Banna por todo sacrifício e apoio que tiveram para eu conseguir chegar aonde cheguei.*

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

**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*).**

**Wassim Raja El Banna**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Processos de Fabricação

A crescente preocupação ambiental tem impulsionado o desenvolvimento de materiais alternativos provenientes de recursos renováveis. As fibras vegetais vêm sendo utilizadas em diversos setores econômicos em substituição às fibras sintéticas. As fibras vegetais oferecem vantagens como baixo custo, não são tóxicas e baixa densidade. Partículas rígidas, adicionadas aos polímeros aumentam o módulo de elasticidade, aumentam a condutividade térmica do compósito assim como podem aumentar a tenacidade. Este trabalho possui como objetivos a análise mecânica (tração, flexão e impacto), física (massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água), análise de retardância de chama (ensaio de flamabilidade) e morfológica (microscopia eletrônica de varredura) da matriz plena, do compósito polimérico reforçado com resíduo de flotação do minério de cobre, do compósito polimérico reforçado com fibras de bananeira e do compósito polimérico híbrido com reforço de fibras de bananeira e resíduo de cobre. A fabricação dos compósitos foi realizada pelo processo manual (*hand lay-up*), à temperatura ambiente, com pressão e utilizando um molde metálico padronizado. Foram fabricados 10 corpos-de-prova para cada fração e para a matriz polimérica plena. Os compósitos poliméricos foram fabricados seguindo as suas frações mássicas: as fibras variando em 1%, 2% e 3%, o resíduo de cobre variando em 10%, 20%, 30% e 40%, e o compósito híbrido com 1% e 2% de fibra com adição de 10% e 20% de resíduo de cobre. A adição da partícula do resíduo aumentou significativamente o valor da massa específica aparente do compósito, em contrapartida ocasionou a diminuição dos valores de porosidade aparente e absorção de água. Para os ensaios de tração o compósito que melhor apresentou resultado significativo foi o reforçado com 1% de fibra de bananeira com 38,50 MPa. Os compósitos poliméricos reforçados

com 2% de fibra de bananeira, reforçados com 40% de resíduo de cobre, e o compósito híbrido com 2% de fibra e 20% de resíduo de cobre apresentaram os melhores resultados de tensão máxima à flexão com 156,03 MPa, 153,21 MPa e 198,16 MPa, respectivamente. Já para os ensaios de impacto, o compósito que obteve os melhores resultados entre as amostras ensaiadas foi o compósito híbrido com fração 2% de fibra e 20% de resíduo com 21,26 kJ/m<sup>2</sup>. Os compósitos não foram classificados como materiais retardantes de chama, apesar de todos obterem classificação HB, eles não se adequaram dentro da classificação de acordo com a norma UL 94. As propriedades mecânicas foram avaliadas a partir dos ensaios realizados e as superfícies fraturadas foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura, na qual os mecanismos de falhas predominantes nos compósitos que apresentaram melhores resultados foi o rompimento das fibras e para as frações de 30% e 40% houve uma melhor dispersão das partículas dentro da matriz possibilitando a melhoria de suas propriedades.

**Palavras-chave:** Minério de cobre, Fibras de bananeira, Compósitos híbridos.

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.)

**INFLUENCE OF FLOTATION RESIDUE COPPER ORE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMOSET MATRIX COMPOSITES AND BANANA FIBER (*Musa Sapientum*, *Musacae*)**

**Wassim Raja El Banna**

Advisor: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Concentration area: Manufacturing process

Growing environmental concern has driven the development of alternative materials from renewable resources. The vegetable fibers have been used in various economic sectors to replace synthetic fibers. Vegetable fibers offer advantages such as low cost, are not toxic and low density. Hard particles are added the polymer to increase the modulus, increase the thermal conductivity of the composite as well as can increase toughness. This work has as objectives the mechanical analysis (tensile, flexural and impact), physical analysis (apparent density, porosity and water absorption), flame retardance analysis (flammability test) and morphological electron microscopy (scan) of the pure matrix, reinforced polymeric composite with flotation residue of copper ore, the polymeric composite reinforced with banana fibers and the hybrid polymeric composite reinforcement banana fibers and residue copper. The manufacture of the composites was performed by the manual process (*hand lay-up*) at room temperature, under pressure and using a standard metal mold. 10 specimens of the test piece for each fraction and the pure polymer matrix were manufactured. The polymer composites were manufactured by following its mass fractions: the fibers vary by 1%, 2% and 3%, the copper residue ranging in 10%, 20%, 30% and 40%, and the hybrid composite with 1% and 2% fiber with addition of 10% and 20% copper residue. The addition of the residue particles significantly increased the value of apparent density of the composite, in turn caused the decrease of the apparent porosity and water absorption. For the tensile tests the compound showed a significant better result was reinforced with 1% banana fiber with 38,50 MPa. Polymeric composites reinforced with 2% banana fiber, reinforced with 40% copper residue, and the hybrid composite with 2% fiber and

20% copper residue showed the best maximum flexural strain results with 156,03 MPa, 153,21 MPa and 198,16 MPa, respectively. And for the impact test, the composite that obtained the best results among the samples tested was the hybrid composite with 2% banana fiber and 20% copper residue with 21,26 kJ/m<sup>2</sup>. The composites were not classified as flame retardant material, despite all they HB rating, they did not fit within the classification according to UL 94. The mechanical properties were evaluated from the tests carried out and the fractured surfaces were examined by scanning electron microscopy, in which the predominant mechanisms of failure in the composites that presented the best results were breaking of the fibers and for the fractions of 30% and 40% there was a better dispersion of the particles inside the matrix allowing the improvement of its properties.

**Keywords:** Copper ore, Banana fibers, Composites hybrids.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	21
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	21
1.2 JUSTIFICATIVA	23
1.3 INEDITISMO	24
1.4 OBJETIVO GERAL	24
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	25
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	26
2.1 SUSTENTABILIDADE	26
2.2 COMPÓSITOS	27
2.2.1 Classificação dos compósitos	28
2.2.2 Compósitos poliméricos reforçados com fibra	29
<b>2.2.2.1 Interface fibra/matriz</b>	30
2.2.3 Materiais compósitos reforçados com particulados	31
2.3 MATRIZES POLIMÉRICAS UTILIZADAS NA FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS	33
2.3.1 Matrizes termoplásticas	34
2.3.2 Matrizes termorrígidas	34
<b>2.3.2.1 Resina Poliéster</b>	36
<i>2.3.2.1.1 Isoftálica</i>	37
2.4 FIBRAS VEGETAIS	38
2.4.1 Fibra de bananeira	42
2.5 PARTÍCULAS MINERAIS	45
2.5.1 Processo de beneficiamento do cobre	47
<b>2.5.1.1 Resíduo de cobre</b>	49
2.6 MATERIAIS HÍBRIDOS	50
2.7 MATERIAIS COMPÓSITOS PARTÍCULADOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS	51
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b>	53
3.1 MATERIAIS	53
3.1.1 Materiais Poliméricos	53

3.1.2 Resíduo Mineral	54
3.1.3 Fibra de Bananeira	54
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	56
3.2.1 Caracterização das fibras de bananeira	56
<b>3.2.1.1 Caracterização anatômica das fibras de bananeira</b>	56
<b>3.2.1.2 Caracterização física das fibras de bananeira</b>	58
<b>3.2.1.3 Caracterização mecânica das fibras de bananeira</b>	60
<b>3.2.1.4 Caracterização química das fibras de bananeira</b>	61
<i>3.2.1.4.1 Determinação do teor de Lignina</i>	61
<i>3.2.1.4.2 Determinação do teor de Holocelulose</i>	62
<i>3.2.1.4.3 Determinação do teor de Celulose</i>	62
<i>3.2.1.4.4 Determinação do teor de Hemicelulose</i>	63
<b>3.2.1.5 Caracterização microestrutural das fibras de bananeira</b>	63
3.2.2 Caracterização do resíduo mineral	63
<b>3.2.2.1 Determinação da massa específica do resíduo de cobre</b>	64
<b>3.2.2.2 Análise granulométrica</b>	65
<b>3.2.2.3 Difração de Raios-X (DRX)</b>	65
3.2.3 Confeção dos corpos de prova dos compósitos	66
3.2.4 Caracterização dos materiais compósitos confeccionados	69
<b>3.2.4.1 Ensaio de Massa específica aparente (MEA), Absorção de água (AA) e Porosidade aparente (PA)</b>	69
<b>3.2.4.2 Caracterização mecânica dos materiais compósitos</b>	70
<i>3.2.4.2.1 Ensaio de tração</i>	70
<i>3.2.4.2.2 Ensaio de flexão</i>	71
<i>3.2.4.2.3 Ensaio de impacto Charpy</i>	72
<b>3.2.4.3 Teste de flamabilidade dos materiais compósitos</b>	73
<i>3.2.4.3.1 Ensaio de flamabilidade horizontal</i>	73
<i>3.2.4.3.2 Ensaio de flamabilidade vertical</i>	75
<b>3.2.4.4 Caracterização microestrutural dos materiais compósitos</b>	76
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	77
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE BANANEIRA	77
4.1.1 Caracterização anatômica das fibras de bananeira	77
4.1.2 Caracterização química das fibras de bananeira	79

4.1.3 Caracterização física das fibras de bananeira	80
4.1.4 Caracterização mecânica das fibras de bananeira	82
4.1.5 Caracterização microestrutural das fibras de bananeira	85
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO MINERAL	86
4.2.1 Análise da massa específica	86
4.2.2 Análise granulométrica	87
4.2.3 Difração de Raios-X (DRX)	89
4.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS	90
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS	91
4.4.1 Ensaio de Massa específica aparente (MEA), Absorção de água (AA) e Porosidade aparente (PA)	91
4.4.2 Caracterização mecânica dos materiais compósitos	94
<b>4.4.2.1 Ensaio de tração</b>	94
4.4.2.1.1 <i>Compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira</i>	94
4.4.2.1.2 <i>Compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre</i>	99
4.4.2.1.3 <i>Compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira</i>	105
<b>4.4.2.2 Ensaio de flexão</b>	110
4.4.2.2.1 <i>Compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira</i>	110
4.4.2.2.2 <i>Compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre</i>	114
4.4.2.2.3 <i>Compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira</i>	120
<b>4.4.2.3 Ensaio de impacto Charpy</b>	125
4.4.2.3.1 <i>Compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira</i>	125
4.4.2.3.2 <i>Compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre</i>	129
4.4.2.3.3 <i>Compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira</i>	133
4.4.3 Teste de flamabilidade dos materiais compósitos	137
<b>4.4.3.1 Ensaio de flamabilidade horizontal</b>	137
<b>4.4.3.2 Ensaio de flamabilidade vertical</b>	138

**CAPITULO 5 - CONCLUSÕES**

140

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

142

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos compósitos.	28
Figura 2 – Representação esquemática de compósitos reforçados com: (a) fibras descontínuas unidirecionais, (b) fibras descontínuas aleatórias e (c) fibras contínuas unidirecionais.	30
Figura 3 – Reação de cura de uma resina poliéster.	37
Figura 4 – Resina Isoftálica.	38
Figura 5 – Classificação geral das fibras vegetais	39
Figura 6 – Estrutura da biomassa lignocelulósica.	40
Figura 7 – Estrutura de uma fibra vegetal: (a) Fibras de celulose; (b) Monofilamentos; (c) Feixes de microfibrilas; (d) Cadeias de moléculas de celulose.	41
Figura 8 – Desenho esquemático de uma fibrila de celulose: (a) fibra elementar e (b) mecha de fibras elementares.	41
Figura 9 – Esquema da estrutura da bananeira.	44
Figura 10 – Principais formas das partículas: a) esféricas; b) granulares; c) lamelares; d) fibrilares ou aciculares.	46
Figura 11 – Etapa de beneficiamento de cobre.	48
Figura 12 – Etapa de redução do cobre.	48
Figura 13 – Etapa refino do cobre.	48
Figura 14 – Etapa de conformação.	49
Quadro 1 – Composição química do resíduo do beneficiamento de cobre.	50
Figura 15 – Resíduos da atividade de Mineração.	50
Quadro 2 – Características da resina isoftálica insaturada.	53
Figura 16 – Preparação do compósito: a) Resina poliéster insaturada; b) cobalto (acelerador); c) Iniciador MEK-P.	53
Figura 17 – Resíduo de flotação do processo de beneficiamento do minério de cobre.	54
Figura 18 – Bananeira: a) corte do pseudocaule da bananeira; b) esquema ilustrativo das bainhas foliares do pseudocaule; c) separação das bainhas para extração das fibras.	55
Figura 19 – Máquina de extração de fibras.	55
Figura 20 – Limpeza e armazenamento das fibras extraídas.	56
Figura 21 – Esquema ilustrativo dos parâmetros anatômicos	57

Figura 22 – a) Microscópico óptico, marca LEICA modelo MDR; b) Medição microscópica dos diâmetros das fibras da bananeira.	59
Figura 23 – Fibras de bananeira cortadas para determinação da massa específica.	59
Figura 24 - Máquina de ensaio de tração marca KRATOS modelo IKL3.	60
Figura 25 - Esquematização da fabricação dos tabs.	61
Figura 26 - Máquina de microscopia eletrônica de varredura (MEV).	63
Figura 27 - Síntese do processo de confecção dos corpos de prova.	66
Figura 28 - Molde utilizado no experimento: a) macho; b) fêmea.	67
Figura 29 - Preparo da matriz com reforço: a) pesagem resina; b) homogeneização resina/cobalto; c) homogeneização resina/acelerador/iniciador; d) adição do reforço.	68
Figura 30 - (a) separação das fibras no molde (b) despejo lateral e central da mistura (c) estado final da mistura	69
Figura 31 - Dimensões do corpo de prova (ASTM D-3039).	71
Figura 32 – Máquina de ensaio de tração.	71
Figura 33 - Dimensões do corpo de prova (ASTM D-790).	72
Figura 34 - Máquina de ensaio universal para flexão em três pontos.	72
Figura 35 - Dimensões do corpo de prova (ASTM D-6110-04).	73
Figura 36 – Esquema para realização do ensaio de flamabilidade horizontal.	74
Figura 37 - Teste esquemático para o ensaio de queima vertical.	75
Figura 38 - Gráfico comparativo da massa específica das fibras das bananeiras com outras fibras vegetais.	81
Figura 39 - Gráfico comparativo do teor de umidade das fibras das bananeiras com outras fibras vegetais.	82
Figura 40 - Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	84
Figura 41 - Análise de micrografia da seção transversal da fibra de bananeira.	85
Figura 42 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV): a) Fibra de bananeira do tipo prata apresentando vazios e microcavidades; b) Aspecto superficial da fibra de bananeira prata mostrando uma superfície irregular e rugosa.	85
Figura 43 – Gráfico do valor da massa específica do resíduo de cobre comparado a outros minerais.	86
Figura 44 – Gráfico da curva de distribuição granulométrica.	88
Figura 45 - Distribuição granulométrica do resíduo de cobre.	89
Figura 46 – Difração de Raios X do resíduo de flotação do minério de cobre.	89

Figura 47 – (a) placa do compósito de matriz pura; (b) placa do compósito polimérico adicionado com resíduo de flotação de cobre; (c) placa do compósito polimérico reforçado com fibras de bananeira; (d) placa do compósito polimérico híbrido com resíduo de cobre reforçado com fibras de bananeira.	90
Figura 48 – Gráfico AA e PA em função das proporções dos reforços.	93
Figura 49 – Gráfico MEA em função das proporções dos reforços.	93
Figura 50 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	95
Figura 51 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	96
Figura 52 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de tração: (a) matriz plena; (b) Fibra 1%; (c) Fibra 2%; (d) Fibra 3%.	98
Figura 53 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	100
Figura 54 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	102
Figura 55 – Microscopia eletrônica de varredura: (a) RC10; (b) RC20; (c) RC30; (d) RC40.	104
Figura 56 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	106
Figura 57 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	107
Figura 58 – Microscopia eletrônica de varredura: (a) F1 RC10; (b) F2 RC10; (c) F1 RC20; (d) F2 RC20.	109
Figura 59 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	111
Figura 60 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	112
Figura 61 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de flexão: (a) Fibra 1%; (b) Fibra 2%; (c) Fibra 3%.	114
Figura 62 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	115
Figura 63 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	117
Figura 64 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de flexão: (a) RC10; (b) RC20; (c) RC30; (d) RC40.	119
Figura 65 - Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	121

Figura 66 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	122
Figura 67 – Microscopia eletrônica de varredura: (a) F1 RC10; (b) F2 RC10; c) F2 RC20.	124
Figura 68 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	126
Figura 69 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	127
Figura 70 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de impacto: (a) Fibra 1%; (b) Fibra 3%.	128
Figura 71 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	130
Figura 72 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	131
Figura 73 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de flexão: (a) RC10; (b) RC20; (c) RC30.	132
Figura 74 - Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.	134
Figura 75 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.	135
Figura 76 – Microscopia eletrônica de varredura: (a) F1 RC10; (b) F2 RC20.	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da caracterização anatômica das fibras de bananeiras	77
Tabela 2 – Resultados da caracterização química das fibras de bananeiras	79
Tabela 3 - Resultados da caracterização física das fibras de bananeiras	80
Tabela 4 - Comparativo das propriedades mecânicas das fibras da bananeira em relação às outras fibras vegetais.	83
Tabela 5 - Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de tração das fibras de bananeira.	83
Tabela 6 - Resultados do teste de Tukey para os tratamentos das fibras de bananeira CE, CM e CI.	84
Tabela 7 - Análise granulométrica do resíduo de cobre.	87
Tabela 8 - Parâmetros da curva granulométrica.	88
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de MEA, AA e PA.	91
Tabela 10 – Resultados obtidos através do ensaio de tração.	94
Tabela 11 - Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos reforçados com fibras.	95
Tabela 12 - Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1, F2 e F3.	96
Tabela 13 – Resultados obtidos através do ensaio de tração.	99
Tabela 14 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de tração dos resíduos.	101
Tabela 15 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, RC10, RC20, RC30 e RC40.	101
Tabela 16 – Resultados obtidos através do ensaio de tração.	105
Tabela 17 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos híbridos.	106
Tabela 18 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20.	107
Tabela 19 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão.	110
Tabela 20 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras.	112
Tabela 21 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1, F2 e F3.	112
Tabela 22 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão.	114

Tabela 23 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de flexão dos compósitos reforçados com resíduos de cobre.	116
Tabela 24 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, RC10, RC20, RC30 e RC40.	116
Tabela 25 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão.	120
Tabela 26 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de flexão dos compósitos híbridos.	121
Tabela 27 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20.	122
Tabela 28 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto.	125
Tabela 29 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de impacto dos compósitos reforçados com fibras.	126
Tabela 30 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1, F2 e F3.	127
Tabela 31 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto.	129
Tabela 32 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de impacto dos compósitos reforçados com resíduos de cobre.	130
Tabela 33 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, RC10, RC20 e RC30.	131
Tabela 34 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto.	133
Tabela 35 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de flexão dos compósitos híbridos.	134
Tabela 36 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20.	135
Tabela 37 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal.	137
Tabela 38 – Resultados do ensaio de flamabilidade vertical.	138

## NOMENCLATURAS

A	Albita
AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society Testing Materials
Ca	Calcopirita
CAMTUC	Campus Tucuruí
CE	Camada Externa
CM	Camada Mediana
CI	Camada Interna
CoNap	Naftenato de Cobalto
CPs	Corpos-de-prova
CU	Coeficiente de uniformidade
DRX	Difração de Raios-X
HB	Horizontal Burning
kN	QuiloNewton
LABEM	Laboratório de Engenharia Mecânica
Ma	Magnetita
MEA	Massa Específica Aparente
MEK	Metil Etil Cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
$m_i$	Massa Imersa
MPa	Mega Pascal
$m_s$	Massa Seca
$m_u$	Massa Úmida
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NPG	Neopentilglicol
Q	Quartzo
PA	Porosidade Aparente
TGA	Análise de Termogravimetria
UL	Underwriters Laboratories
UFPA	Universidade Federal do Pará

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A conscientização com relação a questões relacionadas ao impacto ambiental e desenvolvimento sustentável tem levado a renovação no interesse em materiais provenientes de fontes naturais, aumentando a introdução de novas matérias-primas e produtos (GEORGE et. al., 2001).

A crescente preocupação com a utilização de recursos naturais, que vem sendo impulsionado pelo demasiado crescimento tecnológico, tende a aumentar o consumo de materiais no mundo. Esse aumento acaba sendo impactante em diversos setores industriais fazendo com que muitos pesquisadores comecem a pesquisar novos materiais e alternativas para um crescimento sustentável (SILVA, 2013).

O Brasil tem um grande potencial para produzir e comercializar diferentes fibras. Porém, muitas fibras como as da bananeira são totalmente descartadas, ou seja, correspondem a resíduos agrícolas, sendo que a sua utilização proporcionaria possibilidades de obtenção de recursos a populações de regiões carentes (norte e nordeste) em que normalmente são plantadas.

Os compósitos são materiais multifásicos que agregam propriedades mecânicas dos materiais envolvidos nesta mistura, e esta combinação tem resultado em descoberta de novos materiais avançados, com propriedades mecânicas superiores (ADAMIAN, 2009). Os compósitos de matriz polimérica termofixos são muito empregados, e dentre essas matrizes, o poliéster permite a produção de compósitos aplicados industrialmente devido às suas propriedades como baixo peso, boa resistência mecânica, boa estabilidade térmica e fácil manipulação; são bastante conhecido pela sua durabilidade, e em função destas vantagens são objetos de muitos estudos e grandes aplicações no campo tecnológico (FONCECA, 2006).

O mercado de polímeros tem crescido significativamente nos últimos 25 anos, nos mais diversificados segmentos (indústria automobilística; espumas industriais; artefatos domésticos; solados de calçados) bem como a procura por materiais que podem conferir aos mesmos, propriedades mecânicas mais elevadas (BASF, 1998).

Vários tipos de polímeros podem ser utilizados como matrizes em compósitos reforçados com fibras vegetais. Os mais comuns são os polímeros termofixos como os poliésteres insaturados, epóxi e fenólico e termoplásticos como polietileno, polipropileno, entre

outros (BRAHMAKUMAR et. al., 2005). Estes polímeros possuem diferentes níveis de interações com as fibras lignocelulósicas, devido às diferenças entre suas estruturas químicas e a dos componentes das fibras (KURUVILLA et. al., 1996).

O aproveitamento de fibras naturais como reforço em matrizes poliméricas no desenvolvimento de materiais compósitos tem sido foco de pesquisas (ARAÚJO et al., 2008), pois algumas fibras vegetais como sisal, coco, cânhamo, entre outras, estão tendo aplicações em uma ampla gama de indústrias (CHEUNG et al., 2009). O campo da pesquisa com fibras vegetais tem crescido com rapidez, especialmente devido às propriedades semelhantes às das fibras de vidro (JOHN e THOMAS, 2008; DITTENBER e GANGARAO, 2012).

A introdução de fibras em plásticos vem se tornando uma prática cada vez mais comum, pois estas possuem potencialmente a capacidade de alterar significativamente as propriedades e o comportamento dos materiais nos quais são inseridas, tais como: aumento da dureza, da resistência mecânica, do módulo de elasticidade, da resistência ao impacto, precisão dimensional, sem se falar na possível redução do custo final do produto, (SALIBA JÚNIOR, 2003).

A utilização de fibras vegetais em produtos comerciais está contribuindo para gerar riqueza e junto a isso reduzir os impactos ambientais que normalmente são causados pelos setores produtivos e também pelo descarte de bens de consumo já que são materiais abundantes, de fontes renováveis e contribuem para o melhor aproveitamento do potencial agrícola brasileiro (MARTINS NETO, 2010).

Para melhorar as propriedades de alguns compósitos, pesquisadores estão investindo na hibridização desses compósitos, já que com esse processo pode-se melhorar as propriedades de um material compósito sem alterar tanto o preço final do mesmo. A hibridização ocorre quando um material compósito apresenta dois ou mais tipos de reforços diferentes. Podendo acontecer à hibridização tanto com materiais sintéticos, naturais e, ou os dois materiais junto, tanto sintético, como natural (IDICULA et. al. 2005).

Observa-se uma carência expressiva de locais adequados destinados ao tratamento ou disposição final de excedentes sólidos industriais e, mesmo aqueles em operação, estão distribuídos de forma pulverizada, porém em quantidade insuficiente. A dificuldade na disseminação de novos locais, seja para o tratamento ou para a disposição final de excedentes sólidos industriais, está atrelada a três fatores principais complicadores: o alto custo de implementação, a lentidão do processo de análise e licenciamento de novas unidades e, por último, a repulsa de prefeituras na implementação de sistemas de tratamento e disposição final dos excedentes sólidos industriais (CETESB, 2015).

Com base nisso, esta pesquisa visa dar oportunidade a comunidades principalmente carentes, que normalmente usam esta fibra de forma artesanal a terem a partir do estudo mais uma fonte de renda com o beneficiamento de um resíduo que provavelmente seria descartado ou queimado, transformando-o em um negócio rentável e socialmente aplicável. Este trabalho também é de suma importância para empresas de tratamento e beneficiamento de minérios, pois o resíduo gerado no processo terá uma aplicabilidade que trará um ótimo retorno financeiro para essas instituições, promovendo ainda mais a questão da sustentabilidade ambiental que muito é discutida entre elas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Muitos pesquisadores tentam alcançar seus objetivos através da fabricação de materiais de alta qualidade para a engenharia a partir de recursos renováveis. Nas últimas décadas o estudo de novas tecnologias, fontes renováveis para geração de energia e a preocupação crescente com o meio ambiente têm feito com que o estudo sobre materiais se desenvolva (LEVY NETO E PARDINI, 2006).

Os compósitos se encaixam perfeitamente neste cenário pois além de aliar as boas características dos materiais, há uma diminuição na poluição, uso de recursos naturais e de energia responsável por boa parte dos custos de produção. Ainda com essa perspectiva o estudo dos compósitos com fibras naturais tem sido um aliado na substituição das fibras sintéticas, diminuindo assim o valor dos produtos e mantendo as características desejadas, desta forma a lista de materiais e suas utilidades são aumentadas a cada dia buscando sempre inovar e produzir bens de consumo duráveis e de qualidade igual ou superior, beneficiando o meio ambiente, o mercado e o consumidor (CALLISTER JÚNIOR, 2007; LEVY NETO E PARDINI, 2006).

Há valor, tecnológico e ambiental, agregado na produção de um material compósito polimérico que utiliza como reforço carga mineral produzida em diversas etapas e operações do processo da atividade de mineração, aproveitando-a de forma a colocá-la no ciclo produtivo e tratando-a como matéria-prima alternativa para a composição de outro material, contribuindo com o desenvolvimento sustentável. A incorporação dessa carga mineral é uma alternativa tecnicamente viável e ecologicamente correta, pois coopera para a redução do volume de materiais descartados na natureza e reduz a exploração de recursos naturais não renováveis.

Este trabalho tem importância por envolver o uso de materiais reciclados, como o resíduo de cobre e fibras de pseudocaulis descartados após a colheita do fruto, contribuindo para preservação do meio ambiente, como proposta de reuso de materiais que seriam

descartados. Os fatores que incentivam a reciclagem de materiais decorrem da necessidade de poupar e preservar os recursos naturais e da possibilidade de minimização de resíduos, o que reduz o volume a ser transportado, tratado e descartado. Assim, reciclando, são reduzidos os problemas ambientais e de saúde pública, assim como os socioeconômicos decorrentes do descarte inadequado dos resíduos sólidos.

### 1.3 INEDITISMO

O trabalho aborda o estudo de fibras de bananeira e resíduos de flotação do minério de cobre e a formação de um compósito com esta fibra, tendo como enfoque principal o emprego de materiais residuais e técnicas que sejam apropriadas à sua produção. Foi investigado o desempenho microestrutural dos materiais compósitos, e ainda como as alterações destas características podem influenciar no comportamento macroscópico do compósito.

Não foram encontrados na literatura informações a respeito do resíduo de cobre e sua adição em matrizes poliméricas, quanto ao comportamento mecânico, físico, microestrutural, etc., o que indica que a presente tese é inédita neste sentido.

O resíduo de cobre tem sido pouco ou ainda não foram investigadas como reforço de compósitos poliméricos, assim a obtenção de características estruturais e diversas propriedades mecânicas, físicas e térmicas serão realizadas originalmente pela primeira vez. Enquanto que as fibras de bananeira apesar de se encontrar diversos estudos, a forma de abordagem neste trabalho é inovadora em comparação com muitos autores.

### 1.4 OBJETIVO GERAL

Determinação da influência do resíduo de flotação de minério de cobre, nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais, em compósitos de base polimérica reforçado com fibras de bananeira (*Musacae*), avaliando a viabilidade de utilização dessas placas para fins de engenharia.

### 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Caracterização anatômica, física, mecânica, química e microestrutural das fibras de bananeira;
- Caracterização física do resíduo de flotação do minério de cobre;

- Avaliar mecanicamente (tração, flexão e impacto) da matriz plena, compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira, compósitos poliméricos com adição de resíduo de flotação de cobre e compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibra de bananeira e adição de resíduo de cobre;
- Avaliar fisicamente (Massa Específica Aparente, Absorção Aparente, Porosidade Aparente) da matriz plena, compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira, compósitos poliméricos com adição de resíduo de flotação de cobre e compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibra de bananeira e adição de resíduo de cobre;
- Avaliar quanto a retardância à chama da matriz plena, dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira, compósitos poliméricos com adição de resíduo de flotação de cobre e compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibra de bananeira e adição de resíduo de cobre;
- Avaliar microestruturalmente a matriz plena, os compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira, compósitos poliméricos com adição de resíduo de flotação de cobre e compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibra de bananeira e adição de resíduo de cobre;

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

O segundo capítulo diz respeito à Revisão Bibliográfica apresentando o que a literatura já tem estabelecido, por meio de pesquisa, com relação ao assunto proposto no tema.

O terceiro capítulo apresenta os métodos utilizados na produção e ensaios do compósito e materiais utilizados.

O quarto capítulo trás os resultados obtidos dos ensaios realizados, concernentes à caracterização mecânica do compósito confeccionado e a comparação desses com a literatura apresentada no segundo capítulo.

O quinto capítulo traz as considerações finais com relação aos objetivos específicos, verificação da validação da análise e algumas recomendações de melhoria e acréscimo futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 SUSTENTABILIDADE

Anteriormente à revolução industrial, o extrativismo primário permitia uma colaboração harmoniosa com a natureza ou, no caso de abuso, levava rapidamente ao colapso. Com o advento da tecnologia moderna, entretanto, houve um aumento descontrolado nas demandas e no uso das reservas naturais, o que têm trazido consequências deletérias ao planeta. Temas como alterações climáticas ou aquecimento global, desequilíbrio de ecossistemas e desastres ambientais têm despertado um grande interesse da comunidade científica e da sociedade em geral, pois efeitos locais, regionais e globais já são associados à forma destrutiva de ação do ser humano sobre a Natureza (DIAMOND, 2005).

Dentro deste contexto o Brasil tem um papel fundamental no desenvolvimento de políticas de manutenção e desenvolvimento sustentável, pois em seu território se concentra uma das mais ricas biodiversidades do planeta: a Floresta Amazônica. Minérios, madeiras, espécies vegetais e animais, numa lista de recursos de valor incalculável, são explorados sem controle, permitindo com isso a devastação dos recursos oriundos da floresta.

Segundo Manzini e Vezzoli (2005) a sustentabilidade ambiental pode ser definida como sendo as condições sistêmicas segundo as quais, em nível regional e planetário, as atividades humanas não devem interferir nos ciclos naturais em que se baseia tudo o que a resiliência do planeta permite e, ao mesmo tempo, não devem empobrecer seu capital natural, que será transmitido às gerações futuras.

O conceito de desenvolvimento sustentável embute, o de “empreendedorismo sustentável”, que se fundamenta na ecoeficiência, na minimização da produção de lixo e na prevenção contra a poluição. Assim, o empreendedorismo sustentável consiste no uso inteligente dos recursos disponíveis, ou seja, numa combinação entre desenvolvimento e preservação, único caminho para a permanência da vida no planeta (VEIGA, 2007).

O empreendedorismo sustentável leva ao desenvolvimento de produtos ecologicamente corretos, isto é, construídos a partir da reciclagem de resíduos descartados ou do aproveitamento de descartes da própria natureza, que causam baixo impacto no ambiente (DEMARCHI, 2010).

Muitos produtos considerados sustentáveis, produzidos na atualidade, utilizam, como matéria-prima, refugos, resíduos, sucatas do lixo industrial, entre outros, o que lhes agrega valor

quanto à sua classificação como ambientalmente corretos. Por outro lado, é importante, também, conforme Manzini e Vezzoli (2005), que eles sejam, ao final de seus ciclos de vida, facilmente recicláveis.

Uma das principais estratégias de redução do impacto ambiental é o desenvolvimento de produtos a partir da utilização de refugos de toda espécie. A Organização Mundial da Saúde considera como resíduo tudo o que o homem não deseja mais e descarta, pois não tem valor de mercado. Um resíduo não é, por princípio, algo nocivo. Muitos resíduos podem ser transformados em subprodutos ou em matérias-primas para outras linhas de produção (VALLE, 2002).

## 2.2 COMPÓSITOS

Os compósitos são originários das primeiras sociedades agrícolas, no entanto o aparecimento destes materiais teve real destaque na segunda metade do século XX com o uso de estruturas compósitas leves para muitas soluções técnicas. Nas décadas de 80 e 90, o uso de compósitos tornou-se muito comum para otimizar o desempenho de veículos espaciais e aviões militares (VENTURA, 2009).

De um modo geral, compósito é um material estrutural que pode ser definido como uma combinação a nível macroscópico de dois ou mais materiais, não solúveis entre si, onde um dos constituintes é a fase de reforço e aquele em que ele é incorporado é chamado de matriz (KAW, 2006).

A escolha da matriz dependerá das propriedades exigidas para uma determinada aplicação, como também do processo de fabricação escolhido e do custo associado. A matriz tem o papel de manter a integridade estrutural do compósito através da ligação com a fase dispersa em virtude de suas características coesivas e adesivas, além de transferir o carregamento para a fase dispersa (CALLISTER JR., 2008).

Em compósitos poliméricos, a fase dispersa é formada por um componente que pode ser um agente de reforço ou de enchimento. O material de reforço é, usualmente, mais rígido e resistente que a matriz e sua função é melhorar as propriedades mecânicas do polímero, enquanto que a carga de enchimento é usada para modificar as propriedades da matriz polimérica e/ou reduzir custos (CALLISTER JR., 2008).

Os compósitos podem ser reforçados por fibras de tal forma que ambas, fibras e matriz, conservem suas propriedades químicas, físicas e mecânicas, e ainda, produzam uma

combinação de propriedades que não podem ser conseguidas com um dos constituintes agindo sozinho (MALLICK, 1988).

### 2.2.1 Classificação dos compósitos

Os compósitos são classificados em compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e laminados, (HULL e CLYNE, 1981). A Figura 1 apresenta a classificação dos compósitos e subdivide essa classificação.

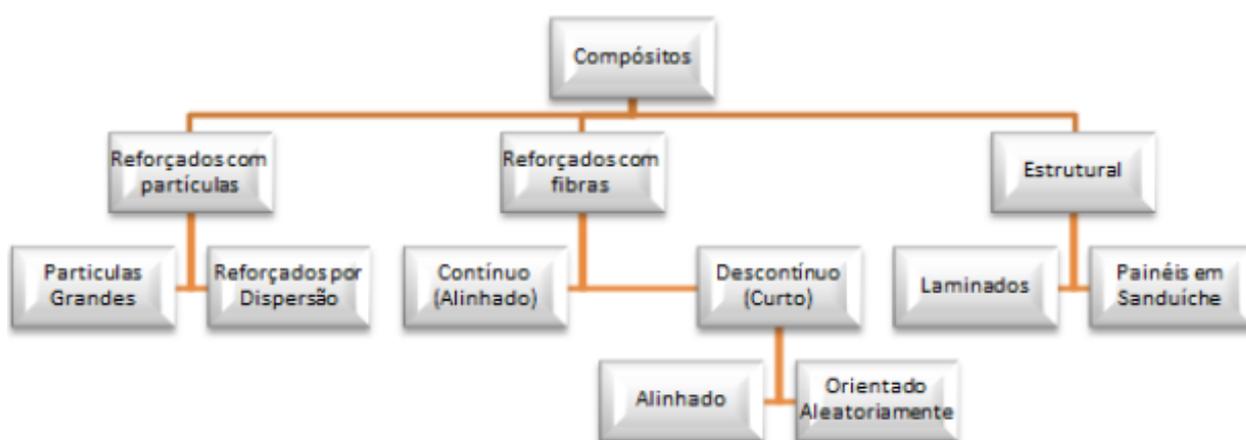


Figura 1 – Classificação dos compósitos.

Fonte: (CALLISTER JR., 2008).

De acordo com Callister Jr. (2008), os compósitos se classificam da seguinte maneira:

- a) Compósitos particulados (partículas envolvidas por uma matriz): Uma determinada matriz reforçada por uma fase dispersa na forma de partículas. O efeito das partículas dispersas sobre as propriedades dos compósitos depende das dimensões das partículas, tipo de partículas, interação partícula-matriz, dentre outros aspectos.
- b) Compósitos fibrosos: A fase dispersa na forma de fibra, melhora a rigidez do material e a resistência à fratura, dificultando o crescimento da trinca na direção normal à fibra.
- c) Compósitos estruturais: Os compósitos laminados são compósitos de camadas com diferentes orientações ou de uma matriz reforçada com uma fase dispersa em forma de folhas. Os compósitos em forma de sanduíche são formados por várias camadas de fibras com orientações diferentes.

Quando um compósito é fibroso suas características mecânicas não dependem somente das propriedades das fibras, mas da ligação interfacial entre as fases fibra/matriz.

### 2.2.2 Compósito polimérico reforçado com fibra

Recentemente, fibras naturais estão sendo usadas em compósitos poliméricos (CORREA, et al., 2003). É crescente o interesse na utilização de materiais lignocelulósicos, principalmente de fibras vegetais, como reforço em compósitos de matriz termofixos e/ou termoplástica. Compósitos com fibras vegetais podem ser aplicados em diferentes segmentos industriais como na construção civil, indústria de móveis e no setor automotivo onde já existe um mercado praticamente consolidado (MUELLER e KROBJILOWSKI, 2003).

As propriedades mecânicas do reforço fibroso em compósitos poliméricos dependem, principalmente, de três fatores: módulo de resistência da fibra, estabilidade química da matriz polimérica e ligação efetiva entre matriz e reforço na transferência de forças através da interface (KURUVILLA et al., 1996).

Em geral, a melhor combinação das propriedades dos compósitos reforçados com fibras é obtida quando a sua distribuição é uniforme. Os compósitos com fibras contínuas e alinhadas têm respostas mecânicas que dependem de vários fatores como o comportamento tensão-deformação das fases fibra e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada.

Embora os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas tenham uma eficiência de reforço menor que os compósitos com fibras contínuas estão cada vez mais a ser utilizados em diversas aplicações. Já os compósitos com fibras descontínuas e aleatórias são aplicados onde as tensões são preferencialmente multidirecionais. A eficiência deste tipo de compósito é muito baixa quando comparada com a dos compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas na direção longitudinal (VENTURA, 2009).

Do ponto de vista tecnológico, os compósitos com fibras são os mais importantes, pelo fato de resultarem em melhores propriedades específicas. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas (curtas), alinhadas ou com distribuição aleatória, podendo ser obtidas em uma variedade de formas, conforme esquema ilustrativo da Figura 2 (CALLISTER JR, 2008).

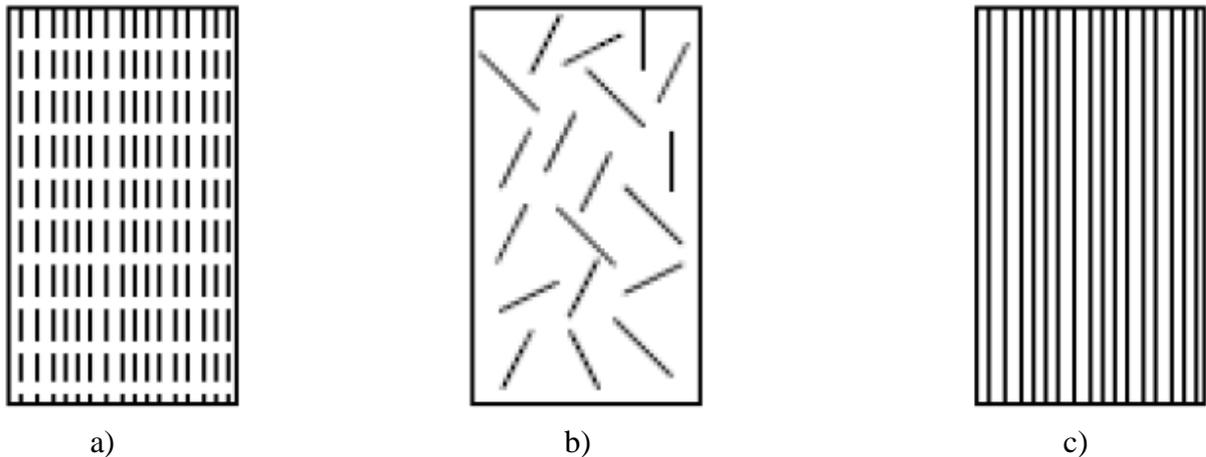


Figura 2 - Representação esquemática de compósitos reforçados com: (a) fibras descontínuas unidirecionais, (b) fibras descontínuas aleatórias e (c) fibras contínuas unidirecionais.

Fonte: (CALLISTER JR, 2008).

Em compósitos reforçados com fibras contínuas, as respostas mecânicas dependem do comportamento tensão-deformação das fibras e da matriz, das frações volumétricas das fases e da direção em que a tensão é aplicada (CALLISTER JR, 2008). Esses compósitos apresentam maior rigidez e resistência à tração na direção das fibras, porém com baixo desempenho mecânico na direção transversal às mesmas e, neste caso, sua resistência é controlada pelas propriedades da matriz (SILVA, 2003).

O carregamento das fibras é função de sua orientação e de seu comprimento, sendo que as extremidades das fibras são pontos concentradores de tensões, que induzem a tensões cisalhantes na interface (SILVA, 2003).

Existem vários parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas de matrizes poliméricas reforçadas com fibras curtas, dentre estes, destacam-se: a dispersão, distribuição, orientação e o comprimento das fibras, as propriedades e a fração volumétrica dos componentes e a interface fibra/matriz.

### 2.2.2.1 Interface fibra/matriz

A estrutura e as propriedades da interface fibra/matriz influenciam significativamente as propriedades mecânicas de materiais compósitos, pois é através da interface que os esforços atuantes na matriz são transferidos para o reforço (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994). Com a melhora da adesão interfacial, ocorre um aumento da transferência de tensões da matriz para as fibras, promovendo aumento das propriedades mecânicas, tais como, resistência à tração e módulo de elasticidade (BLEDZIK e GASSAN, 1999).

Existem diversos mecanismos de adesão que podem ser formados entre a matriz e a fibra, para uma determinada combinação de materiais:

- **Adsorção e molhamento:** o molhamento efetivo da fibra pelo polímero remove o ar e cobre toda superfície da fibra, dependendo das tensões superficiais dos componentes. Para que este mecanismo ocorra, é necessário que a superfície da fibra esteja isenta de água (RABELLO, 2000).
- **Ligação química:** é a forma mais eficaz de adesão em compósitos, podendo ocorrer principalmente com a aplicação de agentes de acoplamento na superfície da carga, os quais servem de elo entre o reforço e o polímero, devido a sua dupla funcionalidade (RABELLO, 2000). Esses agentes de acoplamento devem conter em sua estrutura uma parte que interage com a superfície da fibra e outra com grupos orgânicos semelhantes às cadeias da matriz polimérica (BARRA, 2004).
- **Interdifusão:** é possível formar uma ligação entre duas superfícies por difusão das moléculas de uma fase na outra. Para que ocorra adesão, os parâmetros de solubilidade dos dois componentes devem ser próximos (PIRES, 2009).
- **Atração eletrostática:** ocorre em superfícies que apresentam cargas elétricas opostas, como no caso das interações ácido-base e ligações iônicas, sendo que a resistência da interface dependerá da densidade de cargas elétricas (HULL, 1988).
- **Adesão mecânica:** esse é o mecanismo mais comum, sendo que o polímero efetua preenchimento completo da superfície da fibra, cobrindo todas as cavidades presentes. Uma maior rugosidade da superfície resultará em um aumento da resistência dessa ligação (RABELLO, 2000).

As formas mais efetivas para se obter uma boa adesão interfacial são através dos mecanismos de adsorção e ligação química (RABELLO, 2000).

### 2.2.3 Materiais compósitos reforçados com particulados

A ampliação do mercado dos materiais compósitos tem sido acompanhada pela ampliação das classes de materiais utilizados na elaboração dos mesmos. Recentemente, o interesse no emprego de partículas na elaboração de materiais compósitos tem crescido em muitas aplicações (CASARIL, 2004).

Segundo Casaril (2004), as partículas são componentes que apresentam razão de aspecto (relação entre a maior e a menor dimensão – comprimento e diâmetro – do corpo: L/D) menor

do que 3. Esses componentes são denominados de cargas particuladas ou não fibrosas, podendo estar na forma de partículas, aglomerados de partículas, escamas ou flocos.

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos são influenciadas diretamente não só pelas propriedades mecânicas dos seus materiais constituintes, mas também por algumas características dos materiais particulados, como tamanho de partícula, formato da partícula, características de superfície e distribuição do tamanho de partícula.

As cargas modificam propriedades físicas e mecânicas de polímeros de diversas maneiras. As partículas utilizadas nas dimensões microscópicas promovem um incremento na estabilidade térmica (JANG et al., 2011), rigidez, resistência mecânica (FU et al., 2008) e resistência ao crescimento e propagação de trincas na matriz polimérica (BOONYAPOOKANA et al., 2011).

A adição de partículas confere um aumento no volume do compósito, entretanto pode se notar que para um mesmo volume adicionado, a diminuição no tamanho das partículas exibe uma maior área de contato específica, e conseqüentemente, uma maior região de contato dentro da matriz polimérica, conferindo ser o comportamento resultante do compósito determinado pela interface do material (WETZEL et al., 2002).

Inicialmente, as cargas minerais eram adicionadas aos polímeros apenas para reduzir custos. Porém, inúmeras alterações que podiam ser vantajosas foram notadas com a adição de partículas minerais dentro da resina polimérica. Partículas rígidas, adicionadas aos polímeros, geralmente, aumentam o módulo de elasticidade e a temperatura de deflexão térmica, diminuem a contração no molde, podem diminuir o calor específico e aumentar a condutividade térmica, melhorando também sua aparência (DALPIAZ, 2006).

Estas partículas induzem, na matriz, concentrações de tensões. Os pontos de esforço máximo estão situados nos polos, no caso de partículas perfeitamente aderentes e no equador das partículas, no caso de fraca adesão. Uma maior concentração de tensões tende a reduzir a resistência à tração do material. A forma, a adesão e a distribuição granulométrica das partículas são características importantes em relação à tenacidade e resistência (DÍEZ-GUTIÉRREZ et al., 1999).

As partículas são aditivos empregados no processamento de polímeros com diversas finalidades: promover redução dos custos, reforçar, fornece estabilidade dimensional, etc. As partículas são de dois tipos: partículas de reforço, empregadas com o objetivo de melhorar determinadas propriedades (resistência à tração, deformação e resistência à abrasão), e as partículas inertes ou de enchimento são empregadas com o objetivo de reduzir os custos e melhorar o processamento, porém possuem efeitos nulos ou negativos sobre certas propriedades

nas quais foram citadas (RABELO, 2000). Quando a partículas de reforço é empregada para modificar as propriedades de um polímero, tem-se a produção de um compósito de matriz polimérica.

Ao utilizar-se as partículas minerais nos compósitos é importante entender as propriedades dos materiais particulados e seus efeitos ou alterações na estrutura e propriedades dos compósitos. Pode-se citar como importantes fatores a serem considerados em um estudo das estruturas poliméricas carregadas (KHUNOVÁ et al, 1999):

- O efeito das partículas na cristalinidade dos compósitos;
- O efeito das partículas no comportamento mecânico dos compósitos;
- O efeito das partículas no comportamento dinâmico mecânico dos compósitos;
- O estudo do processamento do compósito para a obtenção da forma final;
- O efeito das partículas no comportamento óptico dos compósitos;
- O efeito das partículas no comportamento térmico dos compósitos.

Outras propriedades, como as elétricas, degradação ambiental, a retardação de chama, etc podem ser influenciadas diretamente pelas partículas.

### 2.3 MATRIZES POLIMÉRICAS UTILIZADAS NA FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS

Polímero é um composto químico de massa molar elevada, formado por muitas moléculas simples, iguais (meros) ou de vários tipos diferentes, unidas umas às outras por ligações covalentes, resultantes de muitas reações de adição ou de condensação (substituição) consecutivas. Quando um polímero é formado a partir de um único monômero, ele é nomeado homopolímero, e copolímero quando os monômeros são diferentes (CANEVAROLO JÚNIOR, 2006).

Por reações de polimerização entendem-se aquelas em que substâncias simples (monômeros) reagem entre si, combinando suas moléculas e formando moléculas maiores, caracterizadas pela repetição de uma unidade básica (“mero”). Por essa razão, os produtos desse tipo de reação são também conhecidos como polímeros (LEÃO, 2008).

Segundo Pereira (2003), a escolha da matriz depende em alguns casos da aplicação que o compósito irá se destinar, junto com a compatibilidade entre a interface fibra/matriz e em muitos casos o custo da matriz.

Há diversas maneiras de se classificar os polímeros, sendo a classificação conforme as características mecânicas uma das mais utilizadas na fabricação de compósitos. De acordo com o comportamento mecânico, os polímeros podem ser divididos em plásticos (termoplásticos ou

termorrígidos, de acordo com a fusibilidade), elastômeros (borrachas) e fibras (MANO e MENDES, 1999).

### 2.3.1 Matrizes termoplásticas

As resinas termoplásticas recebem essa denominação devido a sua facilidade de deformar-se plasticamente com o aumento da temperatura, chegando a se tornarem líquidas a temperaturas elevadas. Tanto a deformação quanto a liquefação ocorrem principalmente por causa da inexistência de ligações fortes entre suas moléculas possuindo somente as forças de Van der Waals, para manter estas moléculas unidas. Essas resinas têm como principal vantagem a capacidade de poderem ser recicladas. O processo de reciclagem diminui as suas propriedades mecânicas. Entre as desvantagens, estas matrizes possuem uma baixa resistência mecânica e baixo módulo de elasticidade, pela sua forma de processamento, ser na maioria das vezes por extrusão, uma limitação desta matriz é sua utilização com reforço particulado, diminuindo assim o seu desempenho estrutural (SILVA, 2012).

As resinas termoplásticas mais utilizadas no setor industrial são as poliamidas, polietileno tereftálico, polipropileno, polietileno (alta e baixa densidade), policloreto de vilina, acrílicos, policarbonato poliestirenos (ALBUQUERQUE, 2005).

A escolha da matriz depende da aplicabilidade do compósito e das propriedades desejadas. Industrialmente, as matrizes de termoplásticos são mais viáveis, pelo número de peças que podem ser produzidas em curto espaço de tempo, com um número reduzido de mão de obra qualificada. Os polímeros termoplásticos, macromoléculas de cadeia linear ou ramificada, normalmente são fundidos durante o processamento e podem ser reciclados, pois fundem e retornam ao seu estado anterior sem degradação do material. Os termoplásticos, e por consequência os compósitos de termoplásticos, podem ser moldados por injeção, extrusão ou por outras técnicas de moldagem por aquecimento. As maiores restrições de peças de termoplásticos são as dimensões e o custo de equipamentos de processo, quanto maior a peça, maior susceptibilidade ao empenamento e mais caro o equipamento de processo (ALBINANTE et al, 2013).

### 2.3.2 Matrizes termorrígidas

Dentre as resinas poliméricas, as resinas termorrígidas são as mais utilizadas no processamento de compósitos poliméricos. Isto ocorre por serem fáceis de processar,

promovendo uma excelente molhabilidade dos reforços, e apresentarem um bom balanço de propriedades, além de estarem disponíveis em uma ampla variedade de grades a um custo relativamente baixo (SILVA, 2010).

As resinas termorrígidas são obtidas a partir de oligômeros de baixo peso molecular e normalmente se apresentam na forma de um líquido de baixa e média viscosidade. A reação de reticulação se dá através da adição de um agente de cura (iniciador) ou pelo aumento da temperatura. O processo de pós-cura é recomendável para que se obtenha o máximo em propriedades mecânicas. O sistema rígido resultante é uma rede macromolecular altamente reticulada, infusível e insolúvel, exibindo alta resistência/rigidez mecânica com um mínimo de tenacidade e alta estabilidade térmica (ROSATO, 2004).

Polímeros termorrígidos, diferentemente dos termoplásticos, são rígidos e apresentam ruptura frágil, sendo muito estáveis a variações de temperatura. Após a polimerização (cura), não possuem a capacidade de se fundir novamente, apresentando decomposição quando aquecido a altas temperaturas. Esta característica torna a reciclagem desses polímeros bastante complicada. Na sua estrutura molecular as moléculas formam cadeias que estão ligadas entre si, formando uma rede ou reticulado. Elas estão presas entre si por meio de numerosas ligações, não se movimentando com liberdade como no caso dos termoplásticos (GORNI, 2001). Pode-se colocar como exemplos de polímeros termorrígidos o baquelite, usada em tomadas e no embutimento de amostras metalográficas; poliéster usado em carrocerias, caixas d'água, piscinas, e outros, na forma de plástico reforçado (fibra de vidro), epóxi, fenólico, etc.

Os polímeros termorrígidos, macromoléculas de cadeia reticulada, são polimerizados durante o processamento, não podendo ser reciclados devido à decomposição térmica. Esses polímeros são comercializados principalmente para fabricação de compósitos, além de uso como adesivo e revestimento. O processamento desses compósitos pode ser realizado em moldes de simples confecção e a disposição dos constituintes pode ser feita à mão ou automaticamente. A cura ou endurecimento da resina pode ocorrer com ou sem auxílio de pressão, temperatura ou vácuo. As propriedades alcançadas por esses materiais consagraram o uso de compósitos. A produção desses materiais é limitada pelo tempo de produção. Ainda assim são muitos utilizados por apresentarem propriedades de resistência maiores (SANTOS, 2006).

### 2.3.2.1 Resina poliéster

A resina poliéster é a mais empregada para confecção de compósitos poliméricos, isto se deve ao fato de aliar bom desempenho mecânico, boas condições de reatividade, custo mais acessível que a resina epóxi ou éster-vinilica à diversidade de formulações disponíveis para atender os requisitos exigidos em diferentes áreas de aplicações dos compósitos. (MARINUCCI, 2011).

Os poliésteres insaturados são formados pela reação de esterificação, na qual diácidos insaturados (ácido fumárico ou anidrido maleico, ácidos que retiraram água de hidratação ligada quimicamente na molécula) e diácidos saturados (ortoftálico, isoftálico ou tereftálico) reagem com um diálcool (monoetileno glicol, propileno glicol, neo pentil glicol, etc.) gerando éster e água. Devido à reação ocorrer nas duas extremidades da cadeia, é possível ter moléculas com cadeias muito longas e obter uma infinidade de grupos ésteres ao longo desta cadeia. (ABMACO, 2009).

Após a etapa de condensação (na reação de esterificação), ocorre a formação de uma resina sólida à temperatura ambiente, sendo necessário após essa primeira etapa a sua diluição em monômeros apropriados que são adicionados à resina e que atuam como solventes, conferindo menor viscosidade e melhor processabilidade, além de auxiliar na umectação das fibras. Devido à cura de resinas poliésteres se processarem lentamente e apresentarem baixa mobilidade, a probabilidade das reações intramoleculares ocorrerem é muito pequena. Os monômeros utilizados como solventes atuam também, como copolimerizadores da resina tornando a probabilidade das reações intramoleculares da resina serem maiores (MOREIRA, 2008).

De acordo com o tempo de cura, tempo de gel e propriedades esperada, as resinas poliésteres podem ser aditivadas com aceleradores ou promotores que auxiliam no processo de cura reagindo com o iniciador peróxido formando radicais livres. O uso de inibidores (retardantes) para melhorar a estabilidade de armazenamento da resina evita que o monômero e a parte polimérica reajam entre si antes da adição do iniciador. Os aceleradores mais utilizados são as aminas terciárias e os sais de metal pesado, destacando-se o cobalto e os retardantes mais comuns são hidroquinona e di-tercio-butil hidroquinona (MOREIRA, 2008).

O poliéster insaturado apresenta, geralmente, o monômero de estireno que também possui ligações duplas que são desfeitas por ação de catalisadores dando origem a um polímero termoestável (SILAEX, 2014). A Figura 3 apresenta a reação de cura de uma resina poliéster.

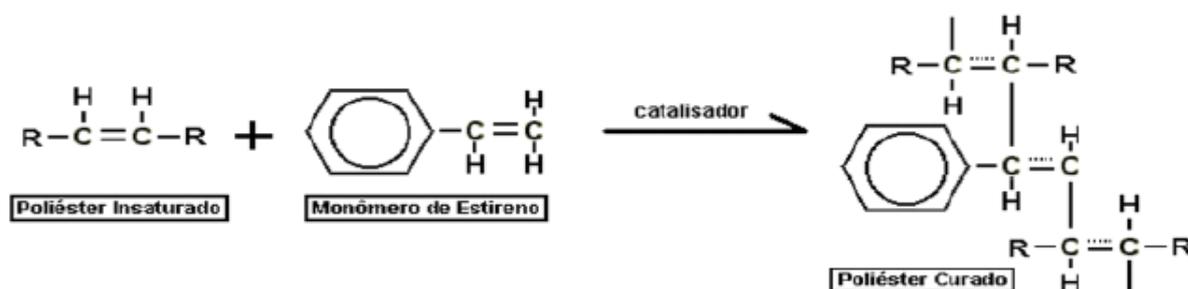


Figura 3 - Reação de cura de uma resina poliéster.  
Fonte: (SILAEX, 2014).

### 2.3.2.1.1 Isoftálica

As resinas isoftálicas são produzidas a partir do ácido isoftálico e apresentam boas resistências químicas, térmicas e mecânicas. Há dois tipos principais: as resinas isoftálicas comuns e as com neopentilglicol (NPG). As resinas isoftálicas comuns são normalmente formuladas com propileno glicol. Apresentam termo de distorção por volta de 100° C e resistência química ligeiramente superior às resinas ortoftálicas. São indicadas para produções de moldes, modelos, estrutura de tanques e tubulações para produtos químicos ou saneamento básico. Enquanto as resinas isoftálicas com NPG, são formuladas com neopentilglicol, apresentando um termo de distorção por volta de 130°C, resistência química muito superior às ortoftálicas. Antes do surgimento das resinas tereftálicas, as resinas isoftálicas apresentavam maior resistência mecânica e elétrica dentre as resinas poliéster. Indicadas para gel-coats de banheira de hidromassagem e piscinas, barreira química e estrutura de tubulações, tanques para combate à corrosão e saneamento básico, massas para prensagem, revestimentos industriais, peças para a indústria elétrica inclusive para alta tensão, resistentes à água fervente, à água do mar, à alguns ácidos e bases, em diversas temperaturas e concentrações (ELEKEIROZ, 2004).

As resinas isoftálicas, Figura 4, podem formar poliésteres de alto peso molecular, com cadeias mais longas, devido ao fato do ácido isoftálico em sua reação não formar anidrido cíclico e com isso não sofre a desvantagem da regeneração como em outras resinas. As cadeias mais longas proporcionam ao produto uma maior resistência mecânica, melhor absorção de impacto, melhor resistência química e térmica (SILVA, 2013).

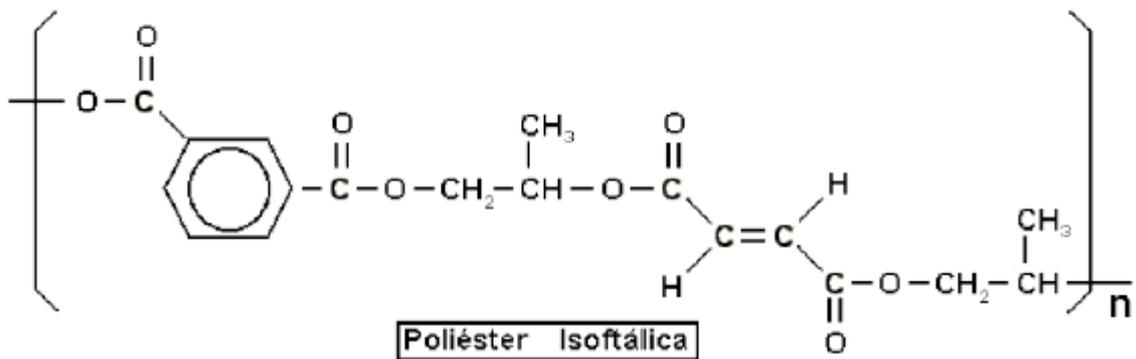


Figura 4 – Resina Isoftálica.  
Fonte: (SILVA, 2013).

## 2.4 FIBRAS VEGETAIS

O Brasil é um país privilegiado geograficamente, possui condições climáticas e solo fértil para o cultivo de uma extensa variedade de espécies de plantas. O investimento no emprego de fibras vegetais contribui com a economia, com a geração de renda, ameniza poluições ambientais e substitui e/ou diminui a utilização de recursos de fontes não renováveis e não biodegradáveis (SATYANARAYANA et al., 2007).

O uso de matérias-primas advindas de fontes renováveis vem sendo de extremo interesse em diversos estudos e pesquisas científicas, devido ao seu potencial na substituição de produtos sintéticos. As perspectivas para o uso de fibras naturais são muito grandes, em áreas como, por exemplo, a indústria têxtil, na indústria automobilística, na área de revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões e construção civil (SILVA, 2014).

As fibras vegetais apresentam suas estruturas de comprimento alongado, e secção transversal vazada e arredondada. As fibras vegetais são um tipo de fibra natural e podem ser distinguidas conforme sua origem na estrutura da planta, em: (i) fibras dos frutos, como coco e açaí, (ii) fibras do caule, como linho, juta, kenaf, (iii) fibras das folhas, como sisal e curauá, e (iv) fibras de sementes, como o algodão (MUELLER e KROBJILOWSK, 2003). A Figura 5 mostra uma classificação geral das fibras vegetais.

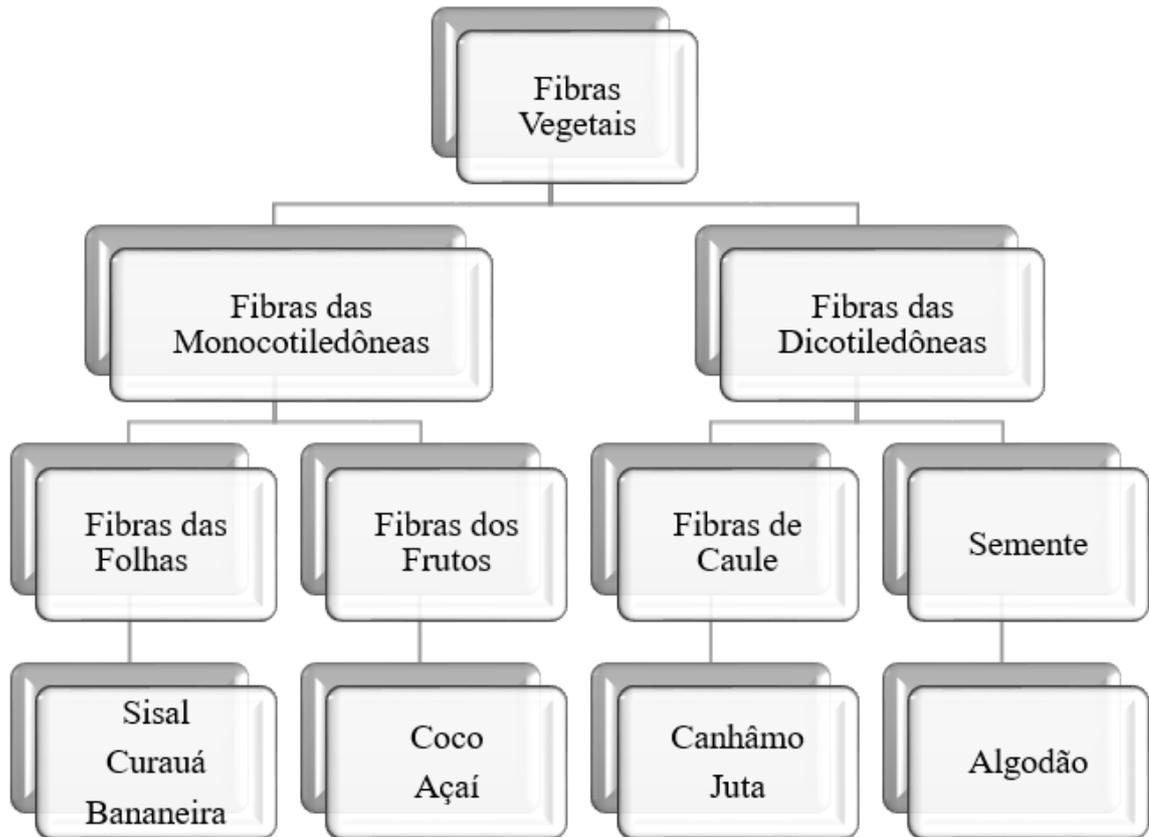


Figura 5 - Classificação geral das fibras vegetais  
 Fonte: (autoria própria adaptado de MUELLER e KROBJILOWSK, 2003)

Em muitas partes do mundo e, principalmente em países em desenvolvimento, além de serem usadas na agricultura como fonte de alimentos, diferentes partes de plantas e frutos tem sido fontes viáveis de materiais para uso industrial (PRASAD et al., 2009).

Todas as fibras vegetais consistem basicamente de fibrilas de celulose imersas numa matriz amorfa de lignina (RAO e RAO, 2007), sendo, portanto consideradas como compósitos naturais, onde a celulose é a parte cristalina que permite às plantas suportar esforços internos e externos, e a lignina, que dá flexibilidade suficiente para permitir a expansão celular durante o crescimento da planta (BURGET, 2006). Estas fibrilas consistem de várias microfibrilas, as quais estão organizadas ao longo do comprimento da fibra: cada fibrila exibe uma estrutura complexa de camadas compostas por uma parede primária em volta de uma parede secundária, similar às fibras de madeira (RAO e RAO, 2007).

As fibras vegetais são basicamente constituídas de lignina, celulose e hemicelulose, além de pequenas quantidades de sais inorgânicos, pectina, corantes naturais e substâncias nitrogenadas que são incluídos no que se denomina de fração de solúveis (SILVA, 2014). A composição química das fibras vegetais (Figura 6), consiste principalmente por microfibrilas (células com alto teor de celulose) envolvidas por uma matriz amorfa de hemicelulose e lignina.

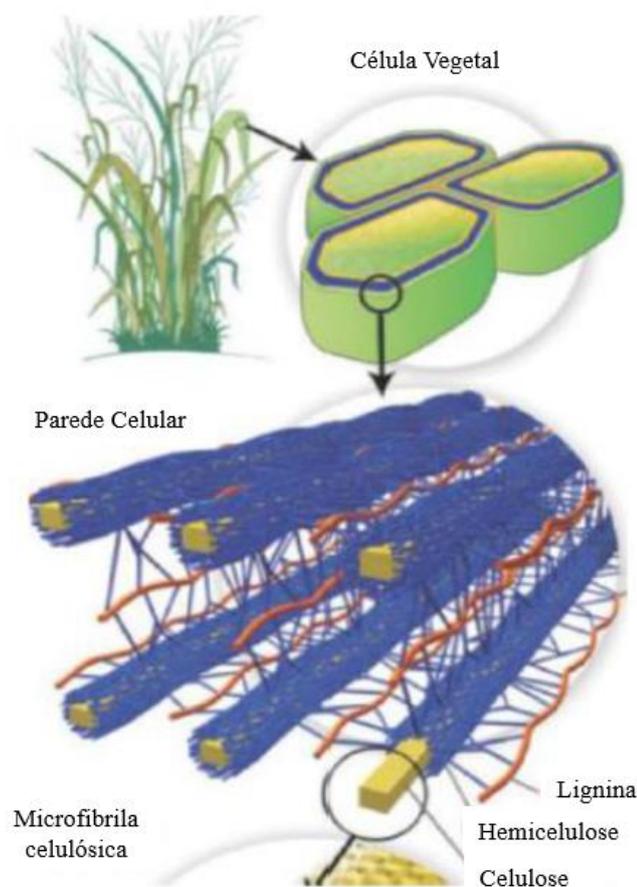


Figura 6 - Estrutura da biomassa lignocelulósica.  
Fonte: (GEHLEN, 2014).

A celulose se resume em um polímero linear cristalino formado por unidades  $\beta$ -D glicopiranosas unidas por ligações glicosídicas  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4). Os grupos laterais possuem reatividades distintas, o grupo C1-OH é derivado da formação do anel através da ligação hemiacetal intramolecular, possui propriedades redutoras, enquanto que o C4-OH é um grupo alcoólico não redutor (REGIANI, 2000).

A hemicelulose é um polissacarídeo amorfo com grau de polimerização de cerca de 50 a 300, hidrofílica e solúvel em soluções alcalinas, sendo facilmente hidrolisada em ácidos. Forma a matriz que envolve as microfibrilas de celulose e normalmente atua como elemento de ligação entre a celulose e a lignina (PIRES, 2009). A lignina é um polímero amorfo, hidrofóbico, formada por componentes alifáticos e aromáticos com estrutura tridimensional ramificada, não hidrolisável em ácidos, porém solúvel em soluções alcalinas. Sua função é conferir rigidez a parede celular (SILVA, 2003).

A constituição estrutural de uma fibra vegetal é apresentada na Figura 7. Cada fibra é composta por diferentes monofilamentos, sendo que cada monofilamento é constituído por

feixes de microfibrilas. Por sua vez, cada microfibrila é composta por uma estrutura complexa formada por paredes celulares que circundam o lúmen (MERLINI, 2011).

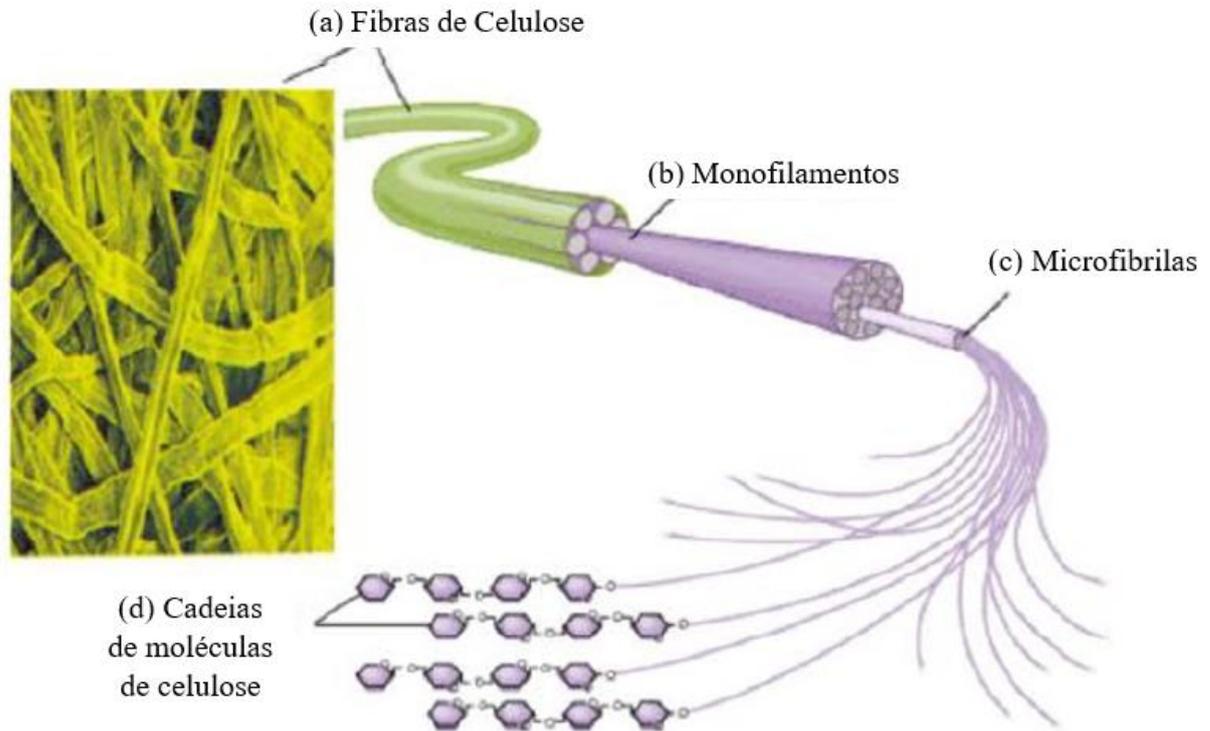


Figura 7 - Estrutura de uma fibra vegetal: (a) Fibras de celulose; (b) Monofilamentos; (c) Feixes de microfibrilas; (d) Cadeias de moléculas de celulose.

Fonte: (PIRES, 2009)

Na Figura 8 pode-se observar uma representação esquemática de uma fibrila de celulose, mostrando as paredes primária e secundária, assim como a presença do lúmen, estrutura presente em todas as fibras vegetais e que garante a baixa densidade deste tipo de material.

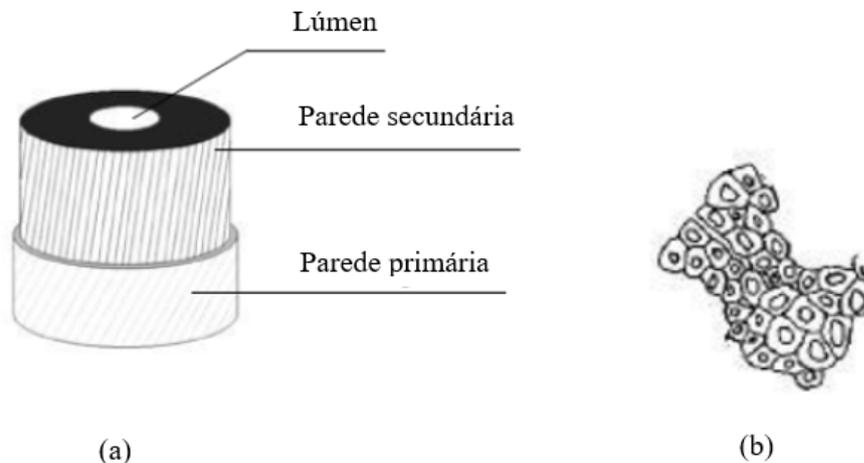


Figura 8 – Desenho esquemático de uma fibrila de celulose: (a) fibra elementar e (b) mecha de fibras elementares.

Fonte: (CHARLET et al.,2007)

As fibras apresentam propriedades que podem ser divididas em primárias e secundárias. As propriedades primárias envolvem relação comprimento-largura (fator de forma), tenacidade, flexibilidade, coesão e uniformidade. As propriedades secundárias englobam a densidade, capacidade de absorção de água, alongamento, elasticidade, resiliência, comportamento térmico, resistência a microrganismos, exposição à luz, dentre outros (CANDIDO, 2014).

Na tentativa de buscar respostas para a evolução dos vegetais, muitos pesquisadores começaram a estudar a estrutura das plantas e concluíram que as propriedades macroscópicas da planta se originam principalmente da organização da parede celular, fazendo com que, particularmente as escalas nano e microestrutural sejam relevantes para a formulação de aproximações sobre os aspectos biomecânicos (BURGET, 2006). Depois de alguns estudos nesse sentido, hoje se pode afirmar que as propriedades e estrutura das fibras são influenciadas por diversas variáveis como a área de plantio do vegetal, o clima e a idade da planta (KALIA et al., 2011).

Há grandes vantagens no uso de fibras vegetais, tais como a baixa massa específica; maciez e abrasividade reduzida, recicláveis, não toxicidade e biodegradabilidade; baixo custo e baixo consumo de energia na produção, baixa condutividade térmica, bom isolamento térmico e acústico, sendo assim estudadas as características mecânicas (SATYANARAYANA, et. al. 2007).

#### 2.4.1 Fibra de bananeira

Não se pode indicar com exatidão a origem da bananeira, pois ela se perde na mitologia grega e indiana. Atualmente, admite-se que seja originário do Oriente, sul da China ou Indochina. Há referências da sua presença na Índia, Malásia ou Filipinas, onde tem sido cultivada há mais de 4.000 anos (MOREIRA, 1987). O Brasil representa a quinta maior produção mundial de banana com 7.090.619 de toneladas. Dentre os maiores produtores estão os estados da Bahia, São Paulo, Minas Gerais, Pará e Santa Catarina, com uma área de 240 mil hectares (AGRIANUAL, 2012).

No Brasil, praticamente toda a produção de banana é consumida in natura e o seu cultivo tem papel fundamental na fixação da mão-de-obra rural. A banana constitui elemento importante na alimentação de populações de baixa renda, não só pelo alto valor nutritivo, mas também pelo baixo custo. Além do elevado valor nutritivo, a banana tem alto significado socioeconômico, pois mobiliza um grande contingente de mão-de-obra, permite retorno rápido ao produtor e é geradora de divisas para o País (GANGA, 2002).

Segundo Moreira (1999), as bananeiras existem no Brasil desde antes do seu descobrimento. Quando Pedro Álvares Cabral aqui chegou, encontraram os nativos comendo in natura bananas de uma cultivar muito digestiva que se supõe tratar-se da ‘Branca’ e outra, rica em amido, que precisava ser cozido antes do consumo, chamada de ‘Pacoba’ que deve ser a cultivar Pacovan. A palavra pacoba, em guarani, significa banana. Com o decorrer do tempo, verificou-se que a ‘Branca’ predominava na Região Litorânea e a ‘Pacovan’, na Amazônica.

Conforme a sistemática botânica de classificação hierárquica, as bananeiras produtoras de frutos comestíveis são plantas de classe das Monocotiledôneas, ordem *Scitaminales*, família *Musacea*, onde se encontram as subfamílias *Heliconioideae*, *Strelitzioideae* e *Musoideae*. Esta última inclui, além do gênero *Ensete*, o gênero *Musa*, constituído por quatro séries ou seções: *Australimusa*, *Callimusa*, *Rhodochlamys* e *(Eu-) Musa* (SIMMONDS, 1973). Dentro do gênero *Musa* existem no mínimo duas espécies, *M. ingens* ( $2n=14$ ) e *M. beccarii* ( $2n=18$ ), que não são classificáveis nestas seções. A separação entre *(Eu-) Musa* e *Rhodochlamys* é artificial e não reflete bem os graus de isolamento reprodutivo (Shepherd, 1990). A seção *(Eu-) Musa* é a mais importante, pois, além de ser formada pelo maior número de espécies do gênero, apresenta ampla distribuição geográfica e abrange as espécies de bananas comestíveis (ALVES, 1999).

A bananeira é uma planta herbácea, apresentando raiz, caule, folhas, flores, frutos e sementes (Figura 9). O caule é representado pelo rizoma e o conjunto de bainhas das folhas de pseudocaule. O pseudocaule termina com uma copa de folhas longas e largas com nervura central bem definida. O pseudocaule apresenta uma coloração externa verde, no entanto esta coloração pode variar a depender do genótipo e de sua origem (SOUZA, 1999).

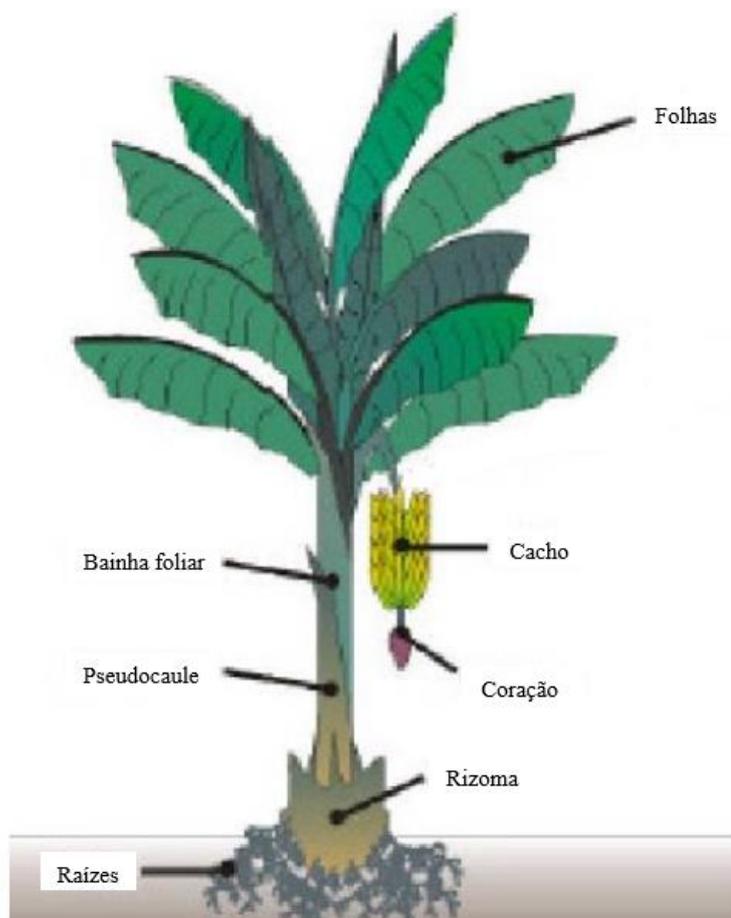


Figura 9 – Esquema da estrutura da bananeira.  
 Fonte: (SOUZA, 1999)

Após a colheita, o pseudocaule da bananeira é cortado e enviado para descarte, tornando-se, na maioria das vezes, um incômodo para os produtores (BITTENCOURT, 2002). Não existe ainda um aproveitamento comercial em larga escala para a fibra do pseudocaule da bananeira, embora seja uma fibra historicamente utilizada para a fabricação de arreios e outros artefatos utilizados na lavoura.

Para diminuir os efeitos da sazonalidade da produção, a extração da fibra do pseudocaule surgiu como uma alternativa para os agricultores de emprego e renda complementar. A fibra de bananeira, com texturas diferentes (capa, seda, renda, fio) possui assim diversas aplicações. Resultado do descarte do cacho de bananas, o pseudocaule da bananeira é aproveitado, possibilitando alternativas de uso em artesanatos e compósitos com polímeros podendo substituir outros materiais coletados na mata atlântica (CORDIOLI, 2008).

Por ser de fácil cultivo em países tropicais, são nesses países que as fibras de bananeira se destacam. Após oferecer o fruto, o pseudocaule pode proliferar fungos de complicado controle de tratamento, devido à alta umidade incidente nas plantações. Portanto, a extração do pseudocaule das bananeiras torna-se uma alternativa de renda conveniente para a mão-de-obra

rural, além de poder ser uma opção viável para confecção de artesanatos e reforço e resinas termoplásticas (BALZER et. al., 2007).

Para que as fibras apresentem melhor qualidade, os pseudocaules devem ser oriundos de terrenos secos e extraídos de plantas saudáveis e com troncos robustos. Outro fator que tem influência na qualidade da fibra é a colheita, que deve ser realizada em clima seco e na hora mais quente do dia para que a evaporação da umidade ocorra com maior facilidade (MERLINI, 2011).

## 2.5 PARTÍCULAS MINERAIS

As partículas minerais são substâncias inorgânicas compostas por grãos muito pouco flexíveis que são incorporados à massa de polímero (LIMA, 2007).

As partículas minerais são produzidas por empresas de mineração que as extraem de jazidas minerais, beneficiam e acondicionam em embalagens adequadas ao mercado consumidor (sacos de 20 a 50 kg). Partículas mineral é o termo empregado para definir o uso de determinados pós-minerais em misturas com polímeros (LIMA, 2007).

As partículas minerais são usadas principalmente para substituir parte da resina e das fibras de vidro e assim reduzir o custo do produto final. A aplicação de partículas mineral no processo de transformação de compósitos de resina poliéster e fibra de vidro, é uma prática muito utilizada (ELEKEIROZ, 2004).

De um modo geral a resistência mecânica e, em alguns casos, o módulo de elasticidade aumentam, sendo que a deformabilidade e a tenacidade diminuem com a redução do tamanho da partícula. O conhecimento da distribuição granulométrica das partículas é de vital importância, pois partículas maiores aumentam a resistência a abrasão, mas por outro lado tem efeitos adversos na deformabilidade e falha do material. Com isso pode-se dizer que a concentração de tensões no compósito aumenta com o aumento do tamanho da partícula (DALPIAZ, 2006).

Normalmente as partículas minerais são produzidas com controle de tamanho e geometria. Podem ser classificadas como bidimensionais (talco e mica) e tridimensionais (calcário e caulim). As partículas bidimensionais tendem a formar compósitos com alto grau de anisotropia, pela possível orientação das cargas no sentido do fluxo do polímero fundido. Quanto menor for o tamanho da partícula, maior será a área superficial da partícula e, conseqüentemente, a quantidade de interfaces polímero/carga também aumenta. Espera-se uma melhora nas propriedades mecânicas com o aumento desses pontos de adesão. Por outro lado,

quanto maior a área superficial maior será a dificuldade de dispersão na matriz ou o controle da viscosidade no processamento (RABELLO, 2000).

De acordo com Dalpiaz (2006), as partículas minerais podem se dividir em quatro categorias quanto a sua forma (Figura 10):

- Partículas esféricas;
- Partículas granulares (cubos, paralelepípedos, forma irregular);
- Partículas lamelares (plaquetas, lamelas);
- Partículas fibrilares ou aciculares (fibras, bastonetes).

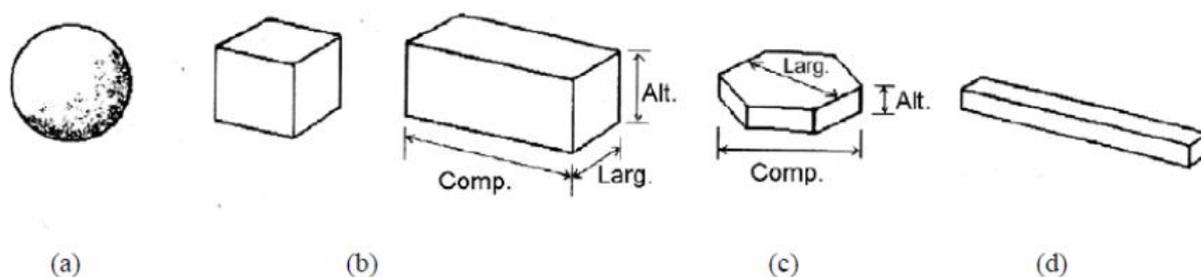


Figura 10 – Principais formas das partículas: a) esféricas; b) granulares; c) lamelares; d) fibrilares ou aciculares.

Fonte: (DALPIAZ, 2006)

O critério mais usado para definir a forma das partículas é o fator de forma. Uma forma de definir o fator de forma é a relação entre a maior e a menor dimensão da partícula. Como exemplo tem-se as fibras, na qual o fator de forma seria a relação comprimento/diâmetro da fibra. Para plaquetas, seria a relação comprimento/espessura das lamelas, enquanto que para esferas o fator de forma seria o menor possível e igual a 1. Compósitos carregados com partículas esféricas são isotrópicos, ou seja, as propriedades mecânicas independem da direção da solicitação. Já para compósitos carregados com partículas lamelares ou fibrilares, as propriedades mecânicas dependem da direção da solicitação e por isso o material é dito anisotrópico (MURPHY, 2001).

No caso de partículas esféricas, como as esferas de vidro, ou quase esféricas, como o carbonato de cálcio, o tamanho da partícula é definido pelo diâmetro. No caso de partículas lamelares ou fibrilares, como o caulim e o talco, é necessário estabelecer critérios de cálculo do diâmetro equivalente. Cabe salientar ainda que as cargas minerais correspondem a uma população de partículas de tamanho variável. Sendo assim o termo “tamanho” somente será correto em se tratando de partículas em uma população monodispersa. Alguns autores usam, para caracterizar o tamanho da população de partículas o diâmetro mediano ( $D_{50}$ ), que é

definido como sendo a dimensão onde a metade da massa da população é inferior a um determinado diâmetro (DALPIAZ, 2006).

As partículas são adicionadas ao compósito com objetivo de reduzir custo e/ou alterar uma ou mais propriedades do mesmo. Para 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 a redução da resistência mecânica dos compósitos (CASARIL, 2004).

### 2.5.1 Processo de beneficiamento do cobre

De acordo com Silva (2010), a calcosita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) possui 79,3% de cobre e a calcopirite ( $\text{CuFeS}_2$ ) com 34,5% de cobre que é extraído por ustulação. No relato de Ribeiro (2011), o cobre em estado puro, denominado cobre nativo, raramente é encontrado na natureza. Normalmente estão associados a outros elementos químicos em várias formas estruturais, proporções estequiométricas e combinações químicas, formando diversos minerais. Existem dois grupos de minerais: os primários ou sulfetados, ocorrentes em zonas mais profundas da crosta terrestre, com mais alto teor em cobre, e os oxidados ou secundários, de origem mais superficial, de menor teor em cobre.

Conforme descrição do Braga (2010), as etapas fundamentais de extração do cobre são: beneficiamento, que consiste na separação do minério concentrado (composto de cobre) do minério sem valor comercial (ganga); redução que objetiva a extração do cobre a partir do minério concentrado com utilização de processo pirometalúrgico; e refino, etapa onde as impurezas são retiradas obtendo-se o cobre puro.

- **Beneficiamento:** de acordo com Rath e Kalache (1997), “a indústria de transformação do cobre tem início a partir do minério, cuja extração se dá a céu aberto ou em galerias subterrâneas. Com um teor metálico que varia normalmente entre 0,7% e 2,5%, o minério é submetido à britagem, moagem, flotação e secagem, obtendo-se o concentrado cujo teor de cobre contido já alcança 30%”. A Figura 11 descreve esta etapa.

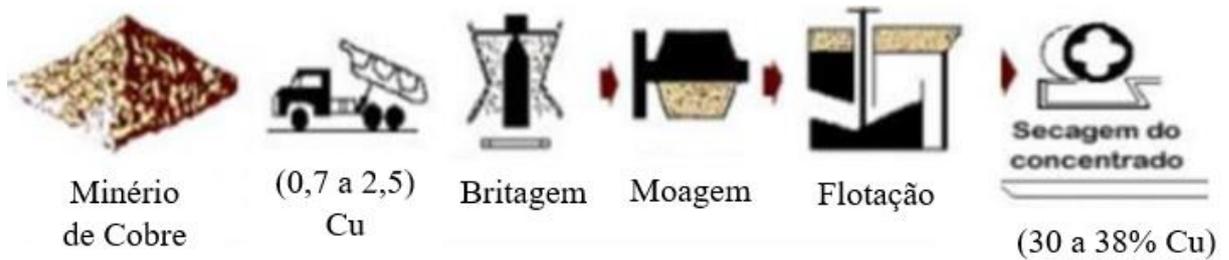


Figura 11 – Etapa de beneficiamento de cobre.  
Fonte: (RATH e KALACHE, 1997)

- **Redução:** ainda conforme Rath e Kalache (1997), o concentrado é então submetido ao forno flash, de onde sai o mate com teor de 45% a 60%, e este ao forno conversor de onde se obtêm o blister com 98,5% de cobre. A Figura 12 apresenta esta etapa.

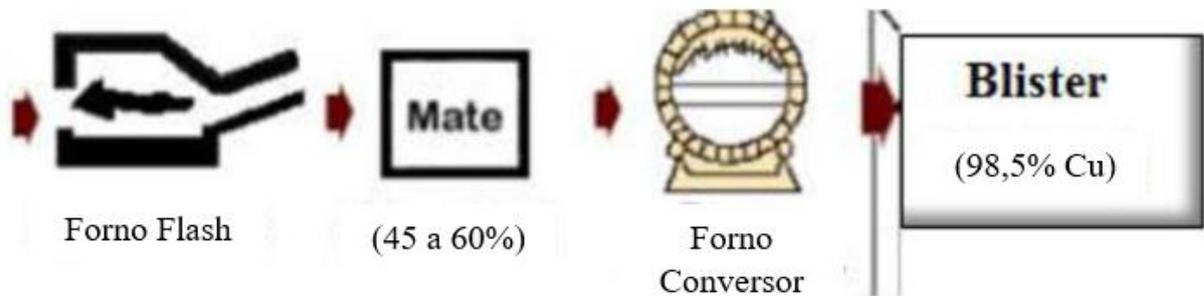


Figura 12 – Etapa de redução do cobre.  
Fonte: (RATH e KALACHE, 1997)

- **Refino:** dependendo da pureza desejável para o cobre, tendo em vista a sua utilização final, o blister pode ser submetido apenas ao refino à fogo, onde se obtém cobre com 99,7% (ânodo) ou pode ser também refinado eletroliticamente, atingindo um grau de pureza de 99,9% (cátodo) (RATH; KALACHE, 1997). A Figura 13 demonstra esta etapa.

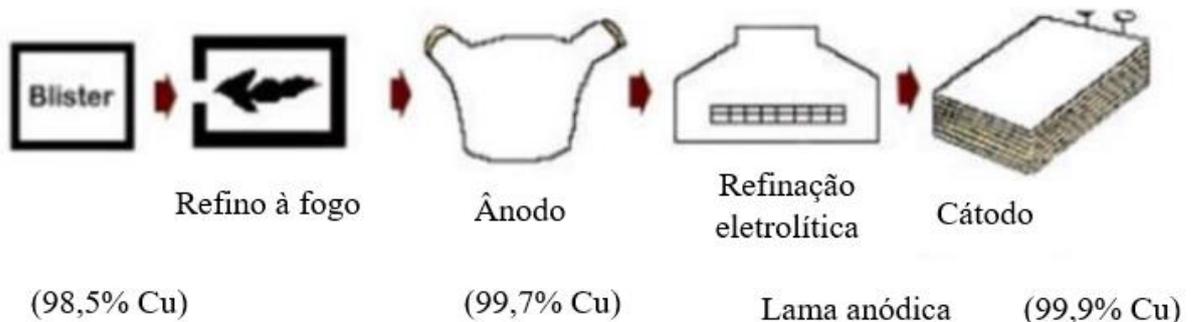


Figura 13 – Etapa refino do cobre.  
Fonte: (RATH e KALACHE, 1997)

Terminada a fase do refino, segue-se mais uma etapa integrante do processo, a de Conformação. Nesta, os catodos são submetidos ao processo de refusão para obtenção do cobre no formato de tarugos ou placas. A partir da trefilação destes tarugos, produzem-se os semielaborados de cobre nas formas de barras, perfis e tubos e através da laminação das placas, são produzidos semielaborados nos formatos de tiras, chapas e arames. Se, entretanto, ao invés da simples refusão o catodo for fundido e laminado em processo contínuo obtém-se o vergalhão, a partir do qual serão fabricados os fios e cabos (RATH e KALACHE, 1997). A Figura 14 mostra esta etapa.

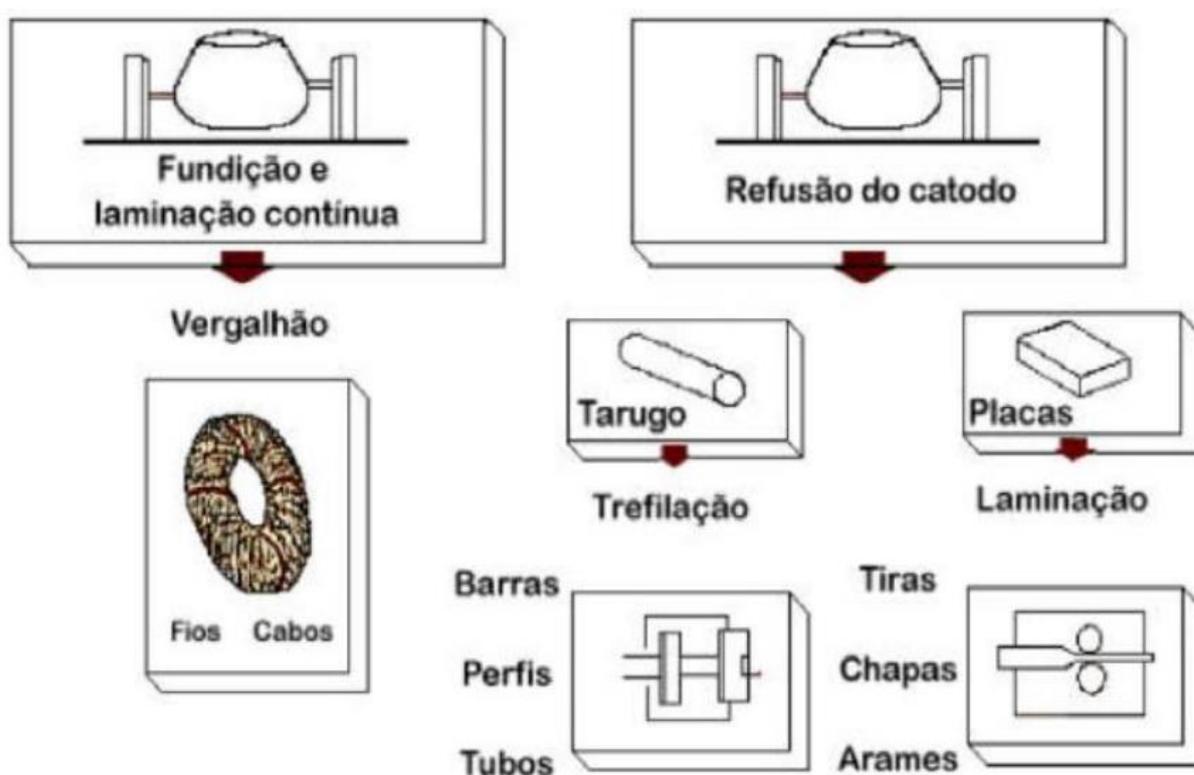


Figura 14 – Etapa de conformação.  
Fonte: (RATH e KALACHE, 1997)

### 2.5.1.1 Resíduo de cobre

Um resíduo de composição semelhante e rico em sílico-aluminatos é proveniente da indústria de beneficiamento de minério sulfetado 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 (SOUZA, 2010).

O resíduo 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. O Quadro 1 mostra a quantificação da composição deste resíduo.

Quadro 1 – Composição química do resíduo do beneficiamento de cobre.

<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>
SiO <sub>2</sub>	57,6	Na <sub>2</sub> O	2,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,0	K <sub>2</sub> O	1,69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,7	TiO <sub>2</sub>	0,42
MgO	4,1	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,77
CaO	4,37	MnO	0,04

Fonte: (SOUZA, 2010)

Vários estudos foram realizados, partindo de cobre como matéria-prima na fabricação de concreto para ser aplicado diretamente à utilização destes resíduos; alguns destes para a utilização de resíduo do beneficiamento na construção civil. (SOUZA, 2010). A Figura 15 mostra resíduo do beneficiamento de cobre a céu aberto.



Figura 15 – Resíduos da atividade de Mineração.

Fonte: (RIBEIRO, 2011)

## 2.6 MATERIAIS HÍBRIDOS

De acordo com Callister Jr. (2007), compósitos híbridos são formados pela utilização de mais de um tipo de fibra de reforço e/ou mais de um tipo de matriz, ou seja, os materiais compósitos híbridos apresentam na sua estrutura, combinações de vários tipos de reforços, mesclando fibras e partículas no mesmo material ou ainda combinando mais de um tipo de fibra ou de partícula no mesmo material. Quando existem dois tipos de reforço na mesma matriz,

partícula e fibra, este tipo de compósito passa ser classificado como composto híbrido (TSAI e CHENG, 2009).

Materiais compósitos híbridos são materiais que apresentam dois ou mais tipos de reforços diferentes no compósito em geral. A hibridização pode ocorrer tanto no mesmo tecido, possuindo este o urdume de uma fibra e a trama de outra, ou variando uma mecha do urdume de uma fibra e a outra mecha de outra, pode ocorrer em mantas de fibras de curtas, da mesma maneira que pode ocorrer em relação às camadas do laminado, intercalando entre as camadas de um reforço outro reforço diferente, ou variando o tipo de material particulado no mesmo (SILVA, 2012).

A hibridização pode ocorrer levando-se em conta vários fatores como por exemplo: diminuição de custo final do compósito, proteção de um reforço em especial, melhoramento das propriedades mecânicas em determinada direção de aplicação de esforço, diminuição da taxa de absorção de umidade, dentre outros (DANTAS, 2011).

De acordo com Cao e Cameron (2006), uma alternativa para melhorar o desempenho dos compósitos é a inserção de uma segunda fase reforçadora, além da fase laminada. A fabricação de compósitos híbridos de matriz polimérica reforçada com fibras e cargas minerais têm se tornado cada vez mais populares devido à melhoria das propriedades mecânicas alcançadas.

## 2.7 MATERIAIS COMPÓSITOS PARTICULADOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS

Compósitos híbridos são formados pela utilização de mais de um tipo de fibra de reforço e/ou mais de um tipo de matriz, ou seja, os materiais compósitos híbridos apresentam na sua estrutura, combinações de vários tipos de reforços, mesclando fibras e partículas no mesmo material (CALLISTER JR., 2008).

Silva e Cruz (2014) utilizando fibras in natura de bananeira híbrida como reforço, alcançaram valores de 29,50 ( $\pm 4,93$ ) MPa de resistência à tração, a fração mássica foi a mesma em todos os compósitos fabricados, a diferença se deu nas camadas de onde as fibras foram extraídas, apresentando também um aumento na força média para ruptura dos compósitos das camadas externas até a interna.

Gildo (2013) estudou compósitos reforçados por fibras in natura de sisal, variando comprimento da fibra em 5, 10 e 15 mm e diferentes frações mássicas para cada comprimento de fibra. Nos compósitos reforçados pelas fibras com 5 mm de comprimento, os melhores

resultados obtidos foram 22,23 ( $\pm 3,69$ ) MPa em resistência à tração para 5,41 % de fração mássica, para os compósitos com fibras de 10 mm de comprimento os maiores valores alcançados foram 27,73 ( $\pm 1,97$ ) MPa em resistência à tração, com 6,87 % em fração mássica, já nos compósitos reforçados com fibras de 15 mm de comprimento os resultados alcançados foram de 28,64 ( $\pm 1,57$ ) MPa em resistência à tração com fração mássica de 1,90% em fração mássica.

Segundo Margem (2013) a chave do sucesso da aplicabilidade em termos de performance das propriedades finais dos compósitos são, dependentes da adesão, do tipo de matriz e da interface entre a fibra natural e a matriz contínua.

Venkateshw et. al. (2011) estudaram compósitos puros e híbridos de matriz epóxi com fibras de banana/ sisal de comprimento de 15 mm, foram encontrados os resultados para o compósito de banana puro no ensaio de tração 16,2 MPa, para ensaio de flexão 57,33 MPa e para ensaio de impacto 13,25 J/m<sup>2</sup>. Para o compósito de sisal puro a tração foi de 21,20 MPa, a flexão de 62,04 MPa e o impacto de 22,54 J/m<sup>2</sup>. Já para os híbridos banana/ sisal apresentaram na razão (75/25) a tração de 17,39 MPa, a flexão de 58,50 MPa e o impacto de 15,57 J/m<sup>2</sup>. O híbrido banana/ sisal na razão (50/50) a tração foi de 18,66 MPa, a flexão de 59,68 MPa e impacto de 17,90 J/m. O híbrido banana/ sisal na razão (25/75) a tração foi de 19,93 MPa, a flexão de 60,86 MPa e o impacto de 20,22 J/m<sup>2</sup>. Este estudo mostrou que a adição da fibra de sisal em banana no compósito epóxi de até 50% em peso resultou no aumento das propriedades mecânicas dos mesmos.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Materiais Poliméricos

Para a produção do compósito, objeto desta pesquisa, foi utilizado para formação da matriz material ligante descrito pelo fabricante Aerojet Fiberglass/AM 190 como resina poliéster insaturada do tipo isoftálica de média reatividade, baixa viscosidade e amarelada, promovida/acelerada com cobalto (0,5%), líquido brilhante de cor azul da mesma empresa. Foi utilizado como iniciador de cura Butanox BB de Peróxido de Metil Etil Cetona com sinônimo de MEK-P (1,5%) da Empresa (Aerojet Brasileira de Fiberglass Ltda). O Quadro 2 ilustra as especificações da resina citada.

Quadro 2 – Características da resina isoftálica insaturada

Viscosidade Brookfield a 25°C	I-CQ-02	(cP)	500-600
Gel Time a 25°C	I-CQ-03	min:seg	6-8
Intervalo Simples	I-CQ-03	min:seg	5-9
Pico Exotérmico	I-CQ-03	°C	180-200
Índice de Acidez	I-CQ-04	(mg KOH/g)	Máximo 15
Teor de Sólidos	I-CQ-01	%	59-63
Densidade a 25°C	I-CQ-16	g/cm <sup>3</sup>	1,10-1,15

Fonte: (autoria própria adaptado de AEROJET, 2016)

A Figura 16 apresenta respectivamente os produtos utilizados na preparação da matriz do compósito.



Figura 16 – Preparação do compósito: a) Resina poliéster insaturada; b) cobalto (acelerador); c) Iniciador MEK-P.

### 3.1.2 Resíduo mineral

O resíduo mineral utilizado no trabalho foi o resíduo de flotação oriundo do processo de beneficiamento do minério de cobre (Figura 17) doado pela empresa Vale localizada na cidade de Canaã dos Carajás - PA, Indústria de Extração e Beneficiamento de Minérios. O material de resíduo foi armazenado, devidamente identificado e conduzido ao laboratório de Engenharia Mecânica (LABMEC) da UFPA/Campus Tucuruí para realização dos estudos.



Figura 17 – Resíduo de flotação do processo de beneficiamento do minério de cobre.

### 3.1.3 Fibra de bananeira

As bananeiras utilizadas neste trabalho, do tipo banana prata, foram doadas pela empresa Eletrobras/ Eletronorte localizada no município de Tucuruí, estado do Pará (PA). O pseudocaule da bananeira foi estrategicamente cortado em comprimentos aproximados de 1,5 m, tomando cuidado para não cortar muito próximo a raiz e nem muito próximo às folhas. O pseudocaule é formado pela sobreposição de bainhas foliares (camada), onde cada pseudocaule é composto por aproximadamente 15 bainhas em condições de uso para a produção de fibras (Figura 18).

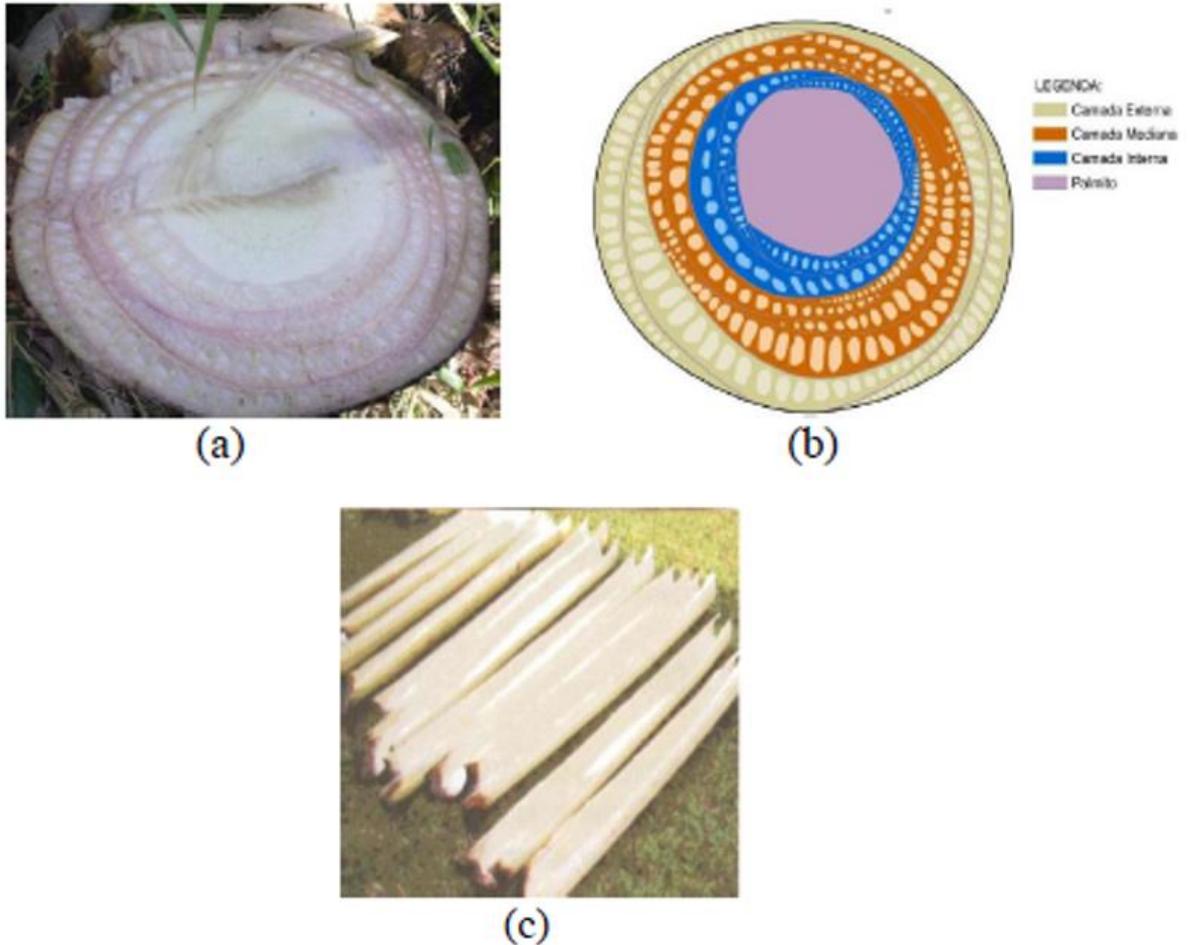


Figura 18 – Bananeira: a) corte do pseudocaule da bananeira; b) esquema ilustrativo das bainhas foliares do pseudocaule; c) separação das bainhas para extração das fibras.

Após a separação das bainhas, deu-se início ao processo de extração das fibras. O processo foi feito através da utilização de uma máquina universal de extração de fibras (Figura 19), projetada e construída no laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA/Campus Tucuruí.

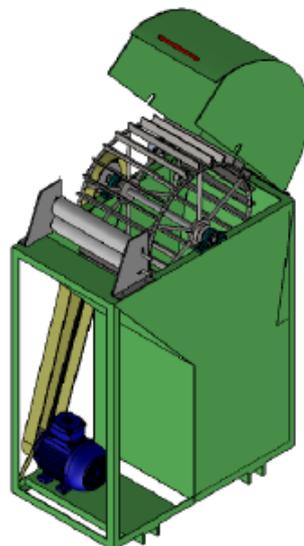


Figura 19 – Máquina de extração de fibras

Realizada a extração das fibras, estas foram colocadas em um recipiente com água para eliminar os possíveis resíduos superficiais oriundo da extração e logo em seguida levadas para secar (Figura 20). As fibras foram secas ao sol em temperatura ambiente. Logo após, as fibras foram armazenadas dentro de um recipiente para serem futuramente utilizadas para servirem de reforço neste trabalho.



Figura 20 – Limpeza e armazenamento das fibras extraídas.

## 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 3.2.1 Caracterização das fibras de bananeira

Foram realizados ensaios físicos, mecânicos, químicos e microestruturais como forma de caracterização das fibras da bananeira, além da caracterização anatômica.

#### 3.2.1.1 Caracterização anatômica das fibras de bananeira

Inicialmente foi realizado um estudo quantitativo das fibras de bananeira quanto a sua caracterização anatômica, na qual foram observadas lâminas histológicas semipermanentes de material macerado para mensuração das variáveis “diâmetro total da fibra”, “diâmetro do lúmen” e “espessura da parede”. Na ausência de norma específica para as monocotiledôneas, a classificação anatômica das fibras foi realizada conforme a norma da International Association of Wood Anatomists (IAWA COMMITTEE, 1989) para as espessuras das fibras e suas paredes.

Foram retiradas uma amostra das fibras, no plano longitudinal, secas ao ar livre para o preparo de material macerado. As amostras foram armazenadas em recipiente de vidro, com capacidade de 20 ml, contendo 10 ml de uma solução macerante de ácido acético e peróxido de hidrogênio na proporção de 1:1 (v/v). O recipiente foi fechado e acondicionado por 72 horas em estufa à temperatura de 60°C, para dissolução da lignina, desagregando-se assim os

elementos anatômicos. Após a dissolução da lignina e, conseqüente branqueamento do material, o mesmo foi retirado da estufa e lavado abundantemente em água corrente.

O macerado foi armazenado no recipiente de vidro, em água destilada e, com o intuito de melhor visualizar os elementos que foram dissociados, foram adicionadas 3 gotas de safranina hidro-alcoólica 1% (v/v). A partir dos valores de diâmetro total e diâmetro do lúmen das fibras, os parâmetros anatômicos “espessura da parede celular”, “fração parede”, “coeficiente de flexibilidade” e “índice de Runkel” foram obtidos. A Figura 21 ilustra um esquema de como foram obtidos esses parâmetros anatômicos.

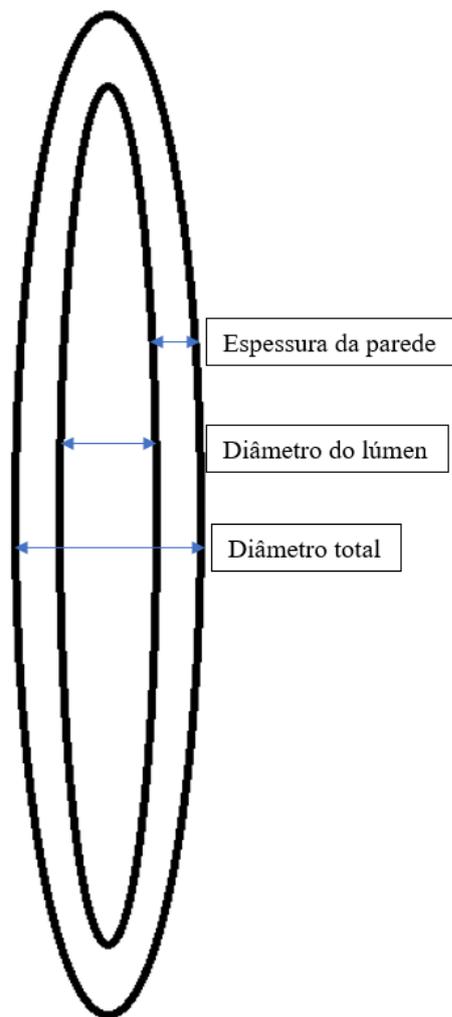


Figura 21 – Esquema ilustrativo dos parâmetros anatômicos.

Na mensuração das fibras, foram obtidas informações relativas ao seu diâmetro total ( $D_t$ ) e diâmetro do lúmen ( $D_l$ ), sendo indiretamente determinada a espessura da parede celular ( $e$ ) pela Equação 6.

$$e = \frac{D_t - D_l}{2} \quad (6)$$

A fração parede (FP) é a razão entre o dobro da espessura da parede celular da fibra e o diâmetro total da fibra (Equação 7).

$$FP(\%) = \left( \frac{2 \times e}{D_t} \right) \times 100 \quad (7)$$

O coeficiente de flexibilidade (CF) é a razão percentual entre o diâmetro do lúmen e o diâmetro total da fibra (Equação 8).

$$CF(\%) = \left( \frac{D_l}{D_t} \right) \times 100 \quad (8)$$

O índice de Runkel (IR) é a razão entre o dobro da espessura da parede celular e a diâmetro do lúmen (Equação 9).

$$IR = \frac{2 \times e}{D_l} \quad (9)$$

As dimensões dos elementos anatômicos foram mensuradas com o auxílio de um microscópio ótico de luz polarizada da marca Leica, modelo DM/LP, modelo 1450 VP, com aumento de 40x. Para as medidas das variáveis “diâmetro total” e “diâmetro do lúmen”, utilizou-se 30 mensurações para camada da fibra de bananeira.

### 3.2.1.2 Caracterização física das fibras de bananeira

Inicialmente com a ajuda de um microscópio ótico, marca LEICA modelo MDR com sistema de aquisição de dados e aumento de 100 vezes (Figura 22-a) foi possível determinar os diâmetros das fibras antes de serem ensaiadas. As fibras vegetais possuem espessuras variáveis, então estas foram consideradas perfeitamente circulares e com diâmetro constante para simplificar a análise e poder determinar os diâmetros aparentes em diferentes locais das fibras. Admitindo-se as fibras como uma seção circular, foram realizadas três medidas ao longo do sentido longitudinal das amostras (Figura 22-b).



Figura 22 – a) Microscópico óptico, marca LEICA modelo MDR; b) Medição microscópica dos diâmetros das fibras da bananeira.

A massa específica das fibras *in natura* foi obtida através de ensaios de picnometria, usando água como não solvente (a fibra não reagirá com a água, ou seja, não haverá a dissolução da fibra), onde a fibra é imersa em água observando-se o volume que é deslocado, segundo a norma NBR NM 52-09. A Figura 23 ilustra as fibras cortadas manualmente no comprimento de 5 mm para a fabricação dos compósitos que foram utilizadas para esse ensaio.



Figura 23 – Fibras de bananeira cortadas para determinação da massa específica.

A umidade das fibras foi avaliada pelo método de secagem das fibras em uma estufa da marca Quimis modelo MD 1.4. A determinação do teor de umidade das fibras foi realizada seguindo os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D 3030-00. A amostra foi submetida à medição de massa inicialmente em intervalos de tempo de 5 em 5 min, durante uma 1h30min, depois deste período foi feita a medição de massa em intervalos de 10 em 10 min, durante 1 h 30 min, e intervalos de 15 em 15 min, durante 5 h, até entrarem em equilíbrio. As fibras foram inicialmente pesadas e secadas até massa constante, determinando-se a absorção da água pela Equação (10),

$$U\% = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (10)$$

Onde ( $U\%$ ) corresponde a absorção percentual de umidade, ( $M_i$ ) a massa inicial antes da secagem e ( $M_f$ ) a massa final após a secagem.

### 3.2.1.3 Caracterização mecânica das fibras de bananeira

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos da marca KRATOS, modelo IKL3, com célula de carga de 5 kN e velocidade de deslocamento de 0,5 mm/min. (Figura 24). Os ensaios foram feitos de acordo com a norma ASTM D3822, visando determinar sua resistência à tração e deformação.



Figura 24 - Máquina de ensaio de tração marca KRATOS modelo IKL3.

Para confecção dos corpos de prova de tração, foram utilizados tabs, seguindo a norma ASTM D 3822, que consistem em um molde de papel, com uma granulometria variando de 120 a 180 g/cm<sup>3</sup>, cuja função é de interligar a fibra com a garra, de tal sorte que a fibra fique posicionada verticalmente no tab (Figura 25). Os tabs de papel KRAFT com as dimensões de 29 mm x 45 mm foram colados com adesivo cianoacrilato nas extremidades do comprimento útil das fibras.

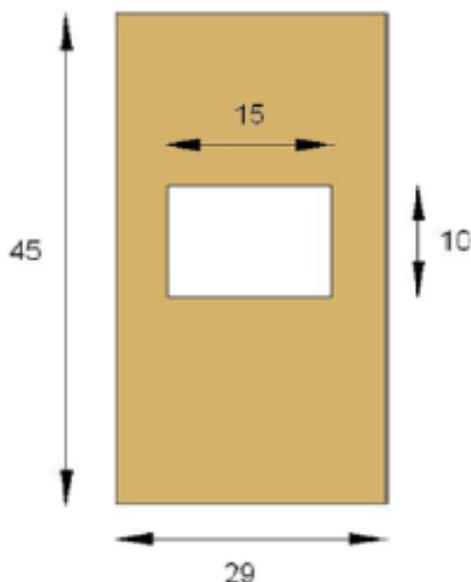


Figura 25 - Esquemática da fabricação dos tabs.

#### 3.2.1.4 Caracterização química das fibras de bananeira

As análises químicas da fibra de bananeira foram realizadas no Laboratório de madeira da Engenharia Florestal na Universidade Estadual do Pará (UEPA), baseando-se nas normas descritas pela Associação Brasileira de Técnicas de Celulose e Papel - ABTCP (1974), adaptadas para fibras. Para tanto foram realizados os ensaios de Teor de Celulose, Teor de Holocelulose, Teor de Hemicelulose e Teor de Lignina.

##### 3.2.1.4.1 Determinação do teor de Lignina

Para determinação do teor de lignina utilizou-se as fibras de bananeiras livre de extrativos e com teor de umidade conhecido. A lignina foi isolada como resíduo utilizando ácido sulfúrico a 50%. Nesse meio os polissacarídeos são hidrolisados em açúcares simples e facilmente removidos por meio de solubilização em solvente aquoso. A lignina, insolúvel neste meio, foi removida por simples filtragem. Para isso, pesou-se 1 grama das amostras de fibras e transferiu-se para um frasco de Erlenmeyer de 100 ml com tampa. Adicionou-se lentamente e sob agitação magnética 15 ml de  $H_2SO_4$  50%. O Erlenmeyer foi tampado e deixado sob agitação magnética por 30 minutos a temperatura ambiente. Em seguida, a solução foi diluída com aproximadamente 600 ml de água destilada. Filtrou-se as fibras (lignina insolúvel) em funil de tecido sintético. As fibras foram colocadas para secagem em estufa a  $100^{\circ}C$  por um dia. O conteúdo de lignina insolúvel foi determinado pela Equação 11,

$$Li = \left(\frac{L}{P}\right) \times 100 \quad (11)$$

Onde Li é o teor de lignina da amostra (%), L é o peso da lignina (g), e a P é a peso de entrada da amostra (g), base seca.

#### 3.2.1.4.2 Determinação do teor de Holocelulose

Para obter quantidade de holocelulose, pesou-se 2 gramas de cada amostra livre de extrativos e a transferiu-se para um becker, adicionando-se 55 ml de água destilada, 10 ml de hipoclorito de sódio (6%) e 7 ml de ácido acético glacial. O material foi então levado a banho-maria a 75°C, onde permaneceu por 30 minutos, sendo agitado periodicamente. Transcorrido esse tempo, filtrou-se a amostra em funil de Gooch (previamente seco e tratado). Este procedimento foi repetido duas vezes, até o aparecimento do resíduo branco. Lavou-se as fibras brancas com cerca de 500 ml água destilada e filtrou-se. O funil, com a fibra de holocelulose, foi levado para uma estufa de secagem e esterilização regulada à 105°C por duas horas para retirar a umidade. Em seguida, transferiu-se o material para um dessecador até adquirir temperatura ambiente. Prosseguiu-se com a verificação do peso em uma balança analítica e posteriormente os cálculos. A Equação 12 determina o teor de Holocelulose,

$$HC = \left(\frac{m_1}{m_2}\right) \times 100 \quad (12)$$

Onde HC é o teor de Holocelulose da amostra (%), m<sub>1</sub> é a massa de Holocelulose, e m<sub>2</sub> é a massa inicial da amostra.

#### 3.2.1.4.3 Determinação do teor de Celulose

Para a determinação do teor de celulose, transferiu-se as fibras da prática de holocelulose para um Erlenmayer e adicionou-se 100 ml de hidróxido de potássio a 15% (fervente). A amostra foi então levada para aquecer em ebulição suave e sob refluxo por 30 minutos. Filtrou-se o material em papel filtro previamente tarado juntamente com o peso-filtro. O filtrado, contendo as poliozes, foi então desprezado e o resíduo de celulose lavada com 100 ml de água destilada quente. Em seguida, a amostra foi transferida com o papel filtro para o pesa-filtro e todo o material foi levado para a estufa de secagem e esterilização regulada à 105°C por duas horas para retirar a umidade, sendo conduzido a um dessecador e depois pesado. Através da Equação 13 determinou-se o teor de Celulose da amostra.

$$Ce = \left(\frac{P_c}{P_i}\right) \times 100 \quad (13)$$

Onde  $C_e$  é o teor de Celulose da amostra (%),  $P_c$  é a massa da celulose encontrada, e  $P_i$  é a massa inicial da amostra.

#### 3.2.1.4.4 Determinação do teor de Hemicelulose

A determinação do teor da hemicelulose foi determinada pela diferença, isto é, considerando a soma da holocelulose menos celulose ser igual à quantidade de hemicelulose (Equação 14).

$$HM = HC - Ce \quad (14)$$

#### 3.2.1.5 Caracterização microestrutural das fibras de bananeira

A microestrutura das fibras foi analisada com auxílio da microscopia eletrônica de varredura (Figura 26) localizada no laboratório de Geociências da Universidade Federal do Pará, adequado para obter imagem de superfície analisada, pois revela com nitidez a topografia, relevos e depressões existentes nas fibras e também das amostras ensaiadas em tração.



Figura 26 - Máquina de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

#### 3.2.2 Caracterização do resíduo mineral

A caracterização do resíduo de flotação do minério de cobre se deu através da análise de massa específica, análise granulométrica, difração de raios-X e análise microestrutural.

### 3.2.2.1 Determinação da massa específica do resíduo de cobre

A determinação da massa específica de carga do resíduo de cobre foi realizada pelo método picnométrico, técnica utilizada para medir a massa específica de sólidos. Norma que fixa os procedimentos que devem ser adotados para esta determinação é a NBR NM 52/2009. Para calcular a massa específica de sólidos, neste trabalho foi utilizada uma amostra de partículas de resíduo do cobre representativa do padrão, baseada no método picnométrico que resulta na Equação (15).

$$d_s = \frac{A_2 - A_1}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad (15)$$

Onde:

$d_s$  = massa específica dos sólidos

$A_1$  = massa do picnômetro

$A_2$  = massa do picnômetro + massa da amostra

$A_3$  = massa do picnômetro + massa da amostra + massa de água

$A_4$  = massa do picnômetro + massa de água

O procedimento usado na quantificação da massa específica de uma rocha, minério ou mineral, descreve, passo a passo, a determinação da massa específica relativa ( $d_s$ ).

- (i) pesar o picnômetro vazio, previamente limpo e seco, em estufa, a 100°C;
- (ii) encher o picnômetro com água até transbordar e pesar o picnômetro com água;
- (iii) a diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água é a massa de água utilizada. Sabendo o volume de água colocada no picnômetro pode-se determinar a massa específica da água ou de outro líquido utilizado;

(iv) adiciona-se a amostra de resíduo de cobre no picnômetro e, em seguida, pesa-se todo o conjunto, obtendo-se o valor de  $A_2$ . A massa da amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com resíduo de cobre e sem resíduo de cobre (vazio), informação obtida no item (i);

(v) a massa de água adicionada ao picnômetro com amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com resíduo de cobre e água ( $A_3$ ) e a massa do picnômetro com resíduo de cobre ( $A_2$ );

(vi) o volume de água adicionado é obtido pela relação entre a massa específica da água (obtida em iii) e a massa de água adicionada no picnômetro (obtida em v);

(vii) o volume do resíduo de cobre é determinado pela diferença entre o volume total do picnômetro e o volume de água adicionada (obtida em vi);

(viii) a massa específica do resíduo de cobre é obtida pela relação entre a massa de resíduo de cobre (obtida em iv) e o volume de resíduo de cobre (obtido em vii).

### **3.2.2.2 Análise granulométrica**

Para realização da análise granulométrica, procedeu-se da seguinte forma: na preparação da polpa foram medidos, separadamente, oitenta gramas (80 g) do resíduo de cobre e unido a estes 80 ml de água destilada. Em seguida, levou-se esta polpa (50%) até a proveta para determinação do volume da mesma sendo este de 109 ml.

Feita a relação de uma gota para 20 ml de polpa, encontrou-se 5,45 gotas para 109 ml. Foi adicionado o equivalente de solução de flocculante, para esse volume de polpa, de aproximadamente 0,27 ml de Hexametáfosfato de sódio a 10%. Após ter sido adicionado o flocculante na polpa, foi colocada no misturador durante quinze minutos (15 min). A análise granulométrica via úmida ocorreu levando a suspensão preparada ao conjunto de peneiras onde o processo levou cerca de trinta minutos (30 min) até a verificação da água na saída do conjunto de peneiras, não apresentando partículas em suspensão.

Após ter sido colocado em estufa, com temperatura de 60°C para retirada da umidade, o resíduo de cobre foi peneirado manualmente perfazendo um total de vinte peneiradas de alimentação, em uma malha com abertura de dimensões definidas pela média. A carga mineral foi graduada em duas diferentes classes de tamanho a partir de peneira circular tipo granutest com número de aberturas de uma mesma dimensão de 48 mesh, contida num comprimento de 25,4 mm de designação série Tyler com diâmetro de 0,3 mm.

A finalidade destes procedimentos é a determinação das dimensões da carga particulada e de suas respectivas porcentagens de ocorrência tanto acumulada retida como acumulada passante com a obtenção do gráfico que expressa a curva em relação ao diâmetro médio.

### **3.2.2.3 Difração de Raios-X (DRX)**

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

Para a análise do resíduo de flotação do minério de cobre foi utilizado um Difratômetro de Raios-X modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60) da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de Raios X cerâmico, de ânodo de Cu ( $K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$ ), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. Foi utilizado filtro  $K\beta$  de Ni. O detector utilizado foi o X'Celerator, do tipo RTMS (Real Time Multiple Scanning), atuando no modo Scanninge com um active length de  $2,122^\circ$ . Foram utilizadas as seguintes condições instrumentais: varredura de  $5^\circ$  a  $75^\circ 2\theta$ , voltagem: 40 kV, corrente: 30 mA, tamanho do passo:  $0,02^\circ 2\theta$  e tempo/passo: 5s, fenda divergente de  $1/2^\circ$  e anti espalhamento de  $1^\circ$ ; Máscara de 10 mm, movimento da amostra: Spinning, com 1 rotação/s.

A aquisição dos dados foi realizada com software X Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com software X Pert High Score versão 2.1b, também da PANalytical, consultando o banco de dados PDF (Powder Diffraction File) do ICDD (International Center for Diffraction Data).

### 3.2.3 Confeção dos corpos de prova dos compósitos

O processo geral da confecção dos corpos de prova inicia-se pelo preparo do compósito e finaliza-se com o corte das placas formando assim, as amostras para os devidos ensaios. A Figura 27 mostra uma síntese do referido processo.



Figura 27 - Síntese do processo de confecção dos corpos de prova.

O compósito de poliéster insaturada isoftálica, com partículas de resíduo de flotação do minério de cobre, reforçados com fibra vegetal de bananeira foram confeccionados na forma de placas retangulares através do método manual de *hand lay-up*, sendo os resíduos com a granulometria de 48 mesh (de acordo com a análise granulométrica) e as fibras foram cortadas manualmente (com tesouras) nos comprimentos 30 mm. Neste processo utilizou-se molde de aço de duas partes tipo macho-fêmea, conforme Figura 28.



Figura 28 - Molde utilizado no experimento: a) macho; b) fêmea.

Inicialmente foram confeccionadas as placas somente com a matriz plena de resina poliéster insaturada, em seguida foram confeccionadas as placas de compósitos poliméricos com o resíduo de flotação do minério de cobre, depois foram confeccionadas as placas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeiras. Na etapa final foram confeccionados os compósitos poliméricos híbridos com adição do resíduo e reforçado com as fibras.

Para as fibras de bananeira de 30 mm, os moldes metálicos foram enchidos com as fibras até o limite de sua capacidade volumétrica, sem pressão ou vibração mecânica, em seguida, foram devidamente pesados e o valor da massa obtida, convertida em fração mássica, foi estabelecido como sendo a referência de incorporação e trabalhabilidade para a confecção dos compósitos (RODRIGUES, 2008). Partindo deste princípio foi fixado a fração mássica da fibra de bananeira variando em 1%, 2% e 3%, respectivamente F1, F2 e F3.

Para confecção das placas de materiais compósitos com os resíduos de flotação do minério de cobre, foi utilizado as proporções em frações mássicas variando de 10 %, 20 %, 30% e 40 % (RC10, RC20, RC30 e RC40, respectivamente). A saturação do resíduo dentro da matriz foi definida como a máxima capacidade dos constituintes apresentarem boa homogeneização, impregnação e molhabilidade do sistema matriz/resíduos/fibras.

Por fim, foram confeccionadas as placas de materiais compósitos híbridos constituídos do resíduo e de fibras, ficando com as seguintes configurações: (Fibra 1% / Resíduo de cobre 10% - F1 RC10), (Fibra 1% / Resíduo de cobre 20% - F1 RC20), (Fibra 2% / Resíduo de cobre 10% - F2 RC10), (Fibra 2% / Resíduo de cobre 20% - F2 RC20), essa foi a máxima configuração alcançada, pois acima disso já ocorre a saturação do compósito dificultando a molhabilidade e trabalhabilidade do processo de confecção.

As placas foram confeccionadas em sextuplicata (6 placas) para cada tipo de constituintes, resultando em um total de 72 (setenta e duas) placas confeccionadas. Cada placa

foi cortada para confecção dos corpos de prova para os ensaios mecânicos, térmicos, físicos, resistência a chama e microestruturais. Com número mínimo de 8 (oito) corpos de prova para cada ensaio realizado conforme recomendações das normas utilizadas.

Seguiram-se alguns procedimentos baseado na quantificação específica dos materiais utilizados para as placas como será descrito. Inicialmente, após pesagem, em um becker, da massa da resina na balança de precisão (Figura 29-a), acrescentou-se à mesma, o acelerador (Figura 28-b) homogeneizando-os por um tempo de trinta segundos após o qual verteu-se a esta associação o iniciador (Figura 29-c) por mais um tempo de trinta segundos.

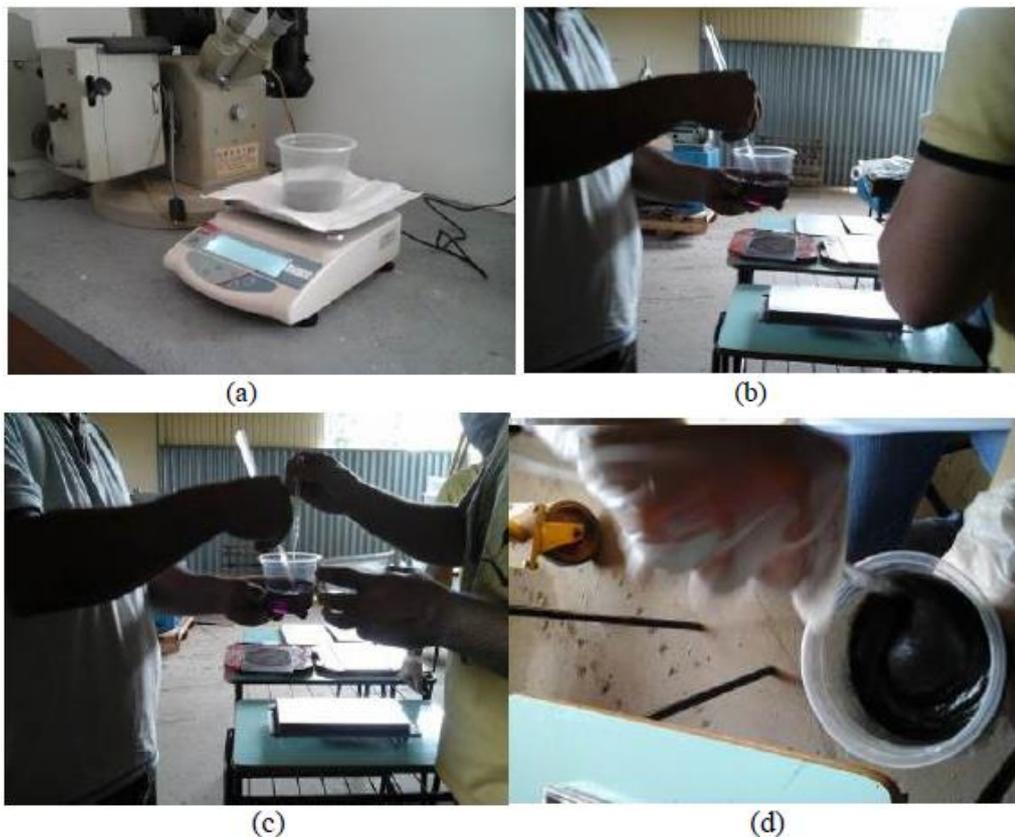


Figura 29 - Preparo da matriz com reforço: a) pesagem resina; b) homogeneização resina/cobalto; c) homogeneização resina/acelerador/iniciador; d) adição do reforço.

Em seguida, se procedeu ao vazamento da mistura no molde a temperatura ambiente, de tal forma a não ultrapassar o tempo de cinco minutos. Este vazamento foi efetuado já com uma película de desmoldante seca no molde. O tempo de gel (material em processo de cura) foi determinado no intervalo de 15 a 20 minutos (Figura 30).

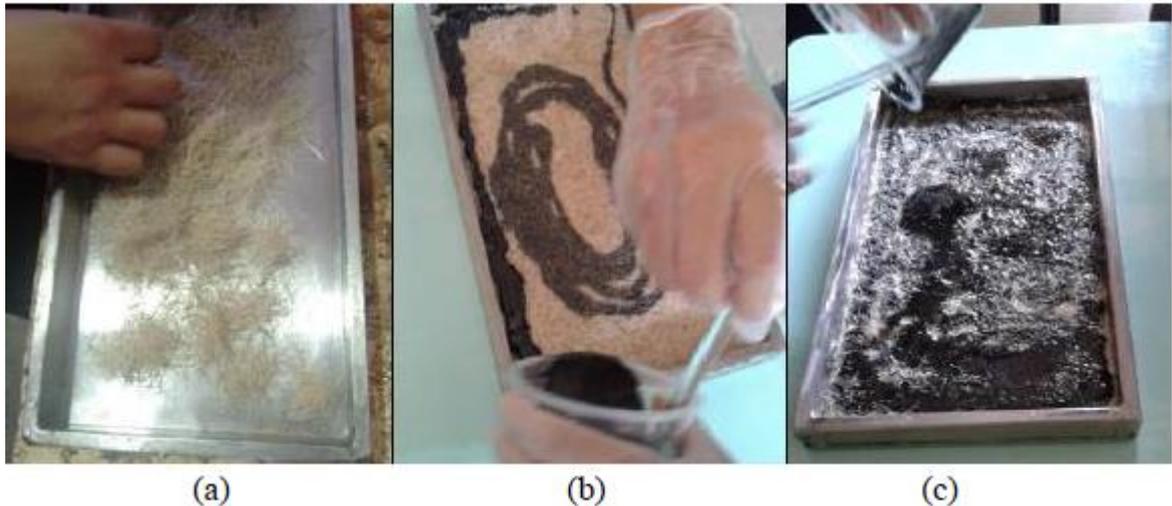


Figura 30 - (a) separação das fibras no molde (b) despejo lateral e central da mistura (c) estado final da mistura

Logo em seguida o molde metálico foi fechado e prensado em uma prensa hidráulica (modelo P10 ST, marca BOVENAU) com carga de 2,5 kN por 30 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.

### 3.2.4 Caracterização dos materiais compósitos confeccionados

#### 3.2.4.1 Ensaio de massa específica aparente (MEA), Absorção de água (AA) e Porosidade aparente (PA)

A massa específica aparente (MEA) pode ser determinada de acordo com a norma NBR 12766, por meio do princípio de Arquimedes. Este princípio afirma que um corpo imerso em um fluido sofre um empuxo igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo corpo. A massa específica do corpo é igual à razão entre seu peso e o empuxo do fluido sobre ele. Desta forma, a massa específica aparente pode ser calculada a partir da Equação 16.

$$MEA = \frac{m_s}{m_u - m_i} \times 100 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (16)$$

Onde,  $m_s$  é a massa seca do corpo de prova,  $m_u$  é a massa úmida do corpo de prova e  $m_i$  é a massa imersa do corpo de prova.

A absorção de água (AA) de um material é dada pelo percentual de água absorvida por um corpo de prova após a imersão, conforme descrito para a determinação da massa específica aparentes. A Equação 17 foi utilizada para o cálculo desta variável.

$$AA = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\%) \quad (17)$$

A porosidade aparente (PA) é a relação entre o volume de poros abertos e o volume externo do corpo de prova. A norma NBR 12766 estabelece o procedimento para a determinação da porosidade aparente por meio do princípio de Arquimedes, assim como para a determinação da massa específica aparente. A Equação 18 estabelece a porosidade aparente em função da medição das massas do corpo de prova seco, saturado e submerso em água.

$$PA = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \times 100 \quad (18)$$

Para execução do ensaio adotaram-se os seguintes procedimentos: inicialmente os corpos de prova foram limpos e colocados em uma estufa para secar durante 24h. Em seguida os corpos de prova foram pesados ao ar individualmente, utilizando uma balança com precisão de 0,01g, anotando assim a massa seca ( $m_s$ ). Feita a pesagem seca, os corpos de prova foram colocados em uma bandeja e adicionado água até 1/3 de sua altura. Após 4 horas foi adicionado água até 2/3 da altura dos corpos de prova, e logo após mais 4 horas foi completado até a submersão dos corpos de prova e deixado até atingir o tempo de 24h. Então os corpos de prova foram retirados da água, enxugados suas superfícies com um pano absorvente e pesado ao ar, anotando a massa úmida ( $m_u$ ). E por fim pesar novamente os corpos de prova individualmente na condição submersa e anotando sua massa imersa ( $m_i$ ).

### **3.2.4.2 Caracterização mecânica dos materiais compósitos**

#### *3.2.4.2.1 Ensaio de tração*

As propriedades mecânicas dos compósitos que podem ser determinadas por meio do ensaio de tração são: resistência uniaxial, módulo de elasticidade e deformação. A resistência e a deformação do material são medidas tomadas no momento da ruptura do corpo de prova. A resistência à tração é medida pelo quociente entre a carga aplicada e a área transversal do corpo de prova, enquanto a deformação representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração. O módulo de elasticidade do compósito é medido pela razão entre a tensão e a

deformação, dentro do regime elástico. Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D3039 e as dimensões usadas são demonstradas esquematicamente na Figura 31.

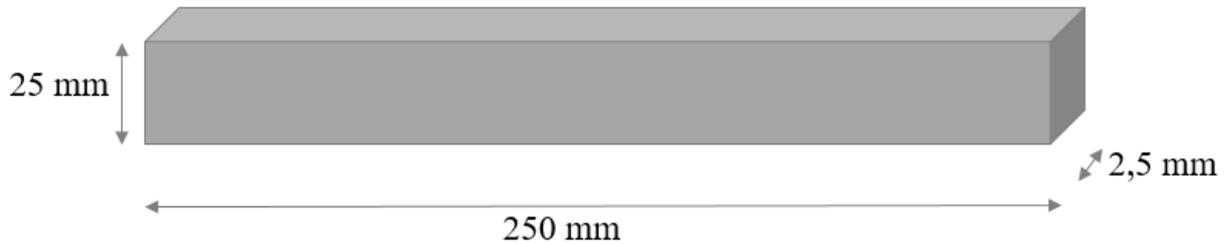


Figura 31 - Dimensões do corpo de prova (ASTM D-3039).

Os testes de tração foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí, em um equipamento de ensaio universal WDW-100 E serial nº 146 EMIC, ano de fabricação: 2006, com célula de carga de 30 kN, utilizou-se a velocidade de deslocamento de 2,00 mm/min, distância entre garras de 180 mm, temperatura de 26°C e umidade relativa do ar de 50% (Figura 32).



Figura 32 – Máquina de ensaio de tração.

#### 3.2.4.1.2 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão permite a determinação da resistência à flexão e o módulo de elasticidade sob esforços de flexão. A resistência representa a tensão máxima desenvolvida nos reforços externos de uma barra sujeita a dobramento, no momento de sua quebra. No ensaio de

flexão, as configurações de carregamento podem ser três pontos ou quatro pontos. A norma ASTM D790 (2007) descreve o ensaio de flexão para materiais plásticos reforçados e não reforçados. Inicialmente as placas foram marcadas com os valores das dimensões dos corpos de provas. O comprimento do corpo para testes foi de 127 mm com largura de 12,7 mm e espessura de 3,2 mm (Figura 33).

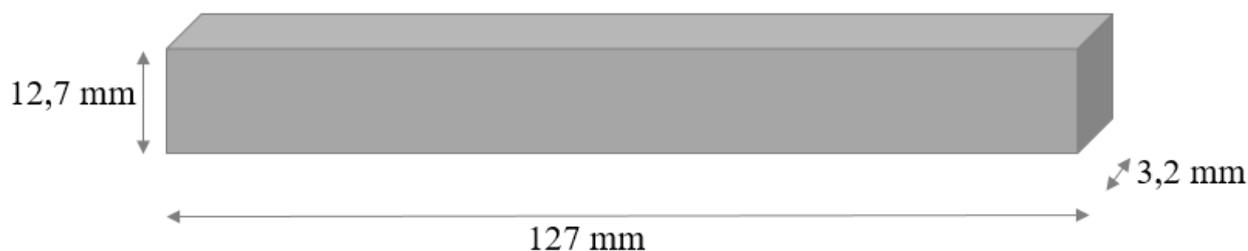


Figura 33 - Dimensões do corpo de prova (ASTM D-790).

O ensaio de flexão foi realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará Campus Tucuruí, especificamente no laboratório de Materiais. Para ensaio de flexão foi usada a máquina universal de ensaios mecânicos (modelo/WDW-100E), equipada com dispositivo para ensaio de flexão em três pontos (Figura 34).

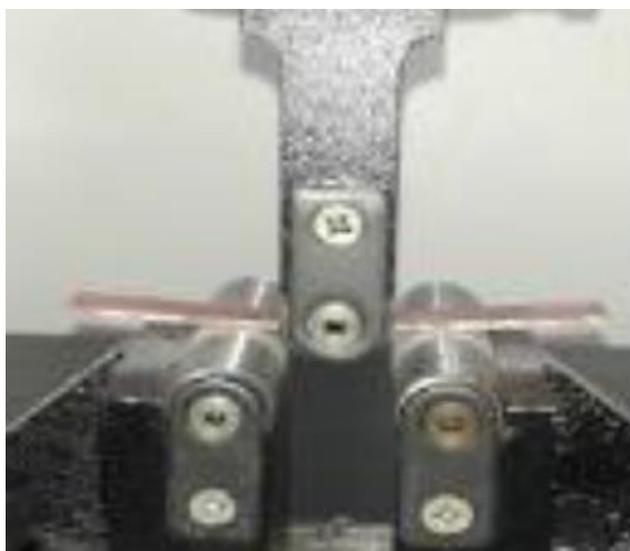


Figura 34 - Máquina de ensaio universal para flexão em três pontos.

#### 3.2.4.2.3 Ensaio de impacto Charpy

O ensaio de impacto são testes de fratura em alta velocidade que mede a energia para romper a amostra. No teste de impacto Charpy, um pêndulo com um peso é jogado contra a amostra (com entalhe ou não) e a energia necessária para romper a amostra é determinada

através da perda de energia cinética do pêndulo. Os ensaios de impacto charpy sem entalhe deste trabalho foram realizados conforme os procedimentos da norma ASTM 6110-04 com as dimensões de acordo com demonstrado esquematicamente na Figura 35.

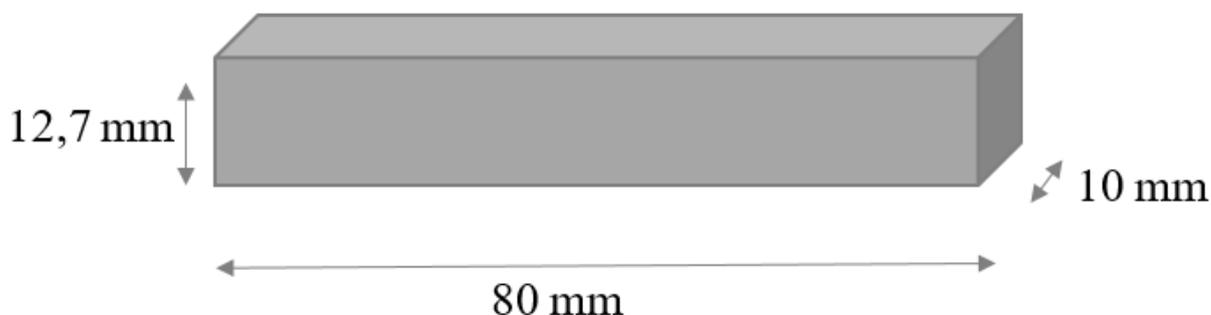


Figura 35 - Dimensões do corpo de prova (ASTM D-6110-04).

### 3.2.4.3 Teste de flamabilidade dos materiais compósitos

O teste de flamabilidade foi realizado de acordo com a norma UL (“Underwriter’s Laboratory”) 94, que avalia o comportamento perante o fogo de materiais plásticos.

#### 3.2.4.3.1 Ensaio de flamabilidade horizontal

Para o ensaio de flamabilidade horizontal foram ensaiados 3 (três) corpos de prova, onde cada amostra foi marcada com duas linhas perpendiculares ao eixo longitudinal da barra, de  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  e  $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  a partir da extremidade que é para ser inflamado. O corpo de prova é preso na extremidade mais afastada da marca de  $25 \text{ mm}$ , com o seu eixo longitudinal na horizontal e o seu eixo transversal inclinado a  $45 \pm 2$  graus. A gaze de arame foi apertada na horizontal por baixo da amostra, com uma distância de  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  entre a aresta inferior da amostra e da gaze com a extremidade livre do corpo de prova, mesmo com a borda da gaze.

O queimador foi colocado afastado do corpo de prova e inflamado. O queimador foi ajustado para produzir uma chama azul de  $20 \pm 1 \text{ mm}$  de altura. O eixo central do tubo do queimador é para estar no mesmo plano vertical que a borda inferior longitudinal do corpo de prova e inclinada para a extremidade da amostra num ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  em relação à horizontal.

Posicionado o bico queimador de modo que a chama incidisse sobre a extremidade livre do corpo de prova a uma profundidade de  $6 \pm 1 \text{ mm}$ . Então foi aplicada a chama de ensaio durante  $30 \pm 1$  segundos, sem alterar a sua posição; logo após foi removido o queimador, ou

logo que a frente de combustão da amostra atingiu a marca dos 25 mm. Se em menos de 30 segundos à frente de combustão atinge a marca de 25 mm, inicia-se o cronômetro.

Terminado o ensaio e anotado o tempo de queima, pode ser calculado a velocidade de propagação da chama no corpo de prova de acordo com a Equação 19.

$$V = \frac{L}{t} \times 60 \text{ mm/min} \quad (19)$$

Onde V é a velocidade de propagação da chama, L é o comprimento danificado pela queima e t é tempo de queima dos corpos de prova. A Figura 36 ilustra o aparato para o ensaio de flamabilidade horizontal de acordo com a norma.

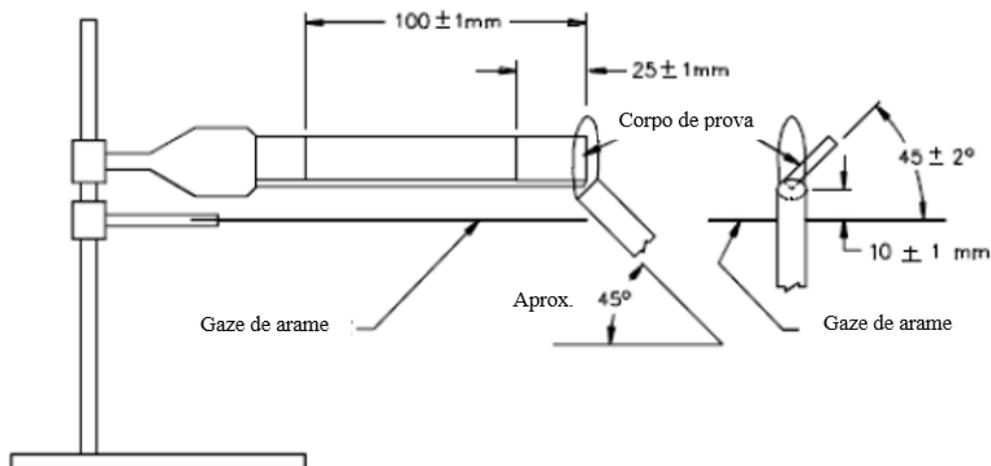


Figura 36 – Esquema para realização do ensaio de flamabilidade horizontal.

Fonte: (UL 94, 1998)

A amostra ensaiada pode ser classificada 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.

### 3.2.4.3.2 Ensaio de flamabilidade vertical

O teste consiste na aplicação de uma chama de 20 mm de altura, a um corpo de prova de 125 mm de comprimento x 13 mm largura x 10 mm espessura, preso verticalmente. Avalia-se o comportamento do material após a aplicação da chama quanto à:

- Propagação da chama;
- Tempo de duração da chama;
- Gotejamento;
- Incandescência.

O material é caracterizado através de três classificações:  $V_0$ ,  $V_1$  e  $V_2$ . Sendo considerado um dos mais importantes testes para avaliar a flamabilidade de plásticos (GACHTER e MÜLLER, 2001).

- Classificação  $V_0$  – quando a soma dos tempos de duração da chama não for superior a 50 segundos e, a camada de algodão não incendiar por gotejamento do material;
- Classificação  $V_1$  – quando a soma dos tempos de combustão não for superior a 250 segundos e sem queima do algodão por gotas ou fagulhas emitidas;
- Classificação  $V_2$  – quando a soma dos tempos de combustão não for superior a 250 segundos, mas a camada de algodão incendeia pelo gotejamento do material.

A Figura 37 ilustra o teste esquemático para o ensaio de queima vertical.

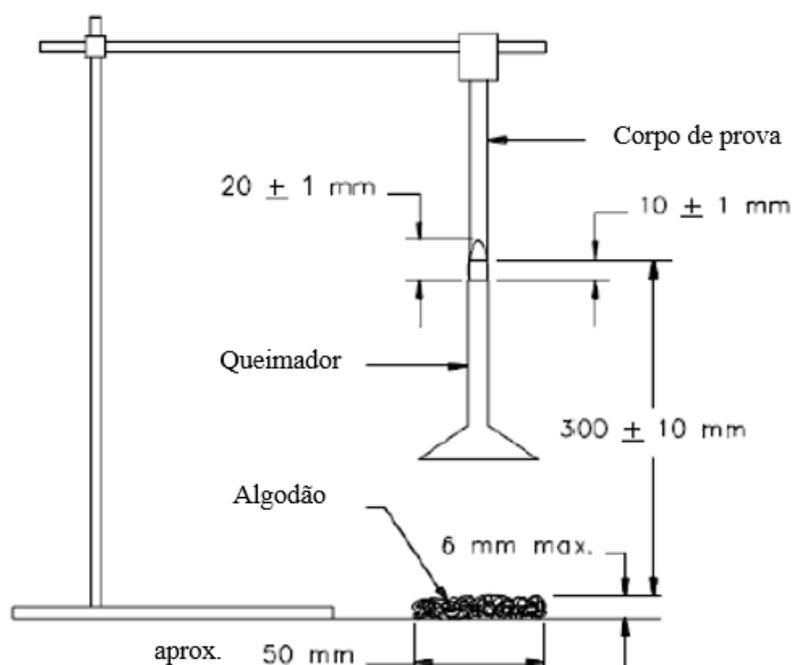


Figura 37 – Teste esquemático para o ensaio de queima vertical.  
Fonte: (UL 94, 1998)

#### **3.2.4.4 Caracterização microestrutural dos materiais compósitos**

Após a realização dos ensaios mecânicos, a superfície de fratura dos corpos de prova foi analisada de forma a se estudar os mecanismos de falha de cada composição fabricada. A morfologia da superfície de fratura foi analisada por microscopia eletrônica de varredura, obedecendo a mesma metodologia de preparação de amostra efetuado para a caracterização microestrutural das fibras e do resíduo.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DA BANANEIRA

##### 4.1.1 Caracterização anatômica das fibras de bananeira

As fibras foram caracterizadas anatomicamente através da determinação da fração de parede, coeficiente de flexibilidade e índice de Runkel. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos durante os ensaios.

Tabela 1 - Resultados da caracterização anatômica das fibras de bananeiras

<b>Fibra de Bananeira</b>	<b>Diâmetro Total <math>D_t</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Diâmetro do lúmen <math>D_l</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Espessura da parede <math>e</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Fração Parede FP (%)</b>	<b>Coefficiente de flexibilidade CF (%)</b>	<b>Índice de Runkel IR</b>
<b>Camada Externa (CE)</b>	9,1	5,1	2,0	43,95	56,04	0,78
<b>Camada Mediana (CM)</b>	8,7	5,56	1,57	36,09	63,91	0,56
<b>Camada Interna (CI)</b>	8,1	5,7	1,2	29,62	70,37	0,42

Iawa (1989) classifica as fibras de dois tipos: fibras libriformes (lúmen  $< 3 \mu\text{m}$  de diâmetro) e fibras fibrotraqueídes (lúmen  $> 3 \mu\text{m}$  de diâmetro). Com base na análise anatômica das camadas das fibras das bananeiras, onde o diâmetro do lúmen para CE, CM e CI foram respectivamente de  $5,1 \mu\text{m}$ ,  $5,56 \mu\text{m}$ ,  $5,7 \mu\text{m}$ , considera-se então que as fibras da bananeira são do tipo fibrotraqueídes.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 1, pode-se verificar inicialmente que as camadas das fibras da bananeira apresentaram um comportamento decrescente quando relacionados a espessura da parede celular ( $\text{CE} > \text{CM} > \text{CI}$ ). Isso de fato acontece, pois durante seu processo de desenvolvimento do vegetal, ocorre o espessamento da parede celular das fibras com o avanço na idade do indivíduo, em função da deposição de material para seu fortalecimento, principalmente de lignina. Ou seja, com o aumento da idade da bananeira, as fibras das regiões que atingem a maturidade apresentarão parede mais espessas.

Para Mainieri e Chimelo (1974) as fibras variam em comprimento, largura e espessura de parede, podendo essa variação ser entre as espécies ou em uma mesma árvore ao longo do seu caule e da medula para a casca. Levando em consideração por exemplo, a espessura da

parede celular, as fibras podem ser classificadas em fibras de parede muito finas (o diâmetro do lúmen é mais que 3 vezes mais largo que o dobro da espessura), em fibras de parede finas a grossas (o lúmen é menos que 3 vezes o dobro da espessura da parede) e em fibras muito grossas (o lúmen da fibra é completamente fechado). Os valores obtidos mostram que as camadas CE, CM e CI tem respectivamente, 2  $\mu\text{m}$ , 1,57  $\mu\text{m}$ , 1,2  $\mu\text{m}$  de espessura da parede celular, sendo assim as fibras de bananeira são classificadas do tipo de finas a grossas, como pode-se verificar o diâmetro do lúmen é menos que 3 vezes o dobro da espessura da parede.

Segundo Foelkel et. al. (1978), o aumento da resistência mecânica da fibra está relacionado com seu coeficiente de flexibilidade, quanto maior seu valor, maior será a flexibilidade da fibra e com isso acarretaria esse aumento. O coeficiente de flexibilidade da CI da fibra de bananeira apresentou o maior valor entre as camadas, demonstrando assim também que, quanto mais jovem for a região próximo ao núcleo mais flexíveis serão suas fibras.

Iawa (1989) também classifica as fibras quanto ao coeficiente de flexibilidade, podendo ser: fibras do tipo de parede celular muito espessa ( $CF < 30\%$ ); fibras de parede celular grossa ( $30\% < CF < 50\%$ ); fibras de parede celular media ( $50\% < CF < 65\%$ ); fibras de parede celular delgada ( $65\% < CF < 80\%$ ); e fibras de parede celular muito delgada ( $CF > 80\%$ ). De acordo com os valores obtidos das camadas das fibras das bananeiras, elas podem ser consideradas do tipo de parede celular media (CE e CM) e parede celular delgada (CI), porém todas apresentam uma boa união fibra/fibra, ajudando assim numa melhor interação da interface fibra/matriz e melhora a acomodação das mesmas na matriz.

Paula e Silva Junior (1994), mostram que a fração de parede indica, percentualmente, a quantidade de celulose, hemicelulose e lignina existentes nas paredes das fibras. Assim sendo, quanto mais espessa for a parede celular, menos vazios e mais componentes químicos estruturais terão as fibras. Junto a isso a fração parede tem como função também determinar o tipo de parede celular e a rigidez da fibra. A partir disso as fibras podem ser classificadas em fibras de parede muito espessa e altíssima rigidez ( $FP > 70\%$ ), em fibras de parede espessa e alta rigidez ( $70\% > FP > 50\%$ ), em fibras de media parede e media rigidez ( $50\% > FP > 35\%$ ), em fibras de parede delgada e baixa rigidez ( $35\% > FP > 20\%$ ) e em fibras de parede muito delgada e baixíssima rigidez ( $FP < 20\%$ ). Os valores obtidos na Tabela 1 ratificam a classificação quanto a parede celular do coeficiente de flexibilidade, na qual para a fração de parede de CE e CM paredes medias e media rigidez, enquanto que para CI obteve-se uma parede celular delgada e baixa rigidez.

Guimarães Junior et. al. (2010), as fibras que possuem valores de fração de parede acima de 60% são consideradas rígidas. Outro fator que confirma o quanto a fibra pode ser rígida é o

índice de Runkel, onde teoricamente ele apresenta o mesmo significado que a fração parede. Um fator diferencial que esse índice apresenta é para produção de papel, pois quanto menor for o índice de Runkel, maior o potencial de ligação entre as fibras dando a elas propriedades excelentes para tal produção.

#### 4.1.2 Caracterização química das fibras da bananeira

As fibras foram caracterizadas quimicamente através da determinação dos teores de lignina, celulose e hemicelulose. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos durante os ensaios comparados com outras fibras vegetais estudadas.

Tabela 2 - Resultados da caracterização química das fibras de bananeiras

<b>Fibra de Bananeira</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>
<b>Camada Externa (CE)</b>	33,0	45,5	32,1
<b>Camada Mediana (CM)</b>	27,8	48,1	16,4
<b>Camada Interna (CI)</b>	27,8	49,8	12,6
<b>Bananeira (Guimarães, 2010)</b>	17,44	50,15	0,77
<b>Sisal (Silva, 2011)</b>	9,9	65,8	12,0
<b>Curauá (Gehlen, 2006)</b>	4,7	62,5	20,2

Os dados da Tabela 2 relacionados as camadas das fibras de bananeira, mostram uma certa discrepância quando se compara seus resultados obtidos nos ensaios com outras fibras vegetais estudadas. Muitos desses fatores podem ser explicados principalmente pela procedência dessas fibras, como por exemplo, o tipo do solo, o clima, a região, etc. Conseqüentemente suas propriedades mecânicas também sofrerão variação quando comparadas a essas fibras.

A lignina e a hemicelulose juntas formam uma matriz em volta da celulose, ocupando os sítios vazios entre as moléculas de celulosa, isso contribui para o aumento da rigidez. Entretanto é a lignina o elemento formador das redes das microfibrilas que enrijece a parede celular tornando-se um revestimento estável.

As fibras da bananeira são classificadas como monocotiledôneas e como tal são consideradas finas, cilíndricas e terminados em ponta aguçada. E também são consideradas como “fibras duras” por apresentarem paredes secundárias com altos teores de lignina. Fato este que pode ser confirmado ao analisar a Tabela 2 e verificar que seus valores obtidos de lignina são superiores às outras fibras vegetais já pesquisadas.

Muitas vezes devido ao espessamento da parede celular (acentuado), o lúmen celular é reduzido e ocasiona de modo geral a morte das células na maturidade, ou seja, a deposição das

camadas da parede secundária vai reduzindo o diâmetro do lúmen e essa segunda camada se forma após a célula ter atingido o seu tamanho final. A hemicelulose tem como função dar estabilidade e flexibilidade à fibra, e como visto as fibras da bananeira apresentam tal característica, entretanto a hemicelulose é também considerada hidrofílica (absorção de umidade). Devido ao fato da célula atingir sua maturidade aumentando sua espessura da parede celular e conseqüentemente diminuindo seu lúmen (como visto na Tabela 1), tem-se um aumento de absorção de umidade por parte da fibra, maior será seu teor de hemicelulose (bananeira CE).

O teor de celulose é considerado o maior componente da parede secundária e está diretamente ligado à resistência e ao módulo de elasticidade das fibras vegetais. Quanto maior seu teor mais resistente a fibra se torna. Tal fato pode ser acompanhado na Tabela 2, na qual a camada interna da bananeira apresentou maior teor de celulose entre as camadas pesquisadas, além de considerar também que as fibras da bananeira apresentaram valores próximos aos encontrados nas literaturas.

#### 4.1.3 Caracterização física das fibras da bananeira

As fibras foram caracterizadas fisicamente através da determinação dos diâmetros médio, da massa específica e umidade. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos durante os ensaios.

Tabela 3 - Resultados da caracterização física das fibras de bananeiras

<b>Fibra de Bananeira</b>	<b>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Massa específica (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>
<b>Camada Externa (CE)</b>	117 ( $\pm 0,1$ )	1,58 ( $\pm 0,21$ )	14,0 ( $\pm 0,5$ )
<b>Camada Mediana (CM)</b>	100 ( $\pm 0,5$ )	1,58 ( $\pm 0,16$ )	14,0 ( $\pm 0,3$ )
<b>Camada Interna (CI)</b>	75 ( $\pm 0,9$ )	1,57 ( $\pm 0,06$ )	14,0 ( $\pm 0,2$ )

O diâmetro, a massa específica e teor de umidade determinadas para a fibra trabalhada está dentro da média dos valores obtidos por outros autores que estudam as fibras vegetais.

A massa específica é uma propriedade fundamental na definição da aplicação das fibras para uso tecnológico. As fibras da bananeira possuem massa específica menor que as fibras de vidro, que são de aproximadamente de  $2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$  (FAGURY, 2005), sendo um aspecto positivo para a substituição das fibras sintéticas pelas fibras vegetais para serem utilizadas como reforço, pois confere ao compósito resultante um baixo peso. A Figura 38 mostra um histograma comparando a massa específica de outras fibras com as fibras das bananeiras.

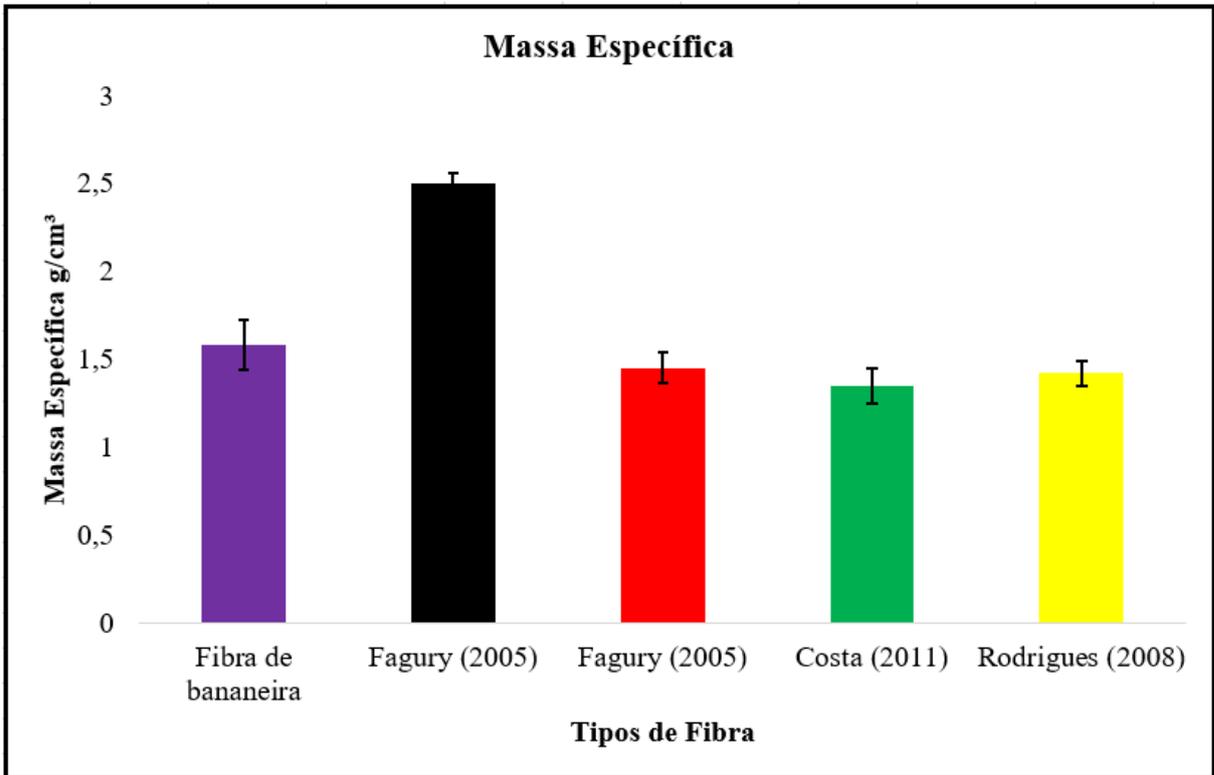


Figura 38 - Gráfico comparativo da massa específica das fibras das bananeiras com outras fibras vegetais.

As fibras de bananeira apresentam valores de massa específica dentro dos valores de outros autores que trabalham com fibras vegetais, como a juta (FAGURY, 2005), bambu (COSTA, 2011) e sisal (RODRIGUES, 2008). As fibras vegetais devido à alta percentagem de grupos hidroxilas podem ser consideradas como hidrofílicas. As hemiceluloses são consideradas como os principais responsáveis pela absorção de água das fibras, embora a celulose não cristalina e a lignina também desempenham papel importante neste processo. As fibras da bananeira têm uma absorção de umidade de aproximadamente 14%, e quando comparadas com outras pesquisas que estudam fibras vegetais obteve-se as seguintes relações de acordo com a Figura 39.

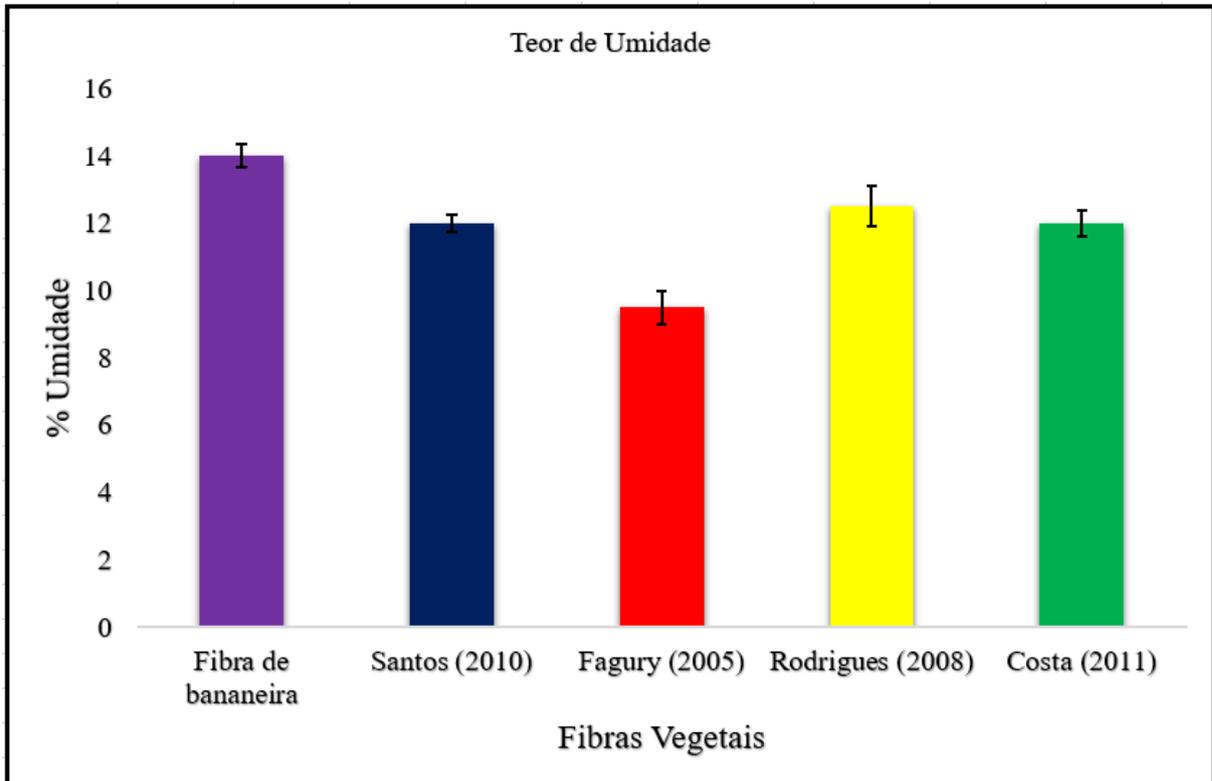


Figura 39 - Gráfico comparativo do teor de umidade das fibras das bananeiras com outras fibras vegetais.

As fibras da bananeira apresentam teores de umidade maiores que as de açai (*Euterpe oleracea*) 12% (SANTOS, 2010), a de juta (*Corchorus capsularis*) 9,5% (FAGURY, 2005), a de sisal (*Agave sisalana*) 12,5% (RODRIGUES, 2008) e a de bambu (*Bambusa vulgaris cv vittata*) 12% (COSTA, 2011). Com base nos valores obtidos é possível observar a existência de uma relação da umidade com a massa específica das fibras: quanto maior for a absorção da fibra maior será sua massa específica, já que esta apresenta mais espaços vazios em sua estrutura.

#### 4.1.4 Caracterização mecânica das fibras da bananeira

Em relação às fibras da bananeira, o limite de resistência à tração obtida está entre os valores já vistos em outras literaturas, comprovando o que tem sido reportado por diversos autores sobre a variabilidade das propriedades das fibras naturais. A Tabela 4 mostra um comparativo das propriedades mecânicas das fibras da bananeira com relação as outras fibras vegetais.

Tabela 4 - Comparativo das propriedades mecânicas das fibras da bananeira em relação às outras fibras vegetais.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Deformação (%)</b>
<b>Bananeira CE</b>	516,36 ( $\pm 39,83$ )	7,77 ( $\pm 2,55$ )
<b>Bananeira CM</b>	789,87 ( $\pm 116,56$ )	8,68 ( $\pm 1,39$ )
<b>Bananeira CI</b>	1381,82 ( $\pm 99,59$ )	9,82 ( $\pm 2,29$ )
<b>Bambu (COSTA, 2011)</b>	501,04	6,81
<b>Sisal (RODRIGUES, 2008)</b>	453,62	5,5
<b>Juta (FAGURY, 2005)</b>	425,40	1,5-1,9

Por meio da Análise de variância (ANOVA) e método de Tukey foram realizadas a comparação entre os materiais estudados com o propósito de evidenciar diferenças significativas entre a resistência à tração, das fibras de bananeiras (CE, CM e CI). Utilizando o *software* Excel, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela da análise de variância. Foi realizada a ANOVA ao ( $\alpha$ ) de 5%, tendo como  $H_0$  – equivalência entre médias; na qual para P-valor  $< \alpha$  rejeita-se  $H_0$ .

A Tabela 5 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração das fibras de bananeira.

Tabela 5 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de tração das fibras de bananeira.

ANOVA						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	1650278,691	2	825139,3456	96,169	8,44159E-07	4,2564
Dentro dos grupos	77220,83105	9	8580,092339			
Total	1727499,522	11				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (96,17) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (4,26) ao nível de significância 5%, mostrando portanto uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese  $H_0$ , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (resistência à tração) com grau de confiança superior a 95% de probabilidade. Pelo P-valor  $< \alpha$  constata-se que os tratamentos das fibras entre camadas do pseudocaule da bananeira foram significativos na tração. Como  $H_0$  (hipótese nula) foi rejeitada, pode-se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma.

A Tabela 6 e a Figura 40 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos das fibras de bananeira para o ensaio de tração, identificando quais os materiais que se diferem.

Tabela 6 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos das fibras de bananeira CE, CM e CI.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
CI-CE	865,4545455	711,1431399	1019,765951	1,11181E-08
CM-CE	273,5097814	119,1983758	427,8211869	0,001313559
CM-CI	-591,9447641	-746,2561697	-437,6333585	7,79406E-07

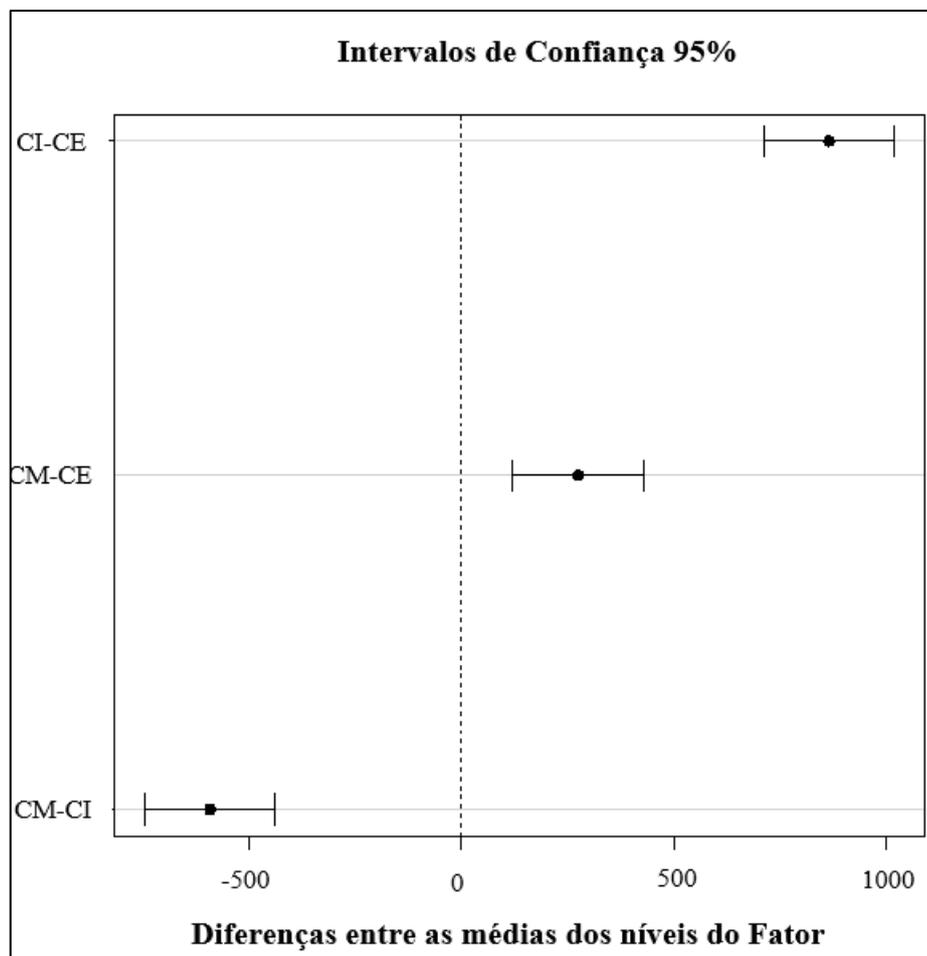


Figura 40 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

Com base nesses resultados pode-se afirmar que houve diferença significativa em todos os tratamentos estatísticos, sendo que nesses três casos, a fibra de bananeira da camada interna (CI) apresentou o maior valor de resistência à tração.

Os resultados de tração foram superiores em média 33% aos valores encontrados pelas fibras de bambu (COSTA, 2011); 40% superior aos valores obtidos pelas fibras de sisal (RODRIGUES, 2008); e aproximadamente 45% superior aos valores das fibras de juta (FAGURY, 2005) já estudadas, ratificando o que tem sido muito discutido nos últimos tempos sobre a variabilidade das propriedades das fibras vegetais.

#### 4.1.5 Caracterização microestrutural das fibras da bananeira

A Figura 41 mostra a fibra de bananeira numa análise de sua seção transversal onde se observou que ela possui uma forma cilíndrica e apresentando um lúmen bem definido.

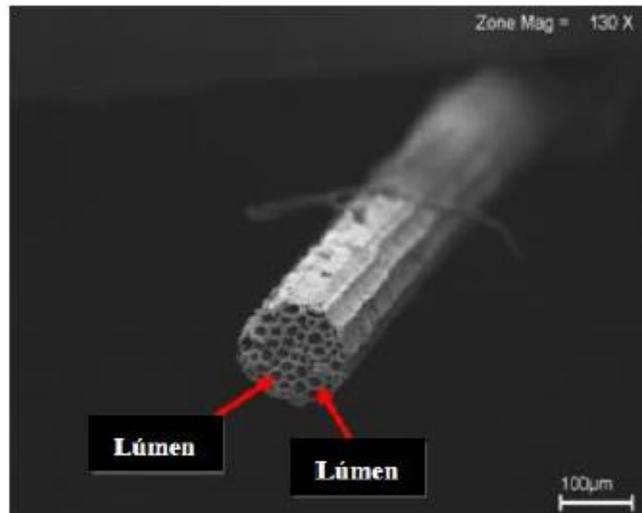


Figura 41 - Análise de micrografia da seção transversal da fibra de bananeira.

As fibras da bananeira apresentam uma microestrutura similar em relação às outras fibras vegetais oriundas do caule, isto é ratificado devido ao alto percentual das microfibrilas de celulose presentes em sua composição microestrutural onde os leva a apresentarem bons resultados quanto às suas propriedades mecânicas.

Após a realização do ensaio de tração nas fibras, foi feito um estudo do comportamento delas após a fratura. A Figura 42 mostra as regiões de fratura das amostras das fibras de bananeira, onde se pode observar as microfibrilas rompidas.

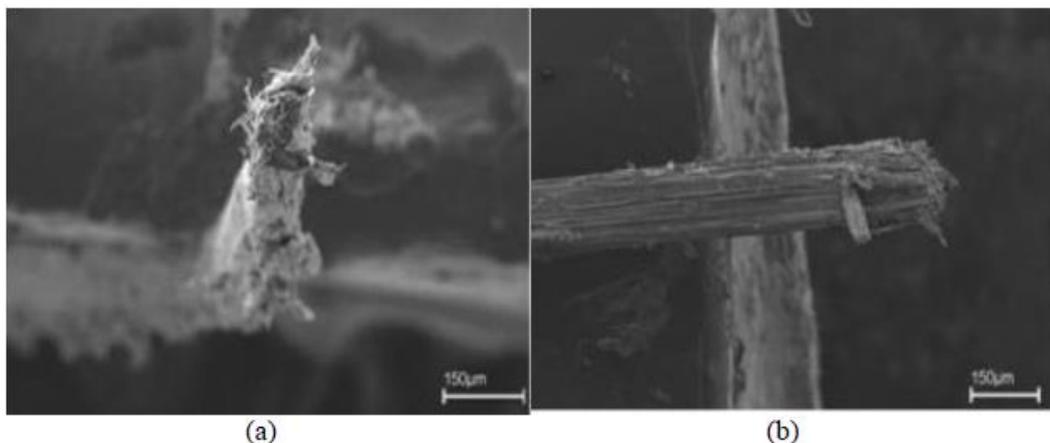


Figura 42 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV): a) Fibra de bananeira do tipo prata apresentando vazios e microcavidades; b) Aspecto superficial da fibra de bananeira prata mostrando uma superfície irregular e rugosa.

A partir da análise das superfícies, a Figura 42 (a) mostra a micrografia eletrônica de varredura da fibra de bananeira onde se podem observar alguns vazios e microcavidades. A Figura 42 (b) apresenta o aspecto superficial da fibra de bananeira prata mostrando uma superfície irregular e rugosa. Através da micrografia MEV, pode-se observar que as fibras das bananeiras são formadas por um aglomerado de microfibrilas. Observa-se também que a sua superfície é ligeiramente rugosa e não uniforme o que pode facilitar o ancoramento mecânico da resina, portanto facilitar a adesão fibra/matriz. Diferentemente das fibras sintéticas, essas fibras apresentam uma grande diversidade na forma geométrica da seção transversal, lembrando também que o diâmetro das fibras da bananeira não é uniforme ao longo do comprimento, já que são consideradas anisotrópicas.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO MINERAL

### 4.2.1 Análise da massa específica

A massa específica média encontrada para o resíduo de flotação do minério de cobre,  $2,86 \text{ g/cm}^3$ , se mostrou dentro dos valores dos principais minerais utilizados como carga em polímero no Brasil como: talco com massa específica de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , pirofilita com  $2,8 \text{ g/cm}^3$ , caulinita com  $2,6 \text{ g/cm}^3$ , wolastonita com  $2,8$  a  $2,9 \text{ g/cm}^3$ , quartzo com  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , calcita com  $2,72 \text{ g/cm}^3$ , dolomita  $2,85 \text{ g/cm}^3$ , muscovita com  $2,76$  a  $3,1 \text{ g/cm}^3$  (Figura 43).

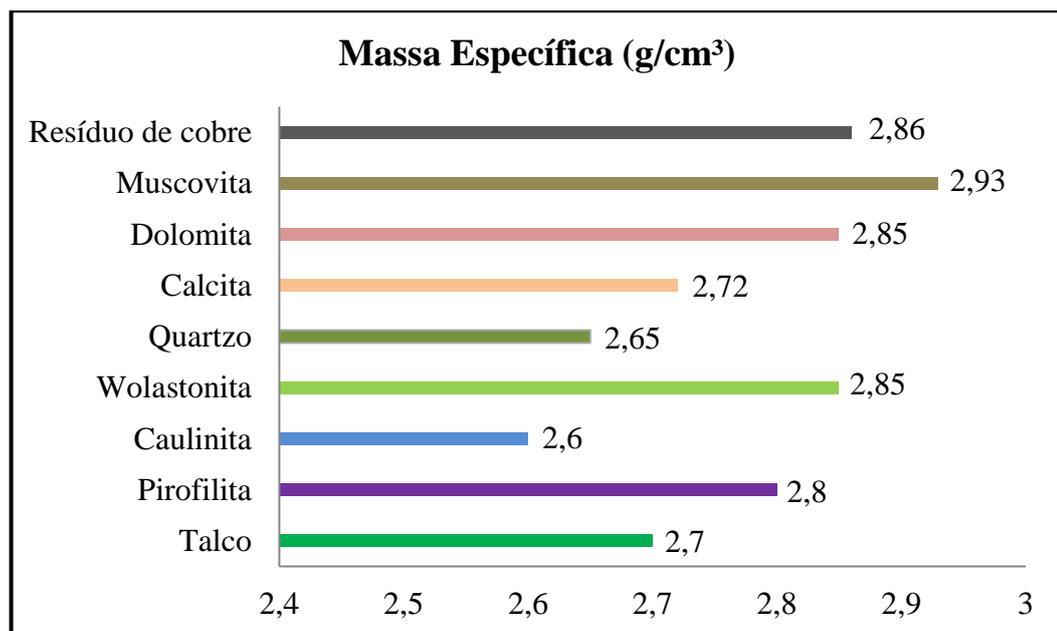


Figura 43 – Gráfico do valor da massa específica do resíduo de cobre comparado a outros minerais.

Fonte: Adaptado de EURO AKTION (2016).

## 4.2.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica do resíduo de cobre permitiu classificar esta carga quanto ao diâmetro médio de suas partículas e a distribuição percentual dos diversos tamanhos de grãos em relação à faixa de peneiras. Este resultado é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Análise granulométrica do resíduo de cobre.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA								
#Tyler	Diâmetro das malhas (D# mm)		Diâmetro médio (mm)	Massa retida (g)	% Retida (x>D)	% Passante (x<D)	% Retida acumulada	% Passante acumulada
+9	-	-	-					
-9+16	2	1	1,5	0,40	0,50	99,50	0,50	99,50
-16+28	1	0,59 5	0,7975	1,60	2,00	98,00	2,50	97,50
-28+32	0,59 5	0,5	0,5475	2,20	2,75	97,25	5,25	94,75
-32+48	0,5	0,35 4	0,427	8,00	10,00	90,00	15,25	84,75
-48+60	0,35 4	0,25	0,302	14,40	18,00	82,00	33,25	66,75
-60+100	0,25	0,14 9	0,1995	24,00	30,00	70,00	63,25	36,75
-100+170	0,14 9	0,08 8	0,1185	13,20	16,50	83,50	79,75	20,25
-170+270	0,08 8	0,05 3	0,0705	3,40	4,25	95,75	84,00	16,00
-270+325	0,05 3	0,04 4	0,0485	2,20	2,75	97,25	86,75	13,25
-325+400	0,04 4	0,03 7	0,0405	1,80	2,25	97,75	89,00	11,00
-400+500	0,03 7	0,02 5	0,031	1,20	1,50	98,50	90,50	9,50
-500	-	-		7,60	9,50	90,50	100,00	0,00
Σ				80,00	100,00			

Fundamentalmente, da análise da curva granulométrica (Figura 44), podem ser abstraídos valores de três coeficientes: O diâmetro efetivo D10 que é o ponto característico da curva granulométrica para medir a espessura da carga resídua, que corresponde ao ponto de dez por cento, tal que dez por cento das partículas da carga resídua possuem diâmetro inferior a este ponto; propicia também o coeficiente de curvatura (CC), que dá uma medida da forma e da simetria da curva granulométrica; ainda, revela o coeficiente de uniformidade (CU), que indica a amplitude do tamanho dos grãos. Considera-se que o material é bem graduado quando o Cc está dentro do intervalo de 1 a 3.

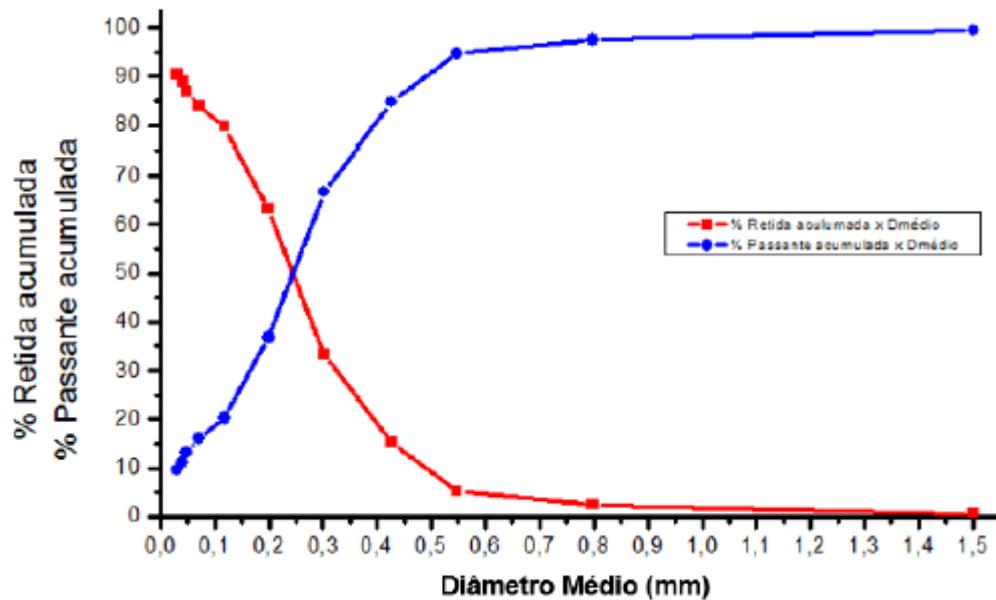


Figura 44 – Gráfico da curva de distribuição granulométrica.

A Tabela 8 apresenta os valores destes parâmetros. Pode-se retirar, ainda, da curva granulométrica, o diâmetro máximo das partículas, que corresponde à abertura da malha da menor peneira na qual passam, no mínimo, 95% do material.

Tabela 8 - Parâmetros da curva granulométrica.  
INFORMAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA

Porcentagem das partículas passantes (acumulada)	Diâmetro médio (mm)				Coeficiente de uniformidade (C <sub>U</sub> ) D <sub>60</sub> /D <sub>10</sub>	Coeficiente de curvatura (C <sub>C</sub> ) (D <sub>30</sub> ) <sup>2</sup> /(D <sub>60</sub> *D <sub>10</sub> )
	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>67</sub>		
10%	0,025				11,200	3,657
30%		0,160				
60%			0,280			
67%				0,302		

O coeficiente de uniformidade (CU) indica a ideia de distribuição do tamanho da carga residual. Os valores de CU < 5 são denominados uniformes; para CU > 15 os valores são desuniformes; com valores de 5 < CU < 15 é denominado de medianamente uniformes.

A Figura 45 (histograma) como indicador da distribuição de dados, mostra que a distribuição granulométrica do resíduo de cobre aproxima-se de uma curva Gaussiana e que a mesma é simétrica em torno do centro da distribuição mediana que é o referencial.

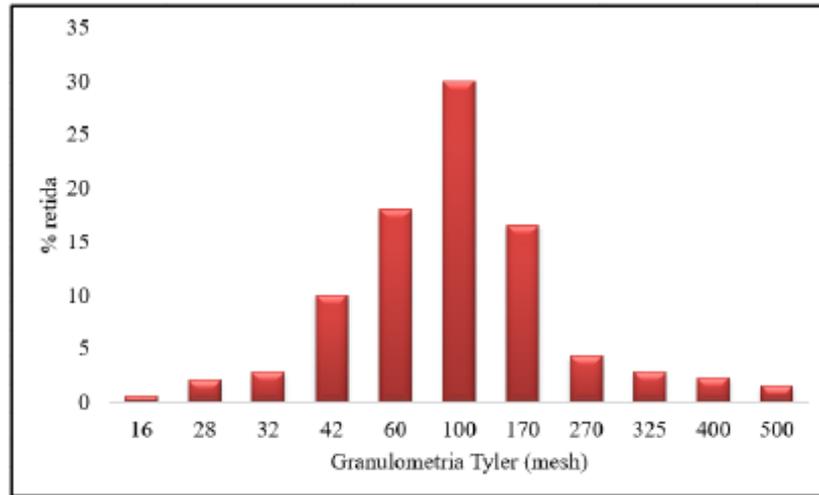


Figura 45 - Distribuição granulométrica do resíduo de cobre.

#### 4.2.3 Difração de Raios-X (DRX)

As composições mineralógicas do resíduo de flotação do minério de cobre foram avaliadas por meio da análise de DRX. No difratograma do resíduo de cobre apresentado na Figura 46 identifica-se os principais componentes mineralógicos do material de acordo com suas fichas PDF, evidenciando-se os principais picos correspondentes ao quartzo (Q) - PDF 01-083-2465, Albita (A) - PDF 00-009-0466, Magnetita (Ma) - PDF 01-076-1849, Calcopirita (Ca) - PDF 00-002-0624. Entre essas fases tem-se também a presença da Muscovita (Mu), elemento muito utilizado como retardante de chama na confecção de materiais compósitos.

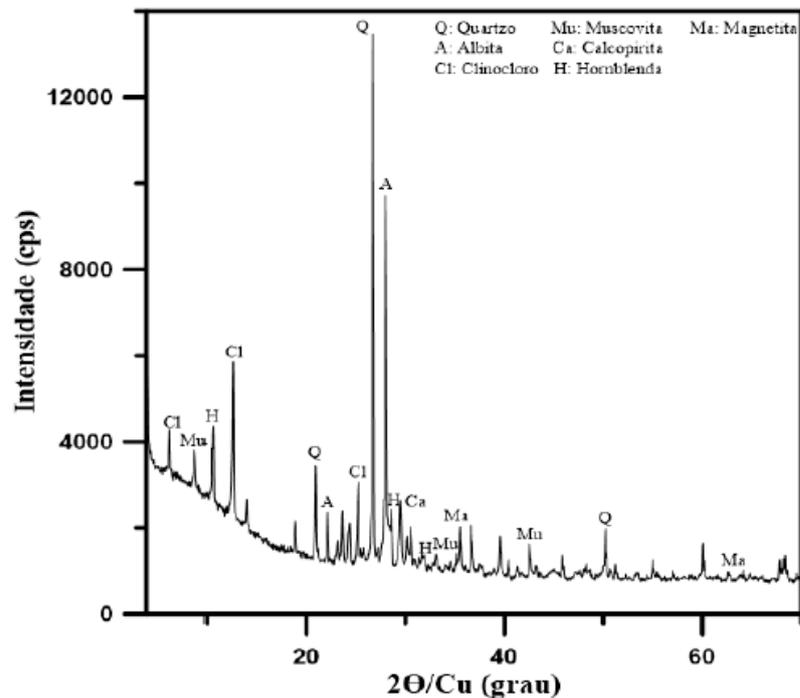


Figura 46 – Difração de Raios-X do resíduo de flotação do minério de cobre.

### 4.3 CONFECCÃO DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS

Após o período de cura dos compósitos produzidos, foi iniciada a etapa de corte dos corpos de prova, os mesmos não possuíam irregularidades quanto a sua superfície pois no processo de fabricação o molde metálico possui uma estrutura regular, plana e lisa, sendo assim após a compressão as possíveis bolhas de ar resultantes da reação química são expulsas da matriz e os compósitos ganham maior resistência pois as bolhas de ar criariam pontos concentradores de tensão e poderiam levar a fratura do material por conta de defeitos na estrutura do compósito. A Figura 47 mostra os corpos de prova (320 mm x 170 mm) da matriz plena, compósitos poliméricos adicionados com resíduo de flotação de cobre, compósito polimérico reforçado com fibras de bananeira e o compósito polimérico híbrido com resíduo de cobre reforçado com fibras de bananeira.

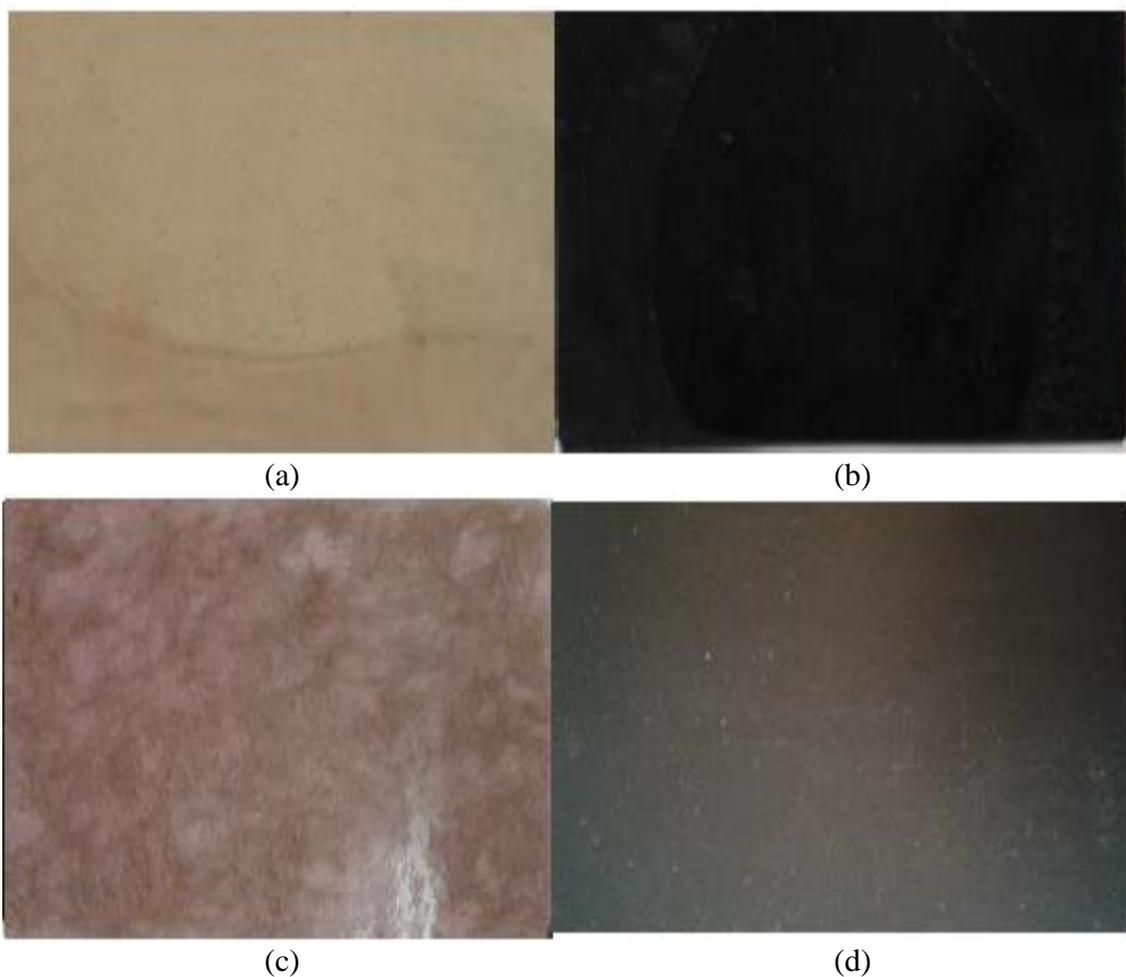


Figura 47 – (a) placa do compósito de matriz plena; (b) placa do compósito polimérico adicionado com resíduo de flotação de cobre; (c) placa do compósito polimérico reforçado com fibras de bananeira; (d) placa do compósito polimérico híbrido com resíduo de cobre reforçado com fibras de bananeira.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS

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

A Tabela 9 mostra os resultados determinados através dos ensaios de massa específica aparente (MEA), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA).

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de MEA, AA e PA.

<b>Fração mássica dos reforços (%)</b>	<b>MEA (%)</b>	<b>AA (%)</b>	<b>PA (%)</b>
<b>Matriz Plena</b>	1,18 ( $\pm 0,01$ )	0,52 ( $\pm 0,09$ )	0,62 ( $\pm 0,11$ )
<b>Fibra 1% (F1)</b>	1,17 ( $\pm 0,01$ )	0,58 ( $\pm 0,09$ )	0,68 ( $\pm 0,11$ )
<b>Fibra 2% (F2)</b>	1,14 ( $\pm 0,01$ )	2,14 ( $\pm 0,15$ )	2,32 ( $\pm 0,15$ )
<b>Fibra 3% (F3)</b>	1,14 ( $\pm 0,01$ )	2,24 ( $\pm 0,07$ )	2,55 ( $\pm 0,07$ )
<b>Resíduo Cobre 10% (RC10)</b>	1,41 ( $\pm 0,08$ )	0,20 ( $\pm 0,02$ )	0,28 ( $\pm 0,01$ )
<b>Resíduo Cobre 20% (RC20)</b>	1,52 ( $\pm 0,03$ )	0,31 ( $\pm 0,03$ )	0,47 ( $\pm 0,05$ )
<b>Resíduo Cobre 30% (RC30)</b>	1,73 ( $\pm 0,02$ )	0,17 ( $\pm 0,02$ )	0,32 ( $\pm 0,02$ )
<b>Resíduo Cobre 40% (RC40)</b>	1,84 ( $\pm 0,02$ )	0,14 ( $\pm 0,01$ )	0,27 ( $\pm 0,02$ )
<b>Fibra 1% Resíduo Cobre 10% (F1 RC10)</b>	1,33 ( $\pm 0,02$ )	0,64 ( $\pm 0,03$ )	0,85 ( $\pm 0,05$ )
<b>Fibra 2% Resíduo Cobre 10% (F2 RC10)</b>	1,33 ( $\pm 0,01$ )	1,04 ( $\pm 0,08$ )	1,32 ( $\pm 0,01$ )
<b>Fibra 1% Resíduo Cobre 20% (F1 RC20)</b>	1,51 ( $\pm 0,02$ )	0,57 ( $\pm 0,02$ )	0,86 ( $\pm 0,02$ )
<b>Fibra 2% Resíduo Cobre 20% (F2 RC20)</b>	1,50 ( $\pm 0,01$ )	1,15 ( $\pm 0,04$ )	1,73 ( $\pm 0,05$ )

O sistema de absorção de água nos compósitos expandidos com fibras vegetais é fator complexo que envolve diferentes variáveis, como a morfologia das células, variação entre células abertas e fechadas, tamanho das células, densidade do compósito e características da fibra, tais como tamanho, teor, composição química da fibra e influência de tratamentos químicos na fibra vegetal.

É visível que a absorção de água aumenta com o aumento do teor de fibra de bananeira nos compósitos, ratificando que a taxa de absorção depende principalmente do teor de fibra. É conhecido que cada componente do compósito pode sofrer envelhecimento ao meio, sendo que a água é capaz de degradar a matriz e a fibra em velocidades diferentes e também causar um possível descolamento na região de interface fibra/matriz. Este mecanismo de absorção de água é esperado em fibras naturais, por possuírem características hidrofílicas, transformando em um condutor de água e concentrando todo esse volume na interface.

O contrário aconteceu com os compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre, onde nota-se a diminuição da absorção de água quando comparado com a matriz plena. Redução essa que chega até a aproximadamente 75% para os compósitos com frações de 40%. O efeito da interação entre os compósitos híbridos pode-se

observar que a adição de partículas do resíduo de flotação do minério de cobre promoveu uma queda da absorção de água dos compósitos quando comparados com os compósitos reforçados com fibras.

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira revelam o aumento da porosidade em função do aumento da fração mássica. Este aumento de porosidade pode ser atribuído à menor quantidade de matriz nos compósitos fabricados à medida que é aumentado a fração das fibras, uma vez que a matriz polimérica é a responsável pelo molhamento, distribuição de esforços para as fibras e acabamento superficial. Outro fato que pode ser atribuído também é devido a fibra de bananeira ser porosa como foi mostrado anteriormente. Os compósitos que apresentaram maiores valores de porosidade correspondem aqueles fabricados com 3% de fibras de bananeira, enquanto os de menor porosidade são os compósitos fabricados com fração de 1% de fibras de bananeira.

Da mesma forma como foi discutido sobre a taxa de absorção de água dos compósitos poliméricos reforçados com o resíduo de flotação de minério de cobre, aconteceu com relação a porosidade aparente onde notou-se um decréscimo de mais de 50%, para os compósitos de 40% de fração, quando comparados com os compósitos de matriz plena e reforçados com fibras. O mesmo acontece com os compósitos híbridos reforçados com resíduo de cobre e fibras de bananeira, onde nota-se que a adição dessas partículas minerais influenciou decisivamente na redução da porosidade aparente do compósito quando comparado com os compósitos reforçados com as fibras de bananeira. Fato este que pode ser justificado pelo baixíssimo teor hidrofílico dos resíduos. A Figura 48 mostra o gráfico de comparação de AA e PA entre as proporções dos compósitos estudados.

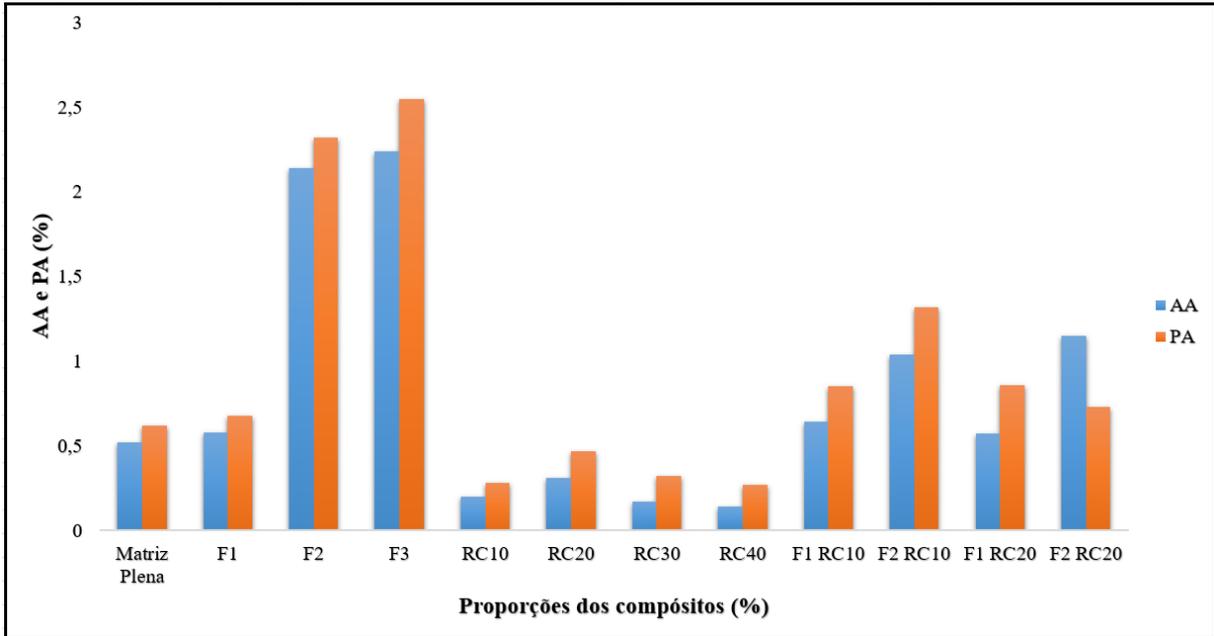


Figura 48 – Gráfico AA e PA em função das proporções dos reforços.

O gráfico da Figura 49 ilustra o comparativo da massa específica aparente entre a matriz plena e os compósitos reforçados com fibras de bananeira, reforçados com resíduo de flotação do minério de cobre e o compósito híbrido com fibra e resíduo.

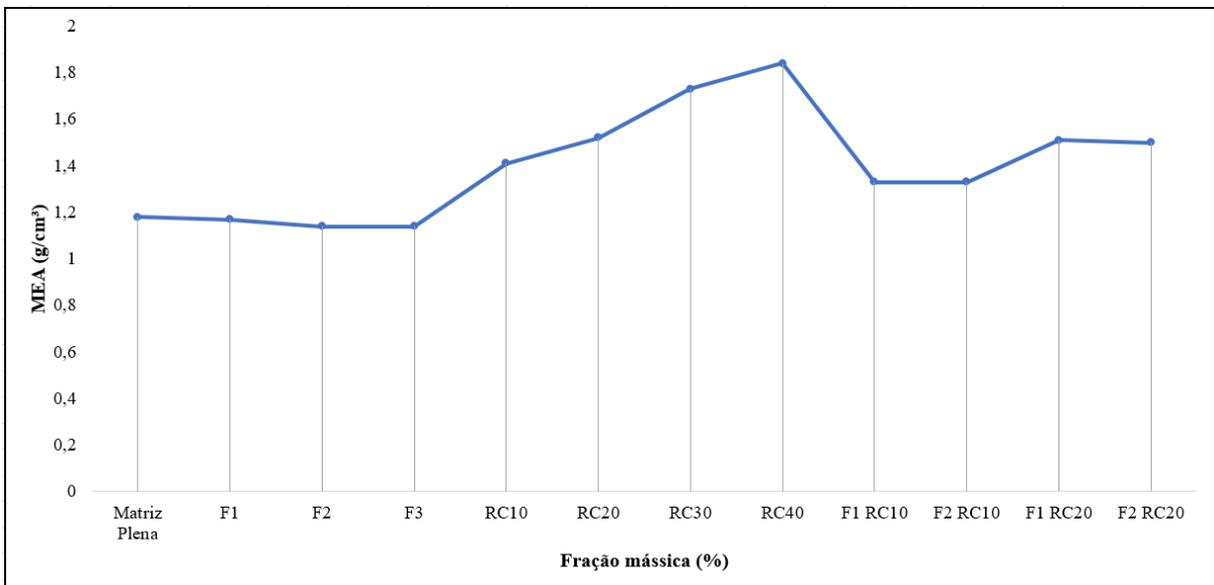


Figura 49 – Gráfico MEA em função das proporções dos reforços.

A redução da massa específica aparente pode ser observada entre os compósitos reforçados com fibras de bananeira, principalmente com as frações de 2% e 3%. Essa redução pode ser atribuída ao aumento da porosidade dos compósitos com o aumento da fração de fibras. Fato este não ocorrido quando foi adicionado apenas as cargas do resíduo de cobre ou então na mistura do resíduo com as fibras. Foi observado o aumento da massa específica aparente,

podendo estar relacionado à massa específica do material particulado adicionado como carga. Como o compósito é formado por duas fases dispersas, as suas respectivas densidades influenciam no crescimento da massa específica aparente do compósito resultante.

#### 4.4.2 Caracterização mecânica dos materiais compósitos

##### 4.4.2.1 Ensaio de tração

###### 4.4.2.1.1 Compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira foram avaliados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foi obtido os seguintes resultados conforme a Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados obtidos através do ensaio de tração.

<b>Fração mássica (%)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Alongamento (mm)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
<b>Matriz Plena</b>	32,00 ( $\pm 2,10$ )	3,20 ( $\pm 0,58$ )	0,96 ( $\pm 0,04$ )
<b>Fibra 1% (F1)</b>	38,50 ( $\pm 4,25$ )	4,23 ( $\pm 0,77$ )	1,94 ( $\pm 0,24$ )
<b>Fibra 2% (F2)</b>	34,50 ( $\pm 9,23$ )	2,75 ( $\pm 0,38$ )	2,80 ( $\pm 0,44$ )
<b>Fibra 3% (F3)</b>	32,85 ( $\pm 4,07$ )	2,69 ( $\pm 0,50$ )	3,22 ( $\pm 0,70$ )

Conforme os valores mostrados na Tabela 10, há um aumento da resistência à tração quando da adição de fibra comparado com a matriz plena. Entretanto, a medida que é adicionado fibra na matriz nota-se uma perda de resistência à tração. O compósito reforçado com 1% de fibra obteve o melhor resultado entre compósitos fabricados, enquanto o compósito reforçado com 3% de fibra obteve um valor consideravelmente igual a matriz plena. Isso foi uma característica em todas as frações, o aumento do módulo de elasticidade com a adição das fibras no compósito, ratificando que o aumento da rigidez do material se dá pelo aumento da fração das fibras tornando este material mais frágil.

A Figura 50 ilustra o gráfico comparativo dos compósitos puros e reforçados com fibras de bananeira nas frações 1%, 2% e 3%.

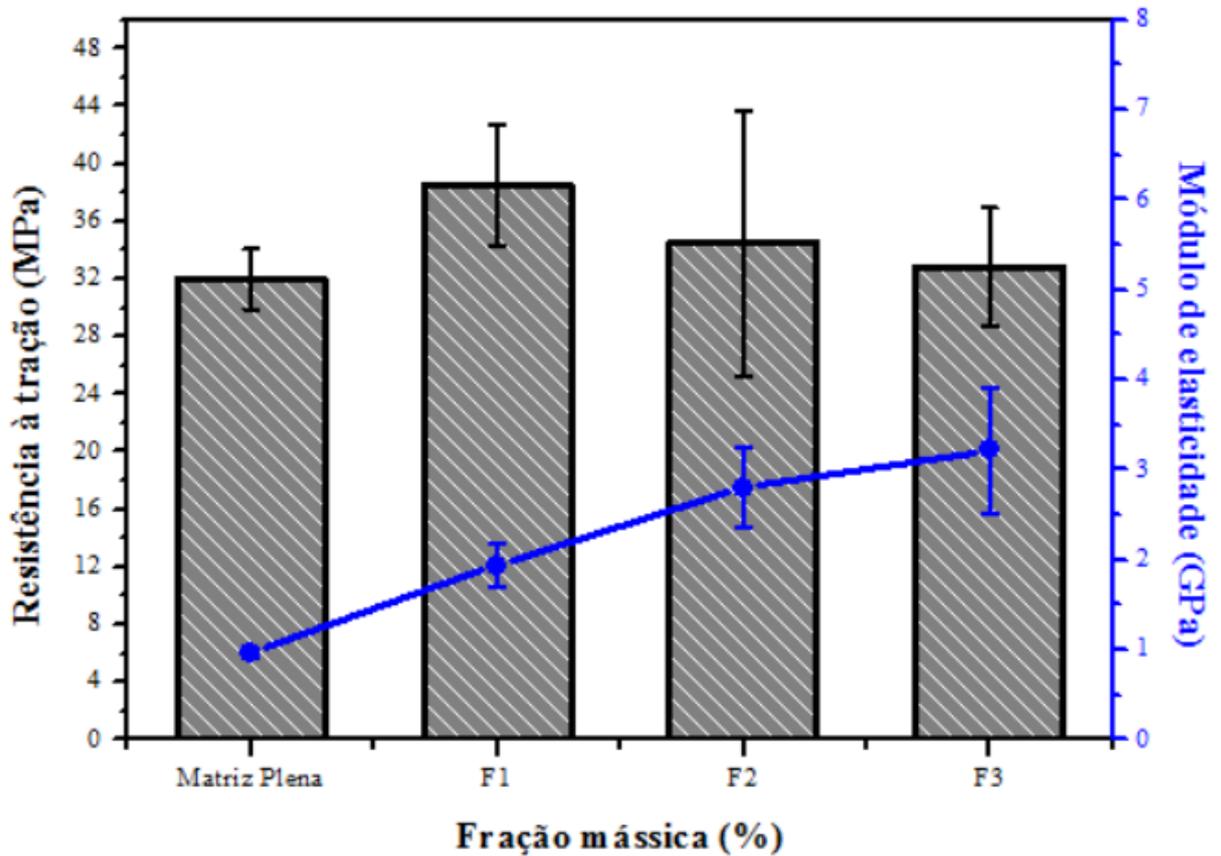


Figura 50 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

Por meio da Análise de variância (ANOVA) e método de Tukey foram realizadas a comparação entre os materiais estudados com o propósito de evidenciar diferenças significativas entre a resistência à tração, entre a matriz plena e as frações da fibra de bananeira (F1, F2 e F3). Utilizando o *software* Excel, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela da análise de variância. Foi realizada a ANOVA ao ( $\alpha$ ) de 5%, tendo como  $H_0$  – equivalência entre médias; na qual para  $P\text{-valor} < \alpha$  rejeita-se  $H_0$ .

A Tabela 11 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos reforçados com fibras de bananeira.

Tabela 11 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos reforçados com fibras.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	186,6557	3	62,21856667	2,650748	0,096347866	3,490295
Dentro dos grupos	281,665	12	23,47208333			
Total	468,3207	15				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (2,65) foi inferior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,49) ao nível de significância de 5%, mostrando assim que não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, não

rejeitando assim  $H_0$ . Sendo  $P\text{-valor} > \alpha$  ratifica que as médias dos tratamentos sejam consideradas iguais. Apesar de  $H_0$  ter sido aceito (médias iguais), pode-se determinar a diferença mínima significativa através do método de comparação de médias (método de Tukey), porém nesse caso ele é dito não-protetido.

A Tabela 12 e a Figura 51 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos reforçados com fibras de bananeira para o ensaio de tração, confirmando a igualdade estatística entre os dados.

Tabela 12 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1, F2 e F3.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
<b>F2-F1</b>	-3,998	-14,09851596	6,102515957	0,675597298
<b>F3-F1</b>	-5,688	-15,78851596	4,412515957	0,400394873
<b>MP-F1</b>	-6,54	-16,64051596	3,560515957	0,28639645
<b>F3-F2</b>	-1,69	-11,79051596	8,410515957	0,962718868
<b>MP-F2</b>	-2,542	-12,64251596	7,558515957	0,887677614
<b>MP-F3</b>	-0,852	-10,95251596	9,248515957	0,994853767

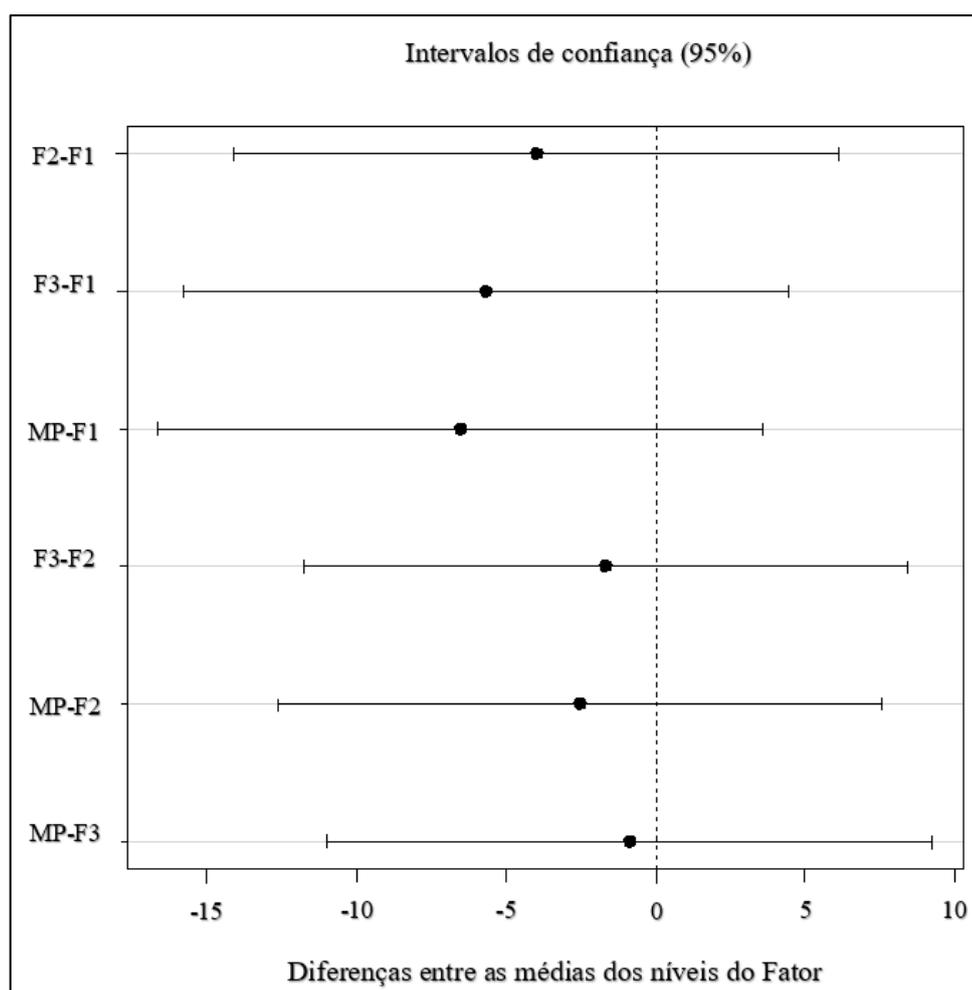
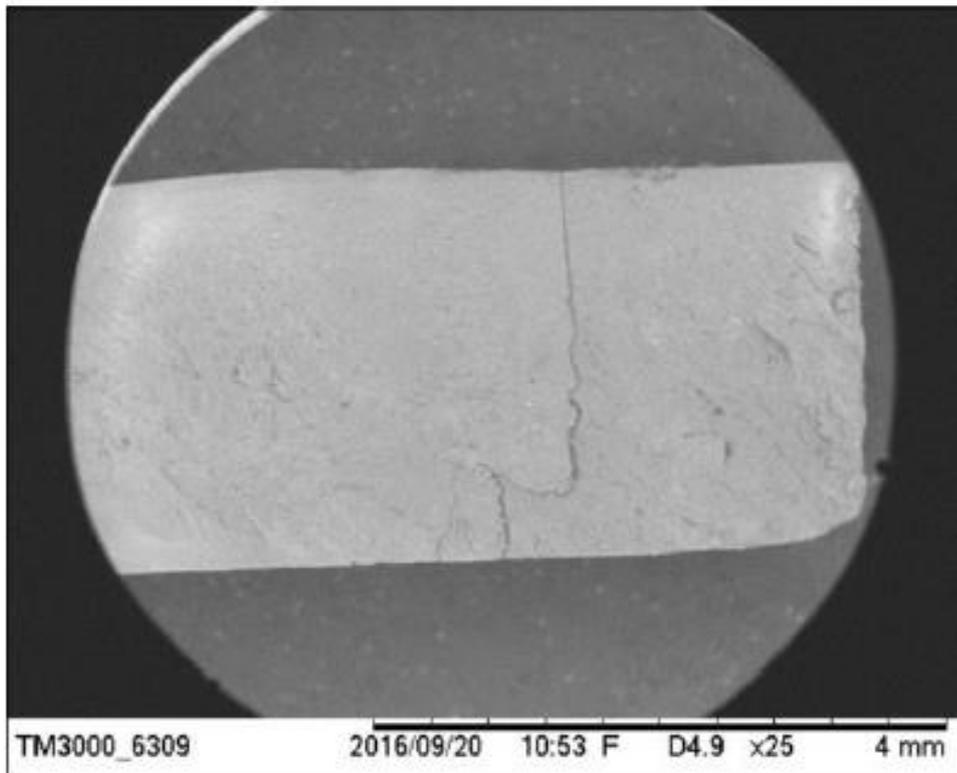
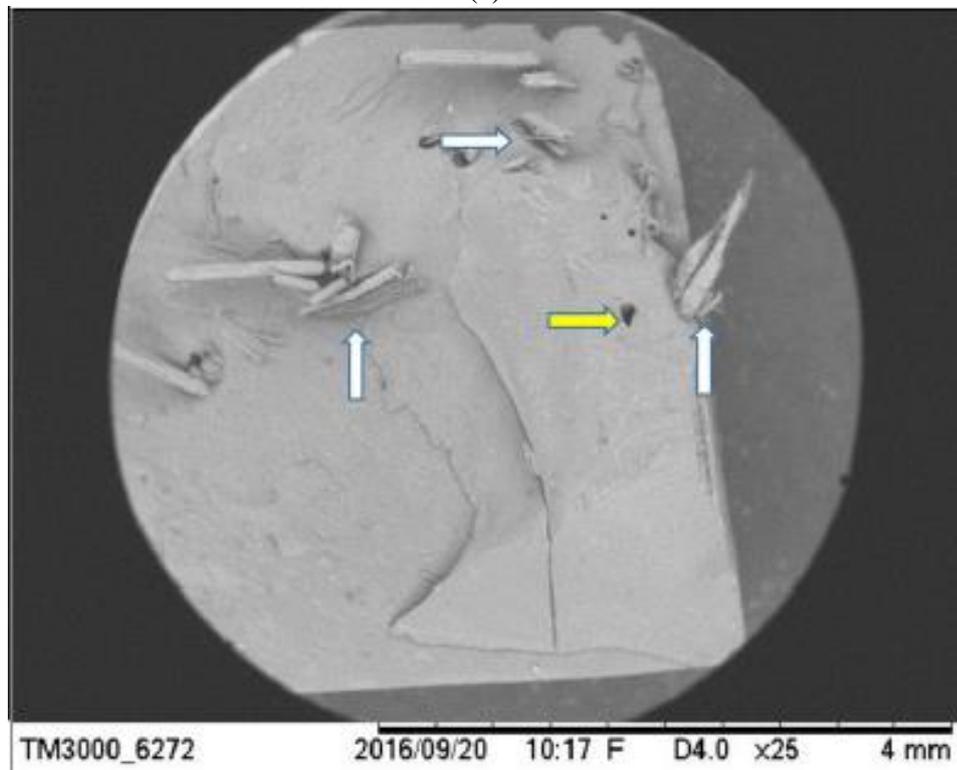


Figura 51 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

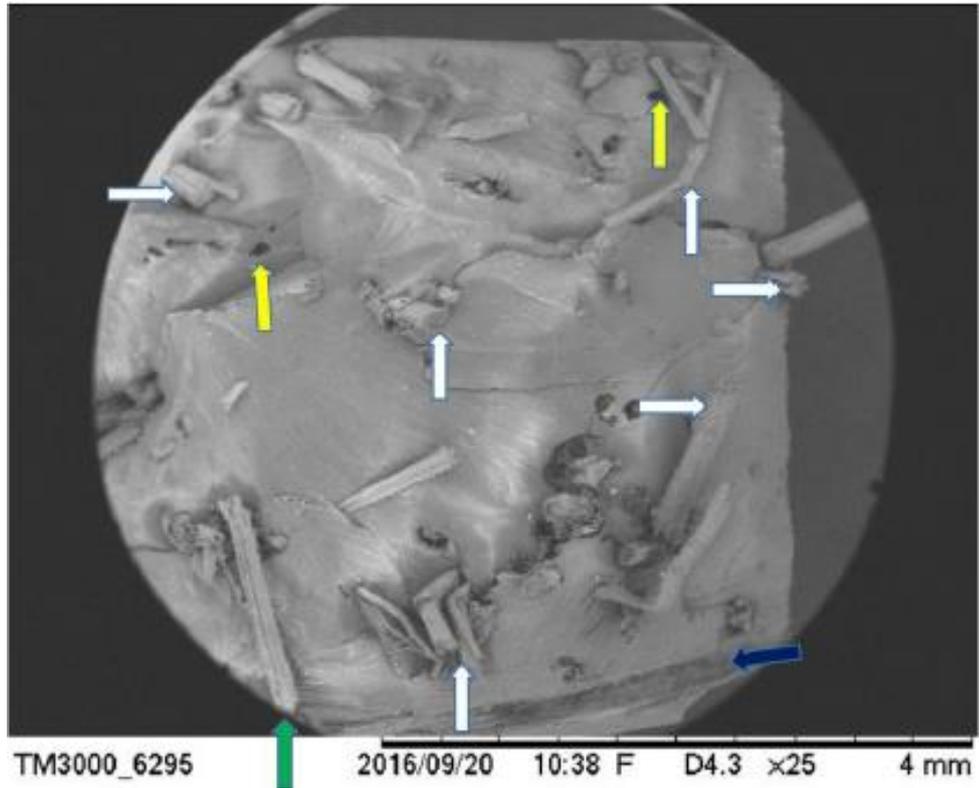
A Figura 52 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos de matriz plena e os compósitos reforçados com as fibras de 1%, 2% e 3%.



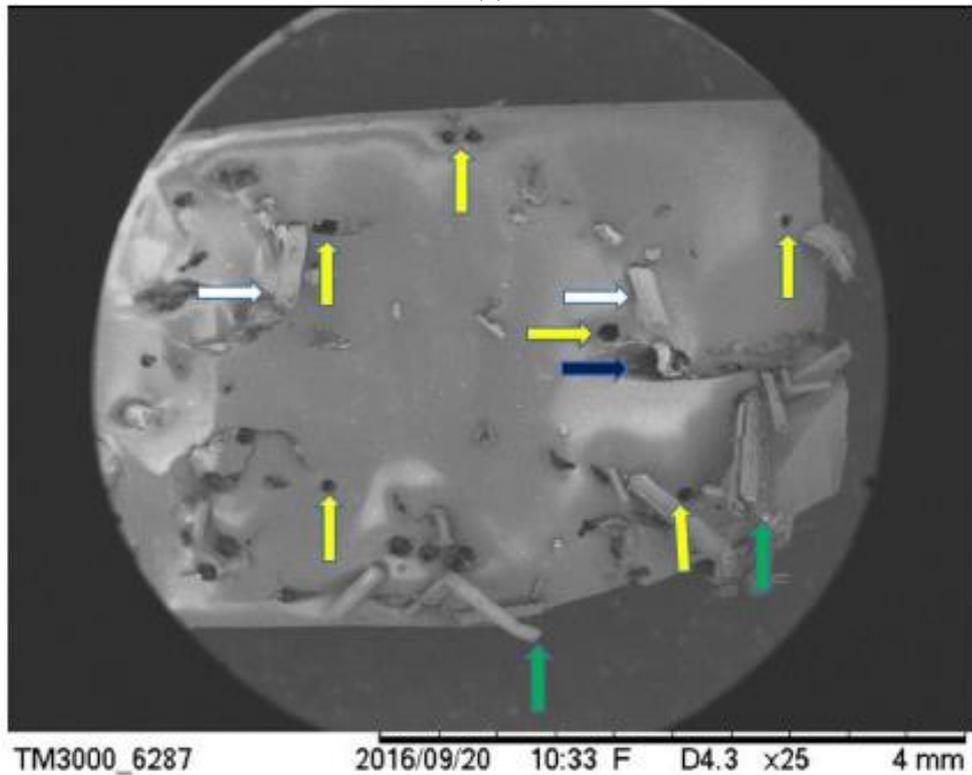
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 52 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de tração: (a) matriz plena; (b) Fibra 1%; (c) Fibra 2%; (d) Fibra 3%.

Analisando a Figura 52 (a) nota-se uma superfície de fratura característica dos materiais poliméricos, uma superfície lisa e apresenta uma ruptura transversal no seu corpo de prova. Na

Figura 52 (b) tem-se a superfície de fratura do compósito polimérico reforçado com fibras de 1%, na qual se nota que, apesar da pouca presença do mecanismo de falha de pull-out (seta amarela), percebe-se um maior número de fibras rompidas (seta branca) e dispostas na direção em que o carregamento foi solicitado, fatores estes podem justificar a aumento de sua resistência quando comparado com a matriz plena. Na Figura 52 (c) ilustra a superfície de fratura do compósito reforçado com fibras de 2%, onde pode-se observar que apesar do mecanismo de pull-out, descolamento da fibra e fibras sacadas (setas amarela, azul e verde, respectivamente), ainda ser recorrente, tem-se a presença de fibras rompidas (setas brancas) e direcionadas no sentido do carregamento do esforço, com isso aumentando a resistência do compósito comparado com os compósitos reforçados com fibras de 3%. A Figura 52 (d) mostra a superfície de fratura do compósito reforçado com fibras de 3%, e nela pode-se perceber uma maior quantidade de fibras presente na matriz, e também pode se perceber uma presença de vários mecanismos de falha, como por exemplo, uma maior incidência de pull-out (seta amarela), aparecimento de fibras descoladas da matriz (seta azul) e muitas fibras que foram sacadas (seta verde), e uma menor incidência de fibras fraturadas.

#### 4.4.2.1.2 Compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre

Os compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre foram avaliados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foi obtido os valores de resistência, alongamento e módulo de elasticidade conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados obtidos através do ensaio de tração.

Fração mássica (%)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
<b>Matriz Plena</b>	32,00 ( $\pm 2,10$ )	3,20 ( $\pm 0,58$ )	0,96 ( $\pm 0,04$ )
<b>Resíduo Cobre 10% (RC10)</b>	23,27 ( $\pm 2,38$ )	1,88 ( $\pm 0,58$ )	2,48 ( $\pm 0,50$ )
<b>Resíduo Cobre 20% (RC20)</b>	30,21 ( $\pm 4,44$ )	2,21 ( $\pm 0,11$ )	3,65 ( $\pm 0,41$ )
<b>Resíduo Cobre 30% (RC30)</b>	34,31 ( $\pm 1,86$ )	2,15 ( $\pm 0,17$ )	4,26 ( $\pm 0,70$ )
<b>Resíduo Cobre 40% (RC40)</b>	34,28 ( $\pm 2,31$ )	1,90 ( $\pm 0,04$ )	4,64 ( $\pm 0,55$ )

Verifica-se através dos resultados da Tabela 13 que a resistência à tração dos compósitos poliméricos com resíduos de flotação do minério de cobre apresentam um sensível aumento quando se aumenta sua fração. Os valores obtidos pelos compósitos com 10% e 20% de resíduo de cobre foram os que apresentaram valores menores ao da matriz plena, entretanto não pode ser considerado como reforço efetivo, embora seus módulos de elasticidade apresentem

valores mais efetivos que a própria matriz plena. Fatores estes podem ser considerados pelo fato do resíduo de cobre sedimentar de maneira fácil na matriz plena, causada pela sua elevada massa específica. Porém, a medida que se aumenta a fração do resíduo de cobre na matriz tem-se uma melhor distribuição dentro do compósito, melhorando a trabalhabilidade, a homogeneização e compactação. Fato este ocorrido com os compósitos poliméricos reforçados com 30% e 40%, tendo um aumento não só na sua resistência à tração, como também no seu módulo de elasticidade.

A Figura 53 ilustra o gráfico comparativo da matriz plena e dos compósitos com adição do resíduo de cobre nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%.

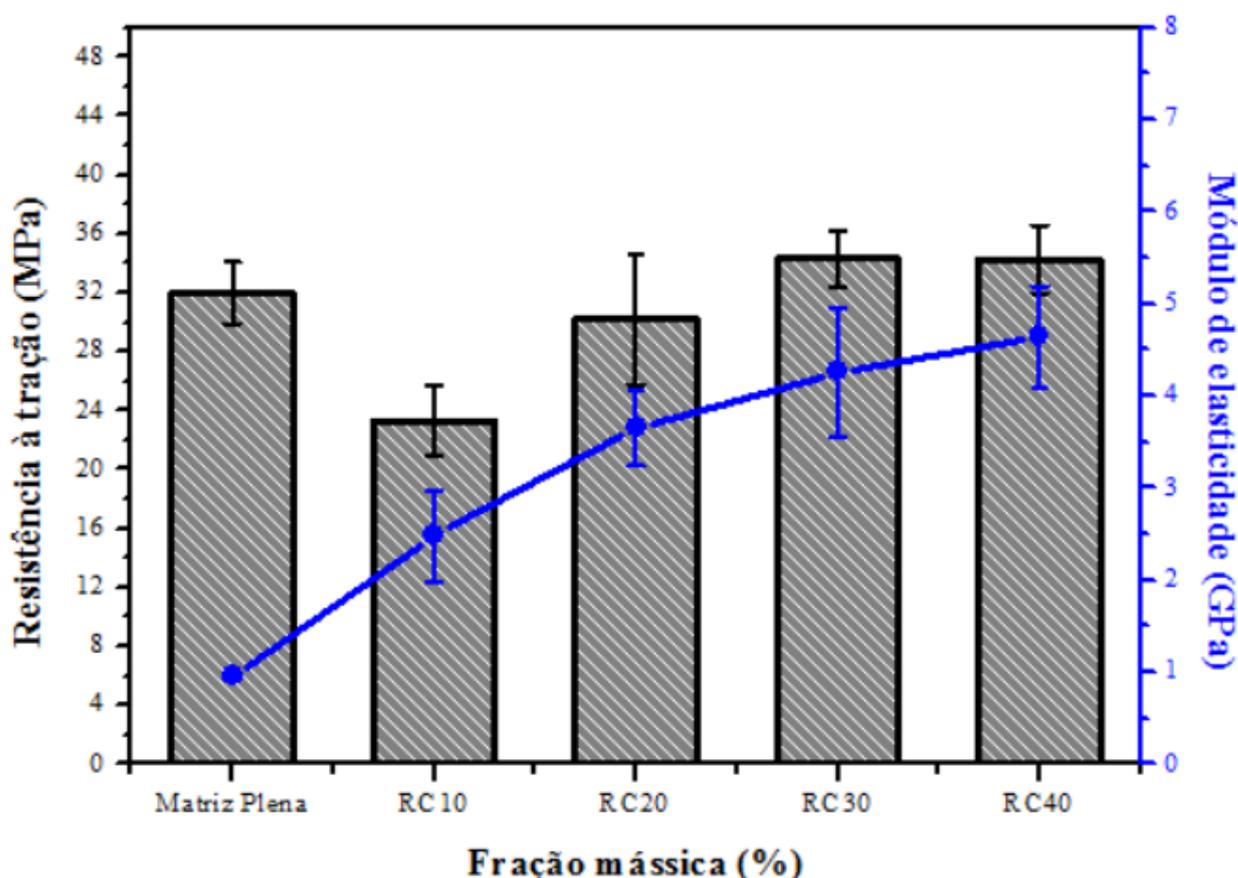


Figura 53 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

Por meio da Análise de variância (ANOVA) e método de Tukey foram realizadas a comparação entre os materiais estudados com o propósito de evidenciar diferenças significativas entre a resistência à tração, entre a matriz plena e as frações do resíduo de cobre (RC10, RC20, RC30 e RC40). Utilizando o *software* Excel, na função “ANOVA: único fator” se obtém a tabela da análise de variância. Foi realizada a ANOVA ao ( $\alpha$ ) de 5%, tendo como  $H_0$  – equivalência entre médias; na qual para P-valor  $< \alpha$  rejeita-se  $H_0$ .

A Tabela 14 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos com adição do resíduo de cobre.

Tabela 14 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de tração dos resíduos. ANOVA

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	218,5690083	4	54,64225208	6,947395118	0,004825	3,35669
Dentro dos grupos	86,51656667	11	7,865142424			
<b>Total</b>	<b>305,085575</b>	<b>15</b>				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (6,95) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,36) ao nível de significância 5%, mostrando portanto uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese  $H_0$ , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (resistência à tração) com grau de confiança superior a 95% de probabilidade. Pelo  $P\text{-valor} < \alpha$  constata-se que os tratamentos das frações de resíduo foram significativos na tração. Como  $H_0$  (hipótese nula) foi rejeitada, pode-se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma.

A Tabela 15 e a Figura 54 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos com resíduo de cobre para o ensaio de tração, identificando quais os materiais que se diferem.

Tabela 15 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, RC10, RC20, RC30 e RC40.

<b>Níveis</b>	<b>Centro</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>P-valor</b>
<b>RC10-MP</b>	-8,7325	-14,25512668	-3,20987332	0,001453688
<b>RC20-MP</b>	-0,655	-6,17762668	4,86762668	0,995882925
<b>RC30-MP</b>	2,3075	-3,21512668	7,83012668	0,706453114
<b>RC40-MP</b>	2,2825	-3,24012668	7,80512668	0,714377639
<b>RC20-RC10</b>	8,0775	2,256140342	13,89885966	0,004754317
<b>RC30-RC10</b>	11,04	5,218640342	16,86135966	0,000224227
<b>RC40-RC10</b>	11,015	5,193640342	16,83635966	0,000229857
<b>RC30-RC20</b>	2,9625	-2,858859658	8,783859658	0,541973725
<b>RC40-RC20</b>	2,9375	-2,883859658	8,758859658	0,549712255
<b>RC40-RC30</b>	-0,025	-5,846359658	5,796359658	0,999999992

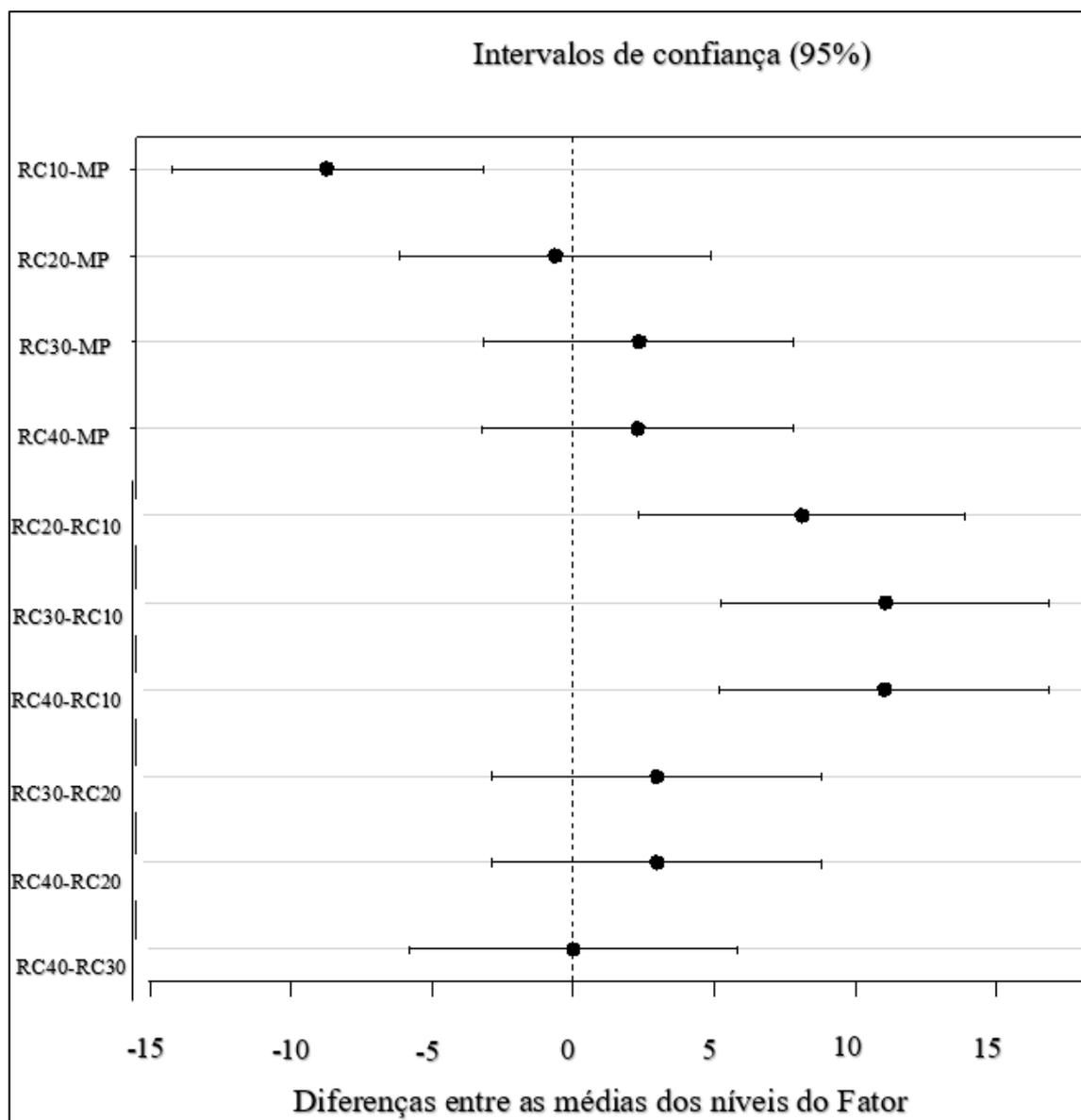
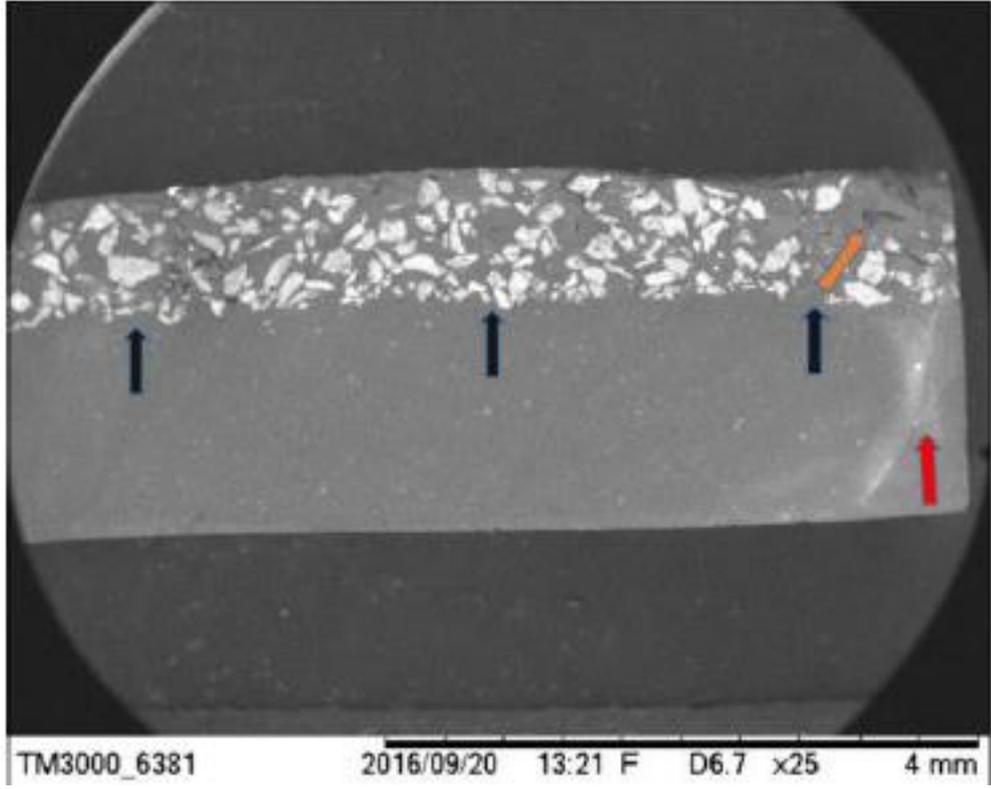


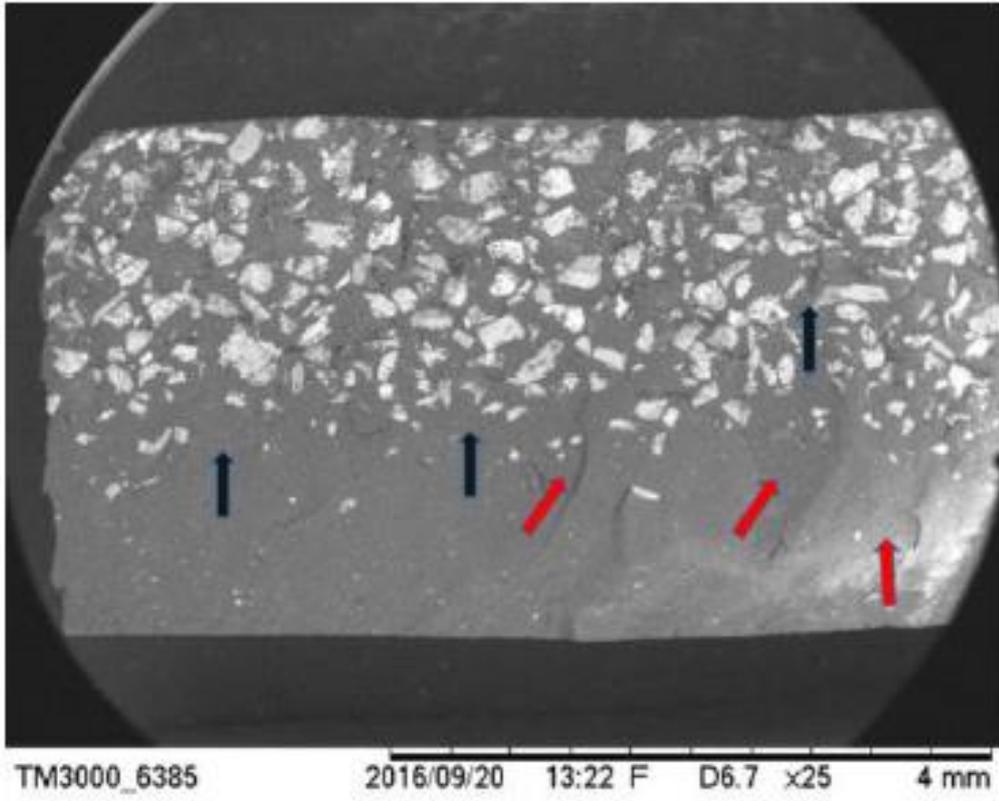
Figura 54 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

Com base nesses resultados pode-se afirmar que houve diferença significativa apenas entre MP-RC10, RC20-RC10, RC30-RC10 e RC40-RC10, sendo que nesses quatro casos, o compósito RC10 apresenta o menor valor de resistência à tração. Os demais tratamentos apresentaram resultados equivalentes, indicando que não há nenhuma diferença significativa entre o reforço com RC20, RC30 e RC40. Porém RC30 e RC40 apresentaram os maiores valores de resistência médias à tração quando comparados com a matriz plena.

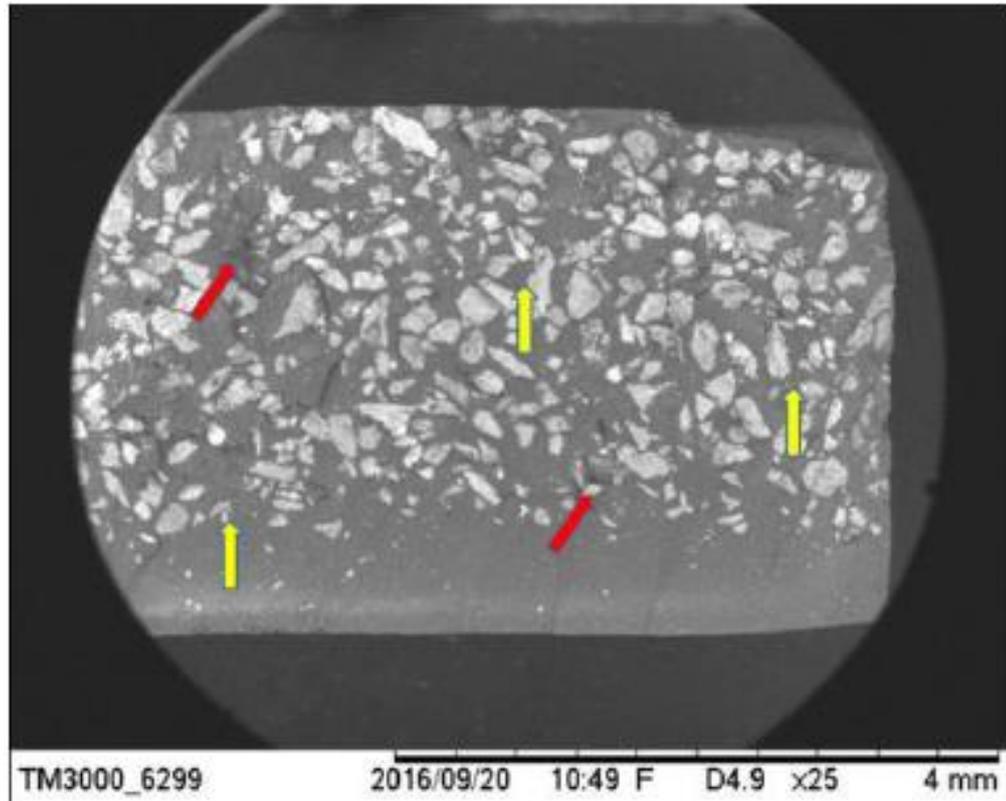
A Figura 55 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos com adição do resíduo de cobre nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%.



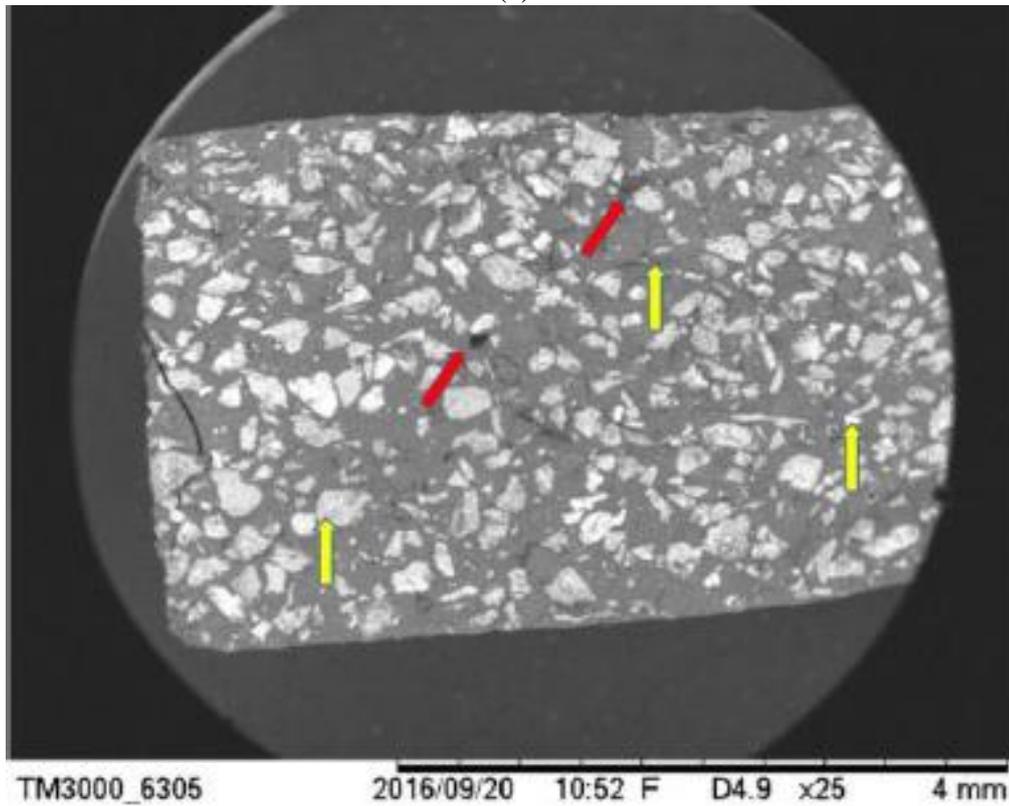
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 55 – Microscopia eletrônica de varredura: (a) RC10; (b) RC20; (c) RC30; (d) RC40.

As superfícies de fratura das Figuras 55 (a) e (b) dos compósitos com 10 % e 20% de resíduo de cobre, respectivamente, mostra uma superfície fraturada plana, com poucos vazios, porosidades ou defeitos (seta alaranjada), porém, observa-se algumas imperfeições (setas vermelhas) na superfície de fraturas que podem ser resultado da irradiação de trinca nessa direção. Além de mostrar a total sedimentação do resíduo de cobre, fatos esses que podem ter colaborado para a diminuição da resistência quando comparado com o compósito de matriz plena. Nas Figuras 55 (c) e (d) nota-se novamente a presença de poucos vazios, porosidades ou imperfeições, porém há um aumento da dispersão dos resíduos dentro da matriz, não se nota mais a sedimentação total no compósito. Com isso melhorando a homogeneização e compactação do resíduo de cobre na matriz e assim melhorando suas propriedades mecânicas.

#### 4.4.2.1.3 Compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira

Os compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira foram avaliados quanto a sua resistência mecânica através do ensaio de tração, onde foi obtido os valores de resistência, alongamento e módulo de elasticidade conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados obtidos através do ensaio de tração.

Fração mássica (%)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
<b>Matriz Plena</b>	32,00 ( $\pm 2,10$ )	3,20 ( $\pm 0,58$ )	0,96 ( $\pm 0,04$ )
<b>Fibra 1% Resíduo Cobre 10% (F1 RC10)</b>	19,87 ( $\pm 2,95$ )	1,69 ( $\pm 0,26$ )	2,27 ( $\pm 0,29$ )
<b>Fibra 2% Resíduo Cobre 10% (F2 RC10)</b>	23,58 ( $\pm 2,56$ )	1,98 ( $\pm 0,58$ )	2,49 ( $\pm 0,49$ )
<b>Fibra 1% Resíduo Cobre 20% (F1 RC20)</b>	26,69 ( $\pm 3,62$ )	1,93 ( $\pm 0,39$ )	2,91 ( $\pm 0,45$ )
<b>Fibra 2% Resíduo Cobre 20% (F2 RC20)</b>	32,68 ( $\pm 2,96$ )	2,33 ( $\pm 0,32$ )	3,10 ( $\pm 0,51$ )

Os resultados da Tabela 16 demonstram os resultados de resistência a tração da matriz plena e dos compósitos híbridos de resíduo de cobre com fibras de bananeira, onde verifica-se no geral que houve uma diminuição da resistência dos compósitos, com exceção da proporção de fibra 2% e resíduo de cobre 20%, onde obtiveram valores próximos quando comparados com a resistência da matriz plena. Entretanto todas as proporções dos compósitos híbridos obtiveram valores do seu módulo de elasticidade superiores ao módulo da matriz plena, e notou-se também que a rigidez do material aumentou à medida que se aumenta as frações de fibra e de resíduo de cobre na matriz.

A Figura 56 ilustra o gráfico comparativo dos compósitos puros e dos compósitos híbridos com adição de cobre e reforçados com fibras de bananeira.

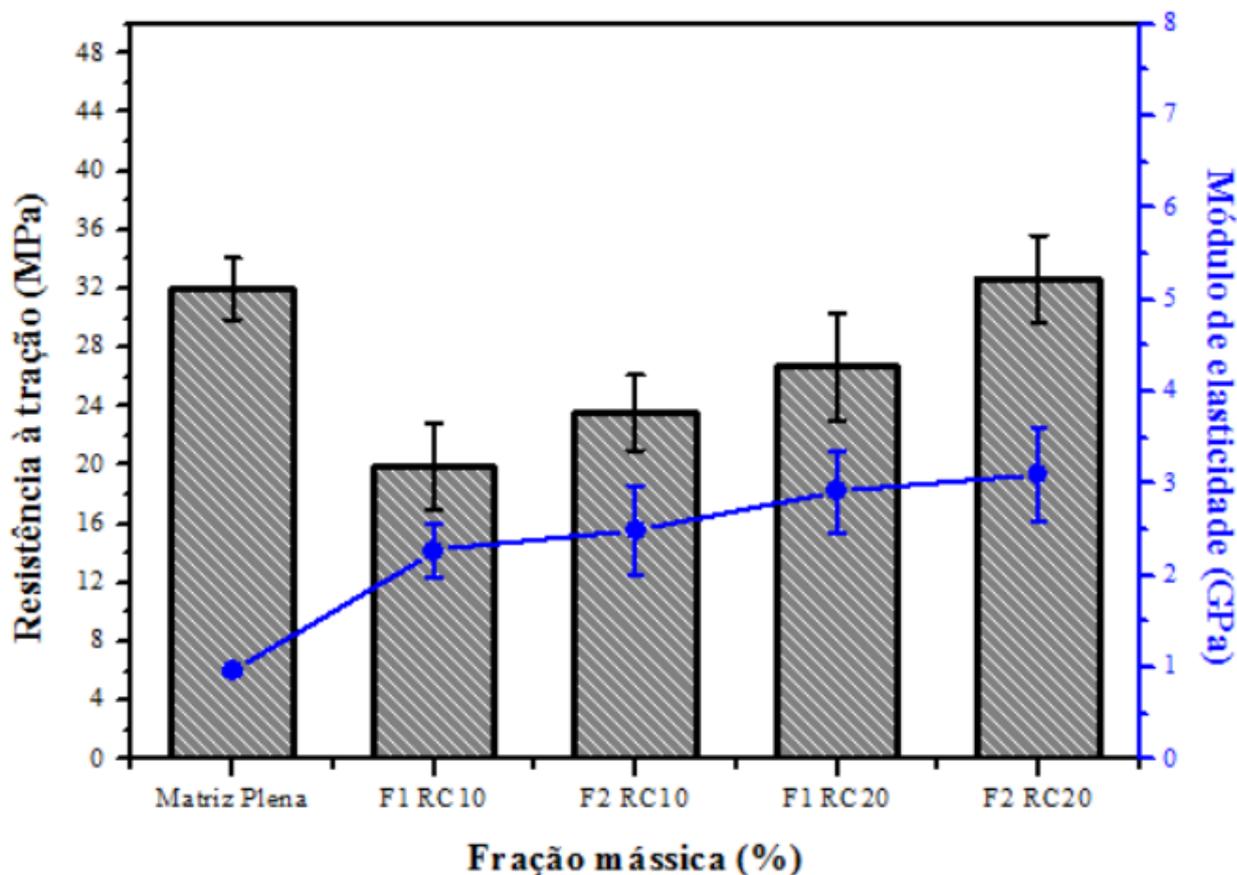


Figura 56 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

A Tabela 17 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de tração dos compósitos híbridos (F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20) seguindo os mesmos parâmetros estatísticos utilizados nos tratamentos anteriores.

Tabela 17 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de tração dos compósitos híbridos.

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	469,76207	4	117,44051	13,30374	7,98597E-05	3,055568
Dentro dos grupos	132,414425	15	8,8276283			
Total	602,176495	19				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (13,30) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,06) ao nível de significância 5%, mostra portanto uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese  $H_0$ , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (resistência à tração) com grau de confiança superior a 95% de probabilidade. Pelo  $P\text{-valor} < \alpha$

constata-se que os tratamentos das frações do compósito híbrido foram significativos na tração. Como  $H_0$  (hipótese nula) foi rejeitada, pode-se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma.

A Tabela 18 e a Figura 57 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos híbridos para o ensaio de tração, identificando quais os materiais que se diferem.

Tabela 18 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
F1 RC20-F1 RC10	6,818	1,339159774	12,29684023	0,010432514
F2 RC10-F1 RC10	3,71	-1,768840226	9,188840226	0,289853824
F2 RC20-F1 RC10	12,808	7,329159774	18,28684023	7,89E-06
MP-F1 RC10	12,13	6,651159774	17,60884023	1,69983E-05
F2 RC10-F1 RC20	-3,108	-8,586840226	2,370840226	0,457537424
F2 RC20-F1 RC20	5,99	0,511159774	11,46884023	0,027904423
MP-F1 RC20	5,312	-0,166840226	10,79084023	0,060158508
F2 RC20-F2 RC10	9,098	3,619159774	14,57684023	0,000632057
MP-F2 RC10	8,42	2,941159774	13,89884023	0,001458469
MP-F2 RC20	-0,678	-6,156840226	4,800840226	0,995657116

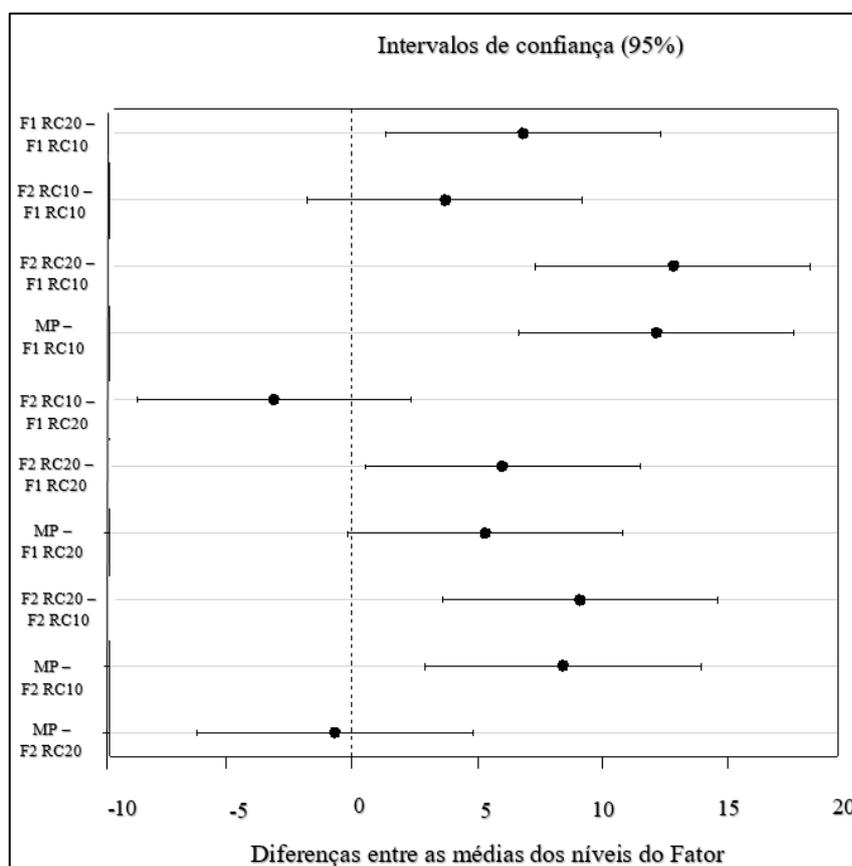
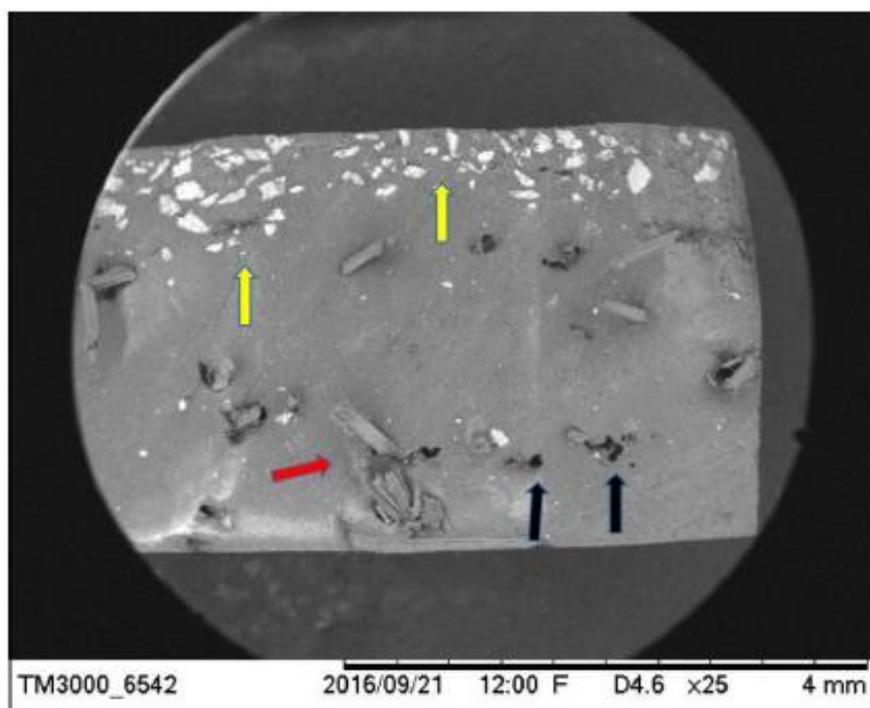


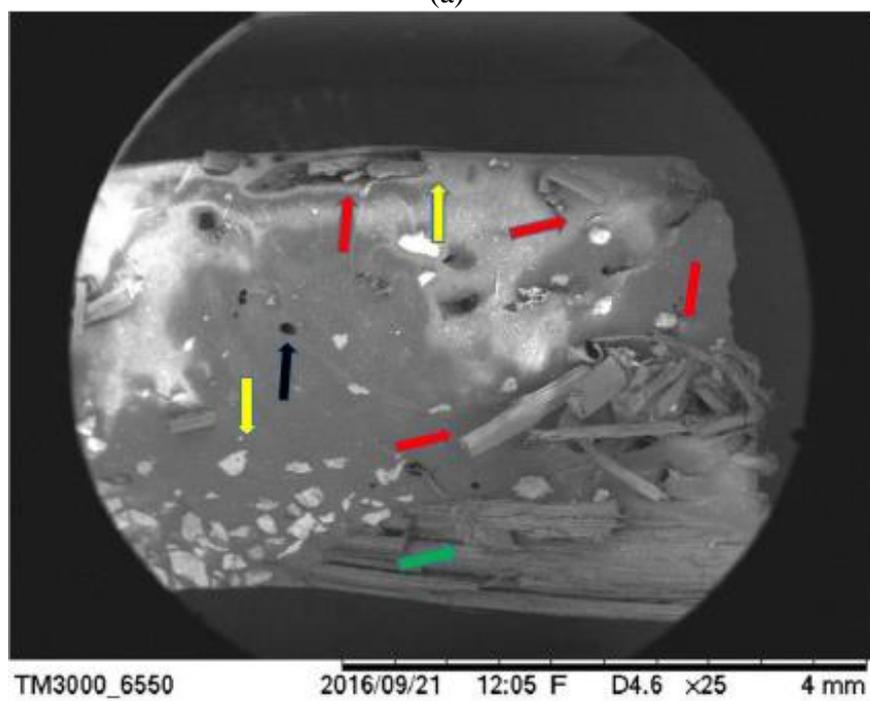
Figura 57 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

Apenas os tratamentos F2 RC20-F1 RC10, F2 RC10-F1 RC20, MP-FI RC20 e MP-F2 RC20 apresentaram resultados equivalentes, indicando que não houve diferença significativa entre essas frações. Os demais tratamentos mostraram valores estatisticamente significativos, na qual apenas MP e F2 RC20 apresentaram os melhores resultados de resistência à tração.

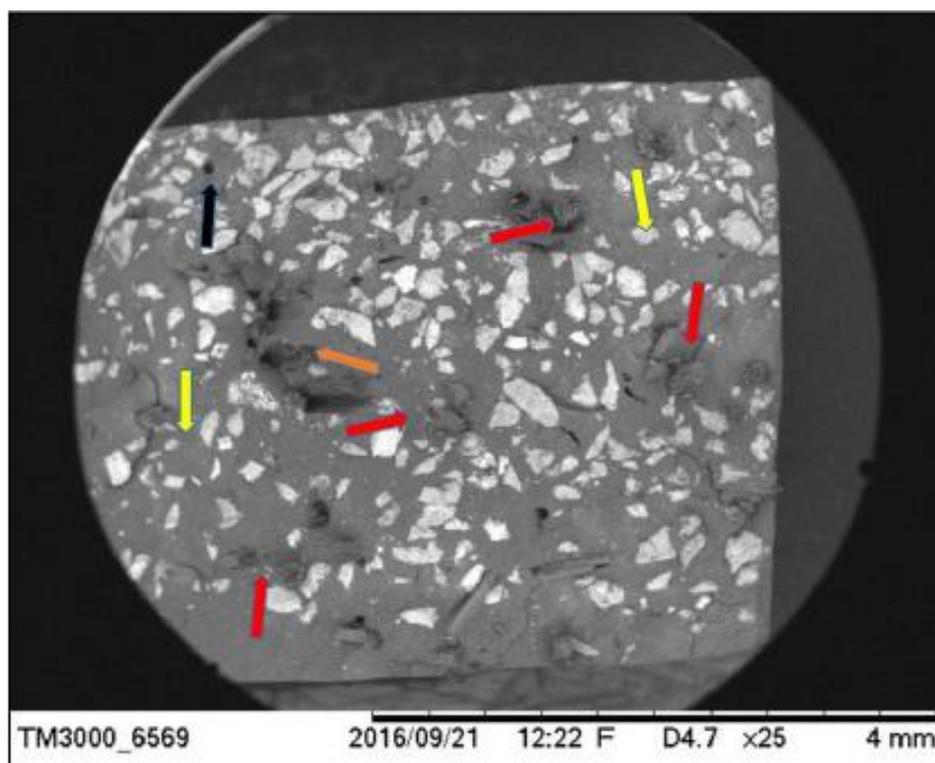
A Figura 58 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de tração dos compósitos híbridos com adição de cobre e reforçados com fibras de bananeira.



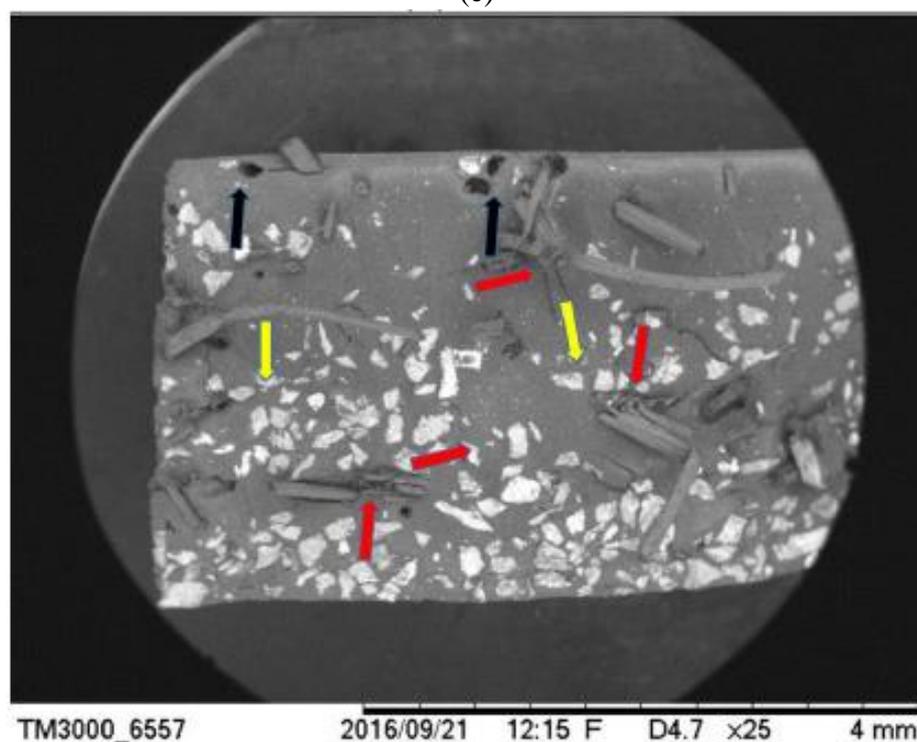
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 58 – Microscopia eletrônica de varredura: (a) F1 RC10; (b) F2 RC10; (c) F1 RC20; (d) F2 RC20.

A Figura 58 (a) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com fibras de 1% e resíduo com 10%, e nela pode-se perceber uma quantidade mínima de fibras presente na matriz junto com a total sedimentação do resíduo no compósito (setas amarelas), também

pode se perceber a presença de alguns mecanismos de falha, como por exemplo, pull-out (seta azul), e uma menor incidência de fibras faturadas (seta vermelha). A Figura 58 (b) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com fibras de 2% e resíduo com 10%, e nela pode-se perceber uma maior quantidade de fibras presente na matriz, e também pode se perceber uma presença de vários mecanismos de falha, como por exemplo, uma maior incidência de pull-out (seta azul), aparecimento de fibras descoladas da matriz (seta verde), sedimentação total do resíduo na matriz, e uma maior incidência de fibras faturadas dispostas no sentido do carregamento, fator este que pode ser determinante para o aumento de sua resistência quando comparado com o compósito discutido anteriormente. Na Figura 58 (c) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com fibras de 1% e resíduo com 20%, e nela nota-se uma melhor dispersão do resíduo dentro da matriz e a presença de algumas fibras rompidas (seta vermelha), entretanto a presença de mecanismos de falha ainda são consideráveis e isso auxiliou na diminuição de suas propriedades. E por fim a Figura 58 (d) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com fibras de 2% e resíduo com 20%, na qual há uma boa dispersão do resíduo junto com uma maior quantidade de fibras dispostas na direção do carregamento e com suas superfícies fraturadas (setas vermelhas), onde mesmo com a presença de alguns pull-out (seta azul), obteve os melhores resultados de todos os compósitos híbridos fabricados quando comparados a sua resistência à tração.

#### 4.4.2.2 Ensaio de flexão

##### 4.4.2.2.1 Compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira foram avaliados quanto a sua resistência a flexão através do ensaio de flexão em 3 (três) pontos, onde foi obtido os seguintes resultados, de tensão de flexão, deflexão e módulo de flexão, conforme a Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão.

<b>Fração mássica (%)</b>	<b>Tensão de Flexão (MPa)</b>	<b>Deflexão (mm)</b>	<b>Módulo de flexão (GPa)</b>
<b>Matriz Plena</b>	76 ( $\pm 6,14$ )	2,36 ( $\pm 0,37$ )	5,82 ( $\pm 0,62$ )
<b>Fibra 1% (F1)</b>	139,11 ( $\pm 19,38$ )	1,47 ( $\pm 0,32$ )	14,42 ( $\pm 1,93$ )
<b>Fibra 2% (F2)</b>	156,03 ( $\pm 2,43$ )	1,33 ( $\pm 0,30$ )	17,78 ( $\pm 0,47$ )
<b>Fibra 3% (F3)</b>	115,98 ( $\pm 15,44$ )	1,12 ( $\pm 0,40$ )	18,06 ( $\pm 2,23$ )

A resistência à flexão é associada à eficiência do material de resistir à força de dobragem aplicada perpendicularmente ao seu eixo longitudinal. Conforme mostra a Tabela 19, a adição

de fibras de bananeira no compósito polimérico indicou um aumento de sua resistência à flexão e módulo de flexão quando comparados com a matriz plena. Diferentemente do ocorrido nos resultados de ensaio de tração, todas as proporções das fibras tiveram um aumento considerável na sua resistência à flexão, em específico para a fração de 2%, na qual seu aumento foi de aproximadamente 50%. Os resultados apresentados indicam que as incorporações de fibras de bananeira podem fazer com que o compósito se torne mais resistente, podendo correlacioná-los a uma boa adesão da fibra com a matriz poliéster.

O módulo de flexão é uma propriedade aditiva, dessa forma, quanto maior o percentual de fibras, linearmente o valor do módulo será aumentado. A Figura 59 ilustra o gráfico comparativo da matriz plena e dos compósitos reforçados com fibras de bananeira nas frações 1%, 2% e 3% quanto ao seu módulo de flexão.

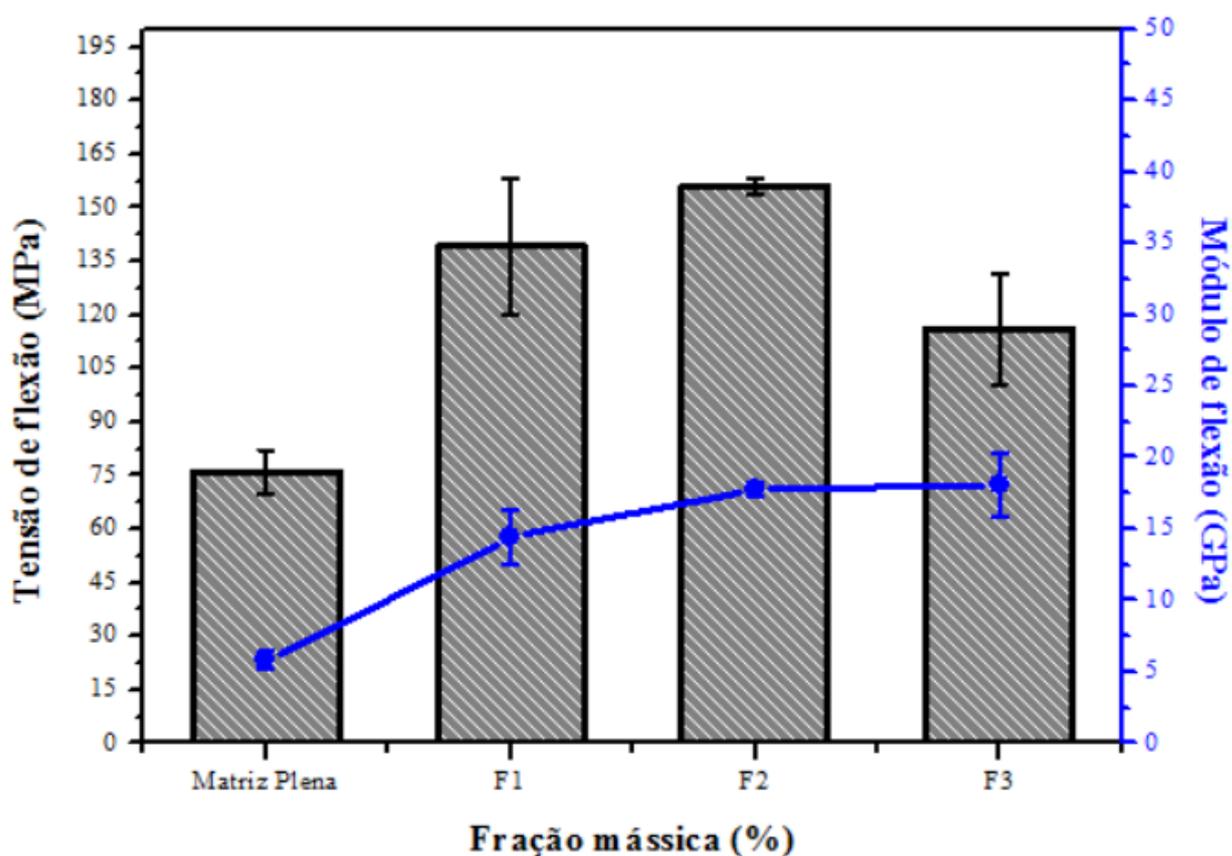


Figura 59 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

Seguindo o mesmo procedimento estatístico dos tratamentos anteriores, a Tabela 20 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras de bananeira.

Tabela 20 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras.

## ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	13987,06034	3	4662,353448	34,67024204	6,69625E-06	3,587433702
Dentro dos grupos	1479,24805	11	134,4770954			
Total	15466,30839	14				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (34,67) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,59) ao nível de significância 5%, se aceita a hipótese de que existe diferença significativa entre as resistências à flexão dos materiais estudados, rejeitando assim  $H_0$ . Sendo  $P\text{-valor} < \alpha$  ratifica que deve existir, pelo menos um contraste significativo entre as médias dos valores tratados. Assim, foi utilizado o método de Tukey para identificar quais os compósitos que se diferem.

A Tabela 21 e a Figura 60 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos reforçados com fibras de bananeira para o ensaio de flexão.

Tabela 21 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1, F2 e F3.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
<b>F2-F1</b>	16,92913386	-6,057252035	39,91551975	0,190646267
<b>F3-F1</b>	-23,12992126	-47,51066527	1,25082275	0,065828866
<b>MP-F1</b>	-63,10761155	-86,09399744	-40,12122566	5,34552E-06
<b>F3-F2</b>	-40,05905512	-64,43979913	-15,67831111	0,001353219
<b>MP-F2</b>	-80,03674541	-103,0231313	-57,05035951	2,62067E-07
<b>MP-F3</b>	-39,97769029	-64,3584343	-15,59694628	0,001378549

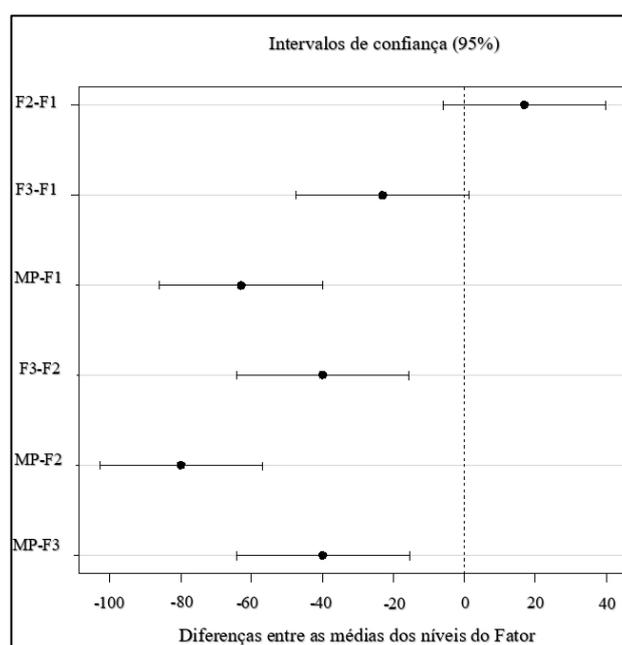
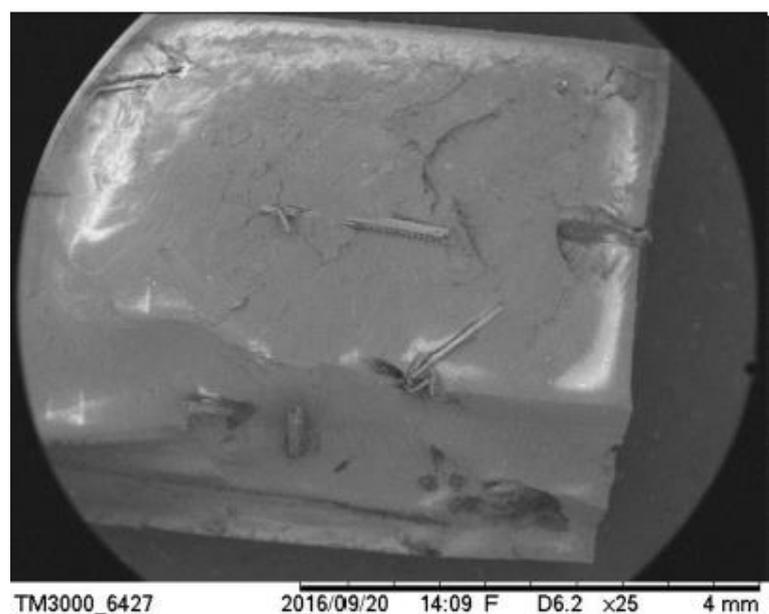


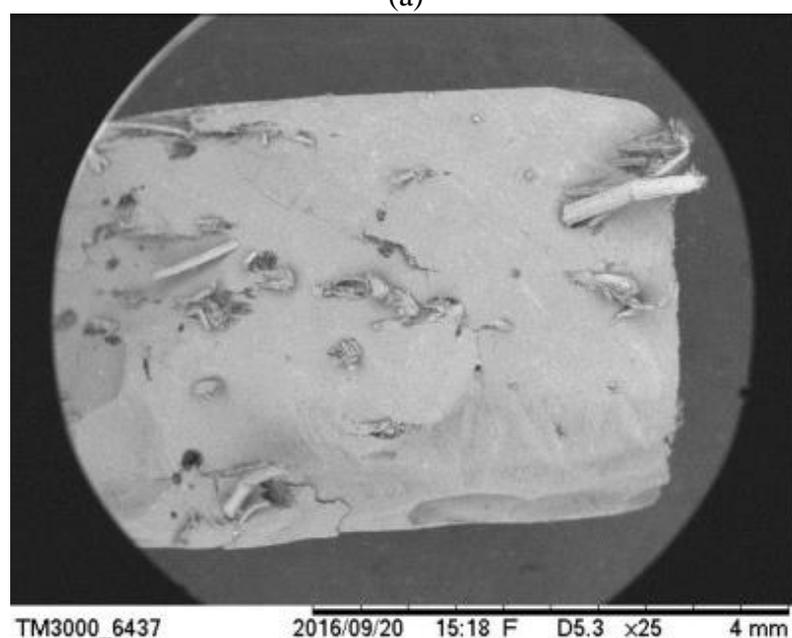
Figura 60 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

Os tratamentos F2-F1 e F3-F1 apresentaram resultados equivalentes, indicando que não há nenhuma diferença significativa entre os reforços de fibra de bananeira de 1%, 2% e 3%, sendo significativa a inclusão do reforço. Sendo que o compósito reforçado com fibras de bananeira com 2% apresentou as maiores resistências médias à flexão quando comparado com a matriz plena.

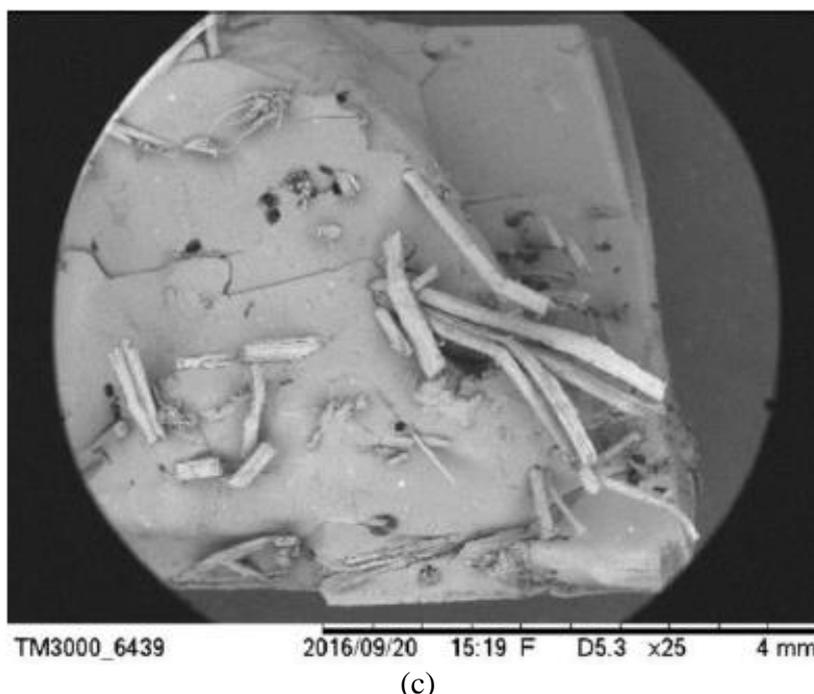
A Figura 61 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de flexão dos compósitos de matriz plena e os compósitos reforçados com as fibras de 1%, 2% e 3%.



(a)



(b)



(c)

Figura 61 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de flexão: (a) Fibra 1%; (b) Fibra 2%; (c) Fibra 3%.

Na Figura 61 tem-se a superfície de fratura do compósito polimérico reforçado com fibras, onde nota-se que apesar da presença de alguns mecanismos de falha, como o pull-out, percebe-se uma maior presença de fibras rompidas e todas no sentido de ação do carregamento, indicando assim uma boa adesão na interface fibra/matriz e conseqüentemente acaba apresentando uma resistência superior quando comparados com a matriz plena.

#### 4.4.2.2.2 Compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre

Os compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre foram avaliados quanto a sua resistência a flexão através do ensaio de flexão em 3 (três) pontos, onde foi obtido os seguintes resultados, de tensão de flexão, deflexão e módulo de flexão, conforme a Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão.

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
<b>Matriz Plena</b>	76 ( $\pm 6,14$ )	2,36 ( $\pm 0,37$ )	5,8 ( $\pm 0,6$ )
<b>Resíduo Cobre 10% (RC10)</b>	115,81 ( $\pm 9,11$ )	0,96 ( $\pm 0,11$ )	26,1 ( $\pm 1,5$ )
<b>Resíduo Cobre 20% (RC20)</b>	107,44 ( $\pm 14,58$ )	0,71 ( $\pm 0,15$ )	25,9 ( $\pm 4,9$ )
<b>Resíduo Cobre 30% (RC30)</b>	104,10 ( $\pm 4,46$ )	0,70 ( $\pm 0,09$ )	27,1 ( $\pm 2,8$ )
<b>Resíduo Cobre 40% (RC40)</b>	153,21 ( $\pm 13,17$ )	0,82 ( $\pm 0,20$ )	45,3 ( $\pm 8,3$ )

Através dos resultados da Tabela 22 nota-se que a resistência à flexão dos compósitos poliméricos com resíduos de flotação do minério de cobre apresentam um aumento quando se aumenta sua fração. Para os valores encontrados pelas frações de 10% e 20% ainda se nota a fácil sedimentação dos resíduos ocorrerem na matriz plena. Porém, a medida que se aumenta a fração do resíduo de cobre na matriz tem-se uma melhor distribuição dentro do compósito, melhorando a homogeneização e compactação. Fato este ocorrido com os compósitos poliméricos reforçados 40%, tendo um aumento não só na sua resistência à flexão, como também no seu módulo de flexão, chegando a ser superior a 50%. O mesmo acontece para o modulo de flexão dos outros compósitos, na qual tem-se o aumento de sua rigidez com aumento da fração de resíduo, obtendo valores acima da matriz plena e próximos aos valores encontrados com os compósitos reforçados com fibras de bananeira. Também pode-se perceber a influência que o resíduo de flotação do minério de cobre exerce sobre a deflexão na parte comprimida durante o ensaio de flexão, na qual nota-se a diminuição da deflexão do compósito e consequentemente aumentando a tensão de flexão, diferentemente ao que aconteceu em relação à tração do compósito.

A Figura 62 ilustra o gráfico comparativo da matriz plena e dos compósitos com a adição do resíduo de cobre nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%.

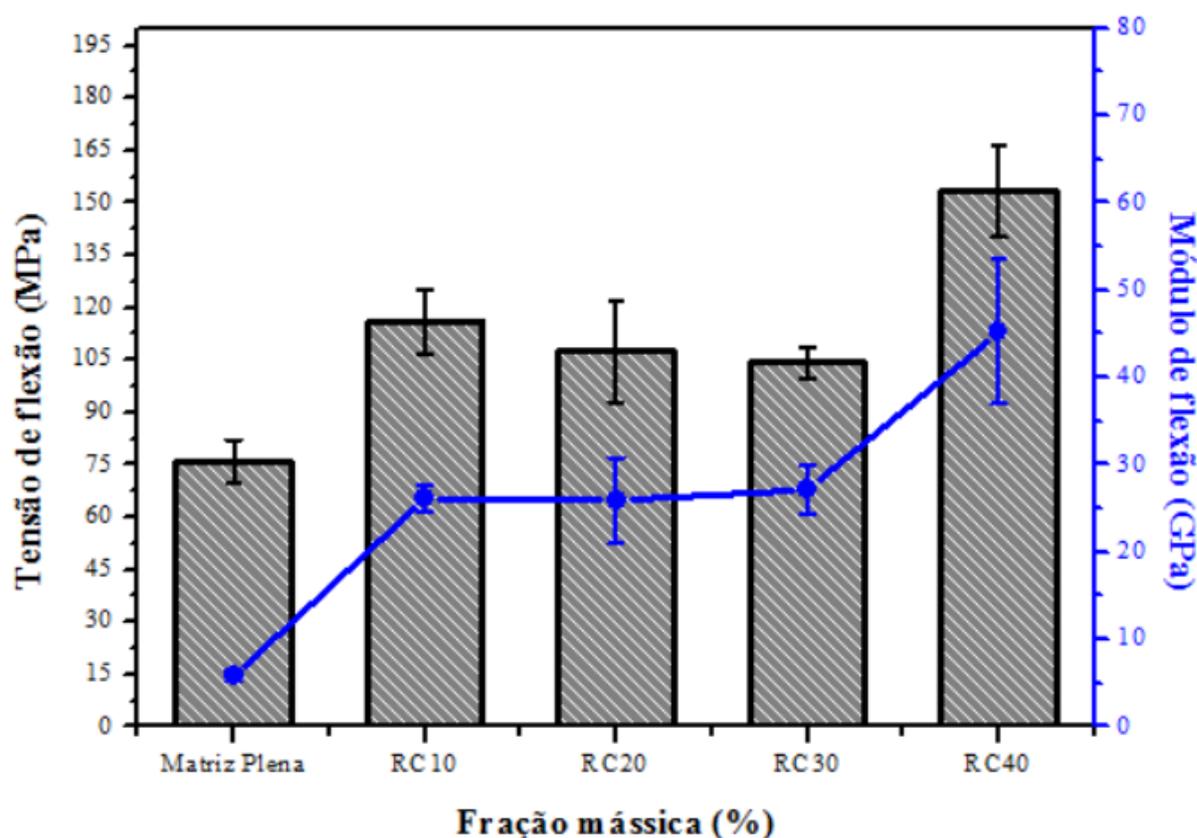


Figura 62 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

Seguindo o mesmo procedimento estatístico dos tratamentos anteriores, a Tabela 23 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de flexão dos compósitos reforçados com resíduos de cobre.

Tabela 23 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de flexão dos compósitos reforçados com resíduos de cobre.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	10661,1986	4	2665,29965	20,21342795	8,80352E-05	3,478049691
Dentro dos grupos	1318,578747	10	131,8578747			
Total	11979,77735	14				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (20,21) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,48) ao nível de significância 5%, mostra portanto uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese  $H_0$ , concluindo que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a resistência à flexão com grau de confiança superior a 95% de probabilidade. Pelo P-valor  $< \alpha$  constata-se que os tratamentos das frações de resíduo foram significativos na flexão. Como  $H_0$  (hipótese nula) foi rejeitada, pode-se verificar que os tratamentos diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma.

A Tabela 24 e a Figura 63 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos com resíduo de cobre para o ensaio de flexão, identificando essa diferença.

Tabela 24 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, RC10, RC20, RC30 e RC40.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
<b>RC10-MP</b>	39,81364829	18,36885892	61,25843767	0,000327821
<b>RC20-MP</b>	31,44750656	10,00271718	52,89229594	0,003130676
<b>RC30-MP</b>	28,111986	4,765856394	51,45811561	0,015031743
<b>RC40-MP</b>	77,2152231	55,77043372	98,66001248	1,07949E-07
<b>RC20-RC10</b>	-8,366141732	-30,97093452	14,23865106	0,781975367
<b>RC30-RC10</b>	-11,70166229	-36,11762906	12,71430448	0,589622868
<b>RC40-RC10</b>	37,4015748	14,79678201	60,0063676	0,001036115
<b>RC30-RC20</b>	-3,33552056	-27,75148733	21,08044621	0,992669331
<b>RC40-RC20</b>	45,76771654	23,16292374	68,37250933	0,000130216
<b>RC40-RC30</b>	49,1032371	24,68727032	73,51920387	0,000140125

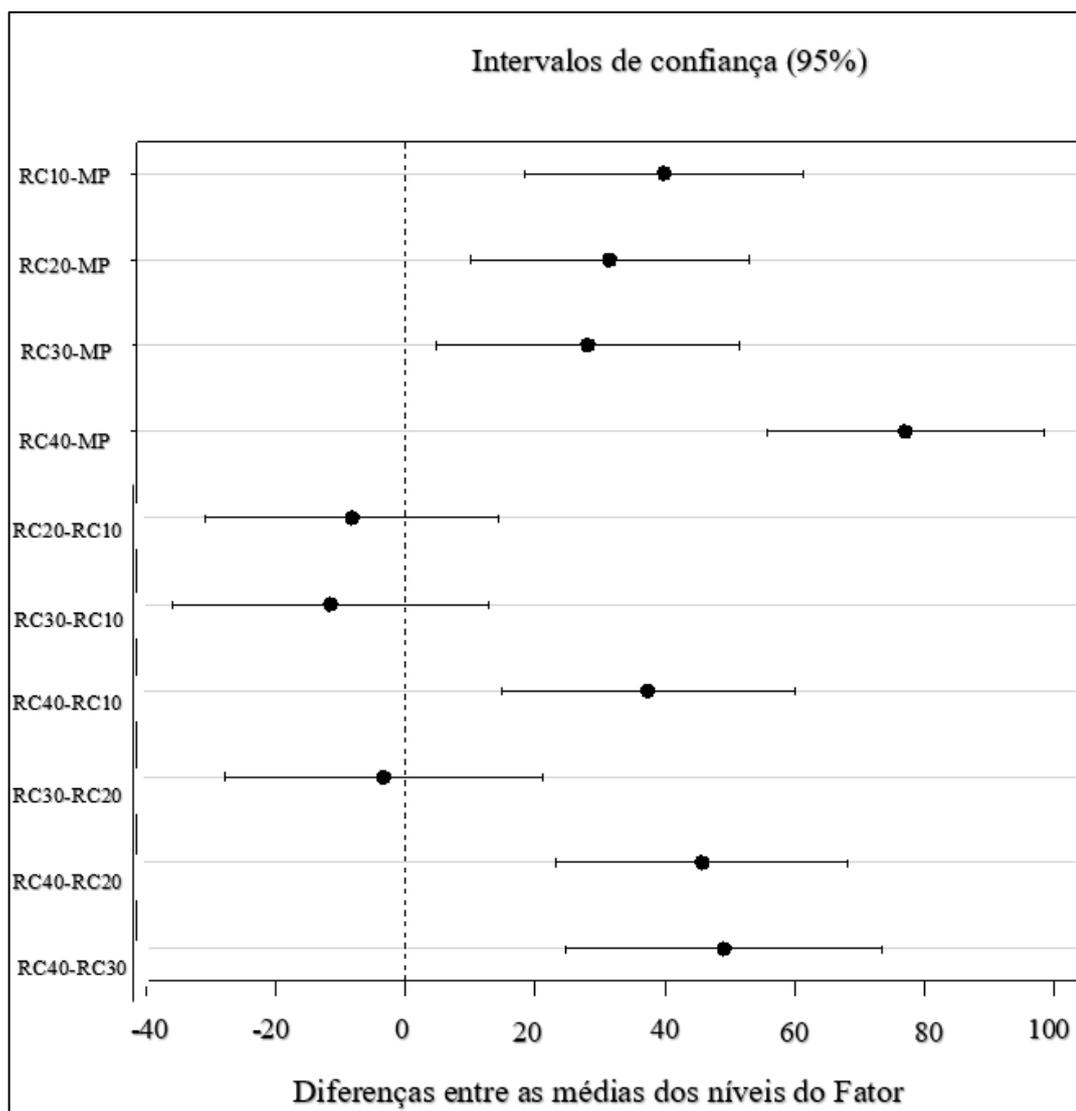
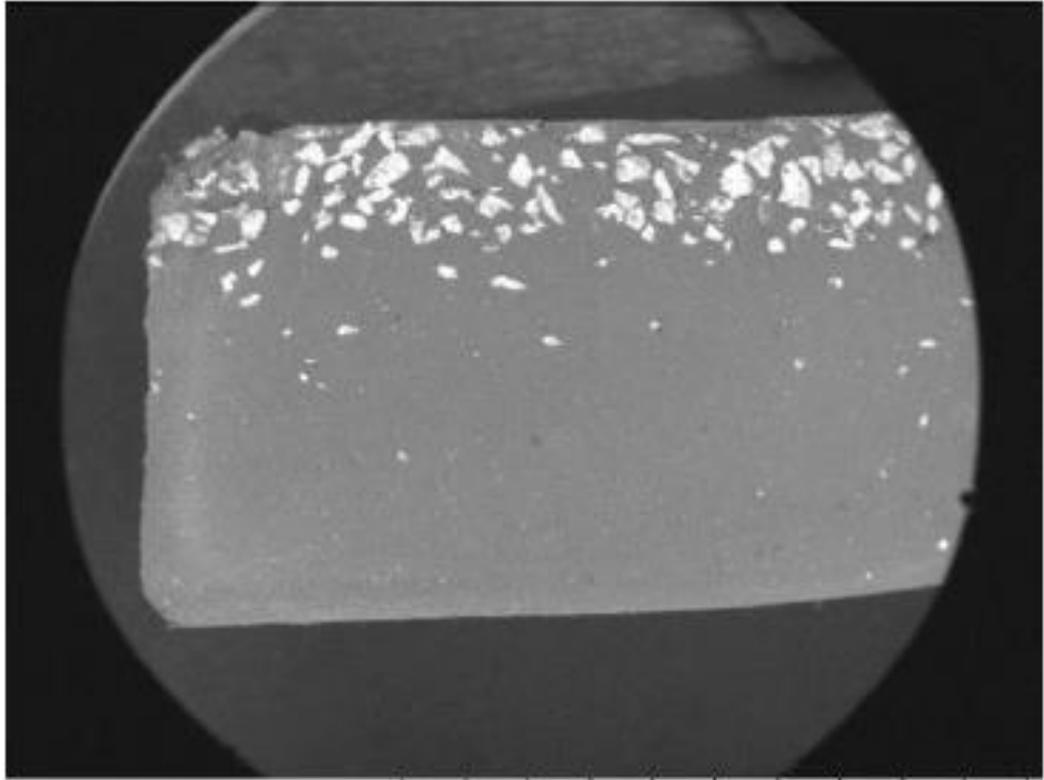


Figura 63 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

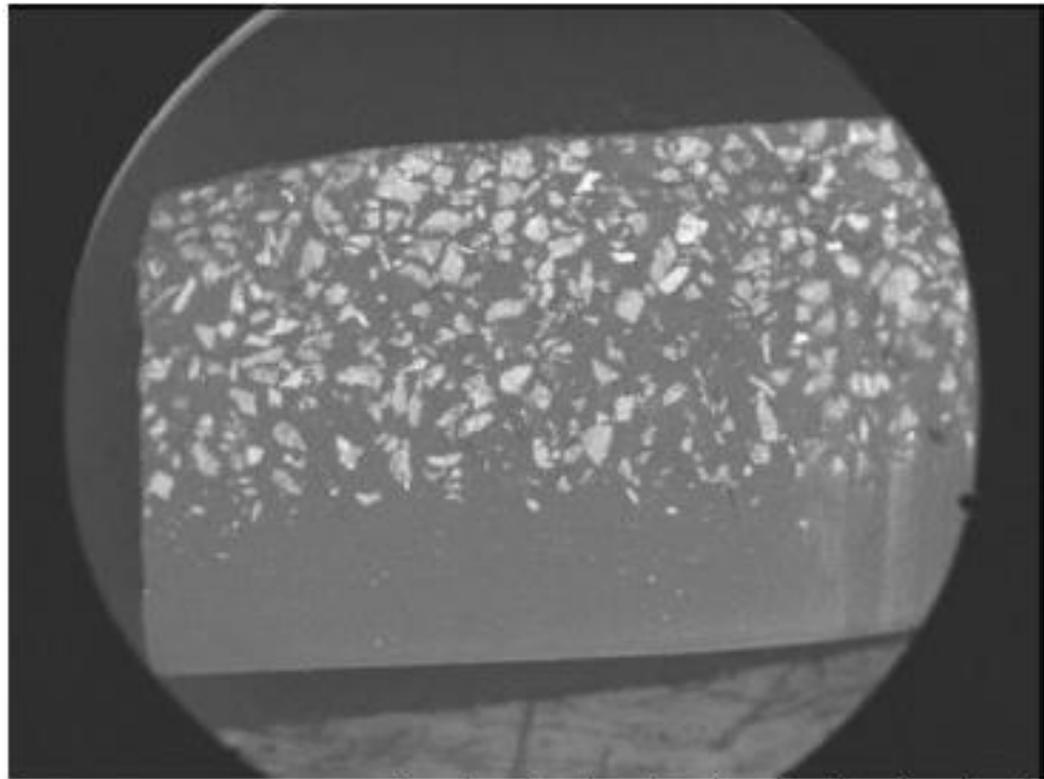
Com base nesses resultados pode-se afirmar que os tratamentos RC20-RC10, RC30-RC10 e RC30-RC20 apresentaram resultados equivalentes, indicando que não há nenhuma diferença significativa entre os reforços RC10, RC20 e RC30. Houve diferença significativa apenas entre os tratamentos envolvendo a matriz plena e o resíduo de cobre com 40%, onde o RC40 apresentou o maior valor de resistência média à flexão quando comparado com os outros tratamentos.

A Figura 64 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de flexão dos compósitos de matriz plena e os compósitos reforçados com resíduo de cobre nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%.



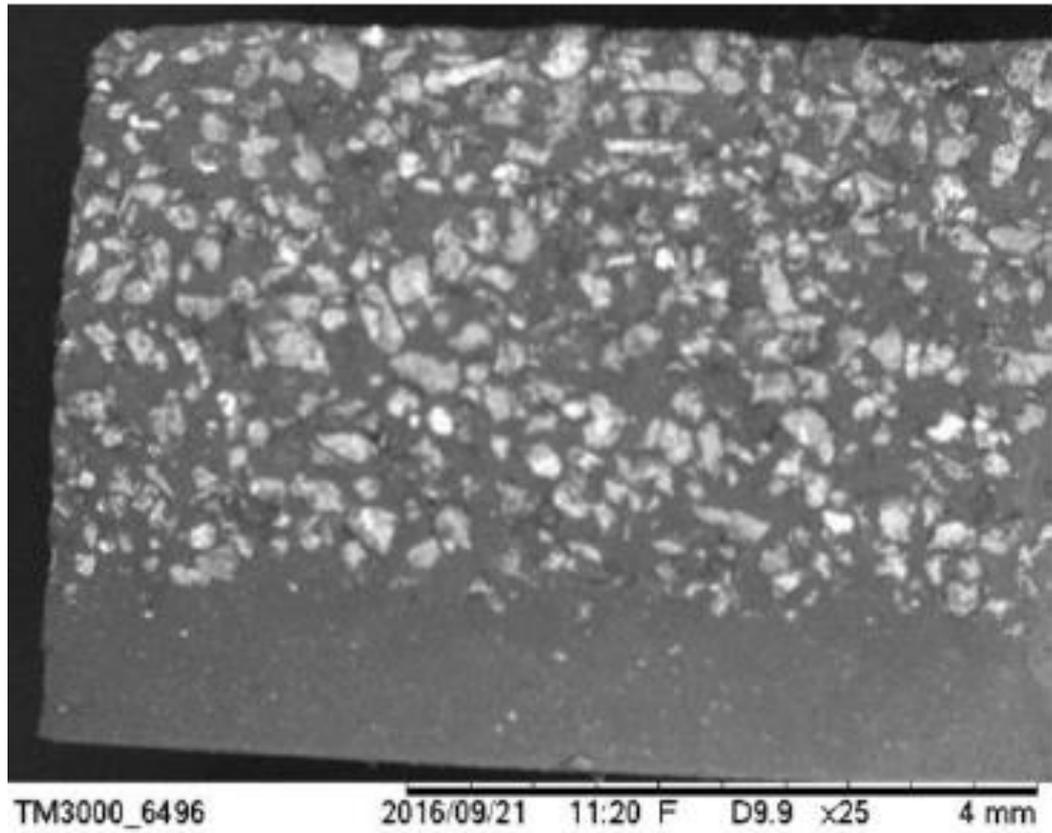
TM3000\_6476 2016/09/21 11:04 F D5.3 x25 4 mm

(a)

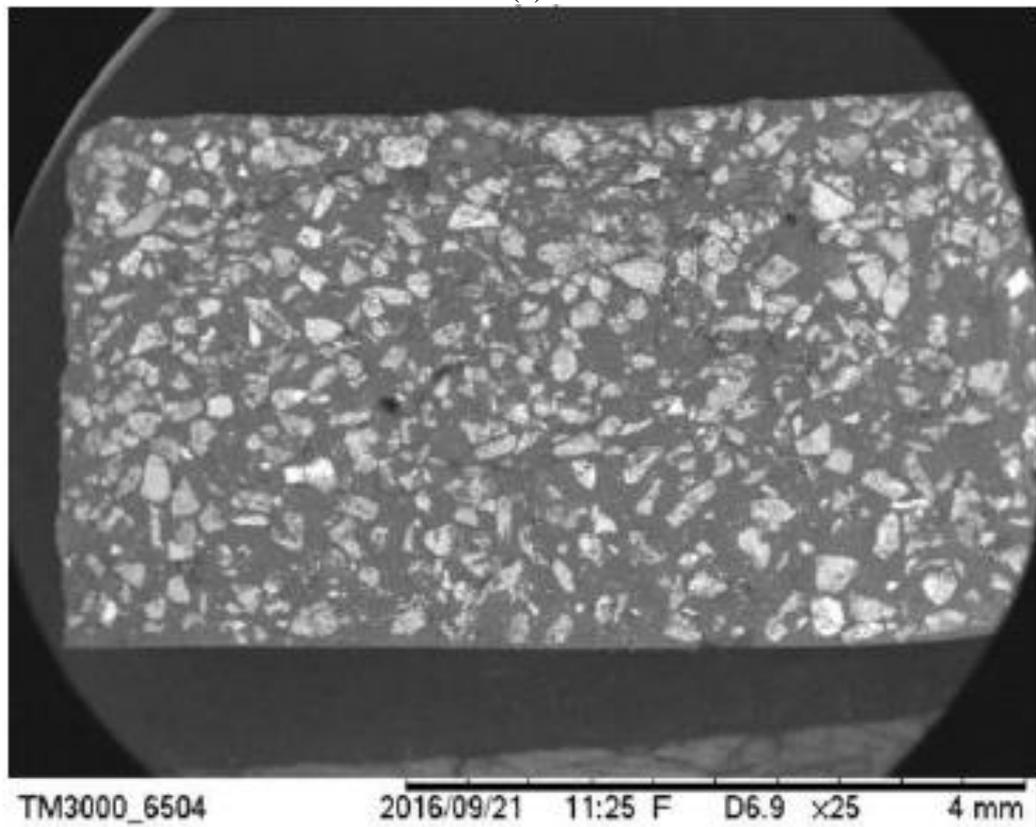


TM3000\_6489 2016/09/21 11:11 F D5.3 x25 4 mm

(b)



(c)



(d)

Figura 64 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de flexão: (a) RC10; (b) RC20; (c) RC30; (d) RC40.

As superfícies de fratura das Figuras 64 dos compósitos com resíduo de cobre, mostram uma superfície fraturada plana, com poucos vazios, porosidades ou defeitos, porém, observa-se algumas imperfeições na superfície de fraturas que podem ser resultado da irradiação de trinca nessa direção. Além de mostrar a sedimentação do resíduo de cobre, para a fração de 10% e 20%, a medida que aumenta a fração de resíduo na matriz polimérica, as partículas de cobre começam a se dispersar melhor dentro dela, obtendo uma melhor acomodação e compactação, fatos esses que podem ter colaborado para aumento da resistência à flexão para RC40 quando comparado com a matriz plena.

#### 4.4.2.2.3 Compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira

Os compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira foram avaliados quanto a sua resistência a flexão através do ensaio de flexão em 3 (três) pontos, onde foi obtido os seguintes resultados, de tensão de flexão, deflexão e modulo de flexão, conforme a Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados obtidos através do ensaio de flexão.

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
<b>Matriz Plena</b>	76 ( $\pm 6,1$ )	2,36 ( $\pm 0,37$ )	5,82 ( $\pm 0,6$ )
<b>Fibra 1% Resíduo Cobre 10% (F1 RC10)</b>	92,36 ( $\pm 4,77$ )	1,11 ( $\pm 0,43$ )	12,5 ( $\pm 5,4$ )
<b>Fibra 2% Resíduo Cobre 10% (F2 RC10)</b>	142,39 ( $\pm 12,54$ )	1,45 ( $\pm 0,33$ )	18,8 ( $\pm 2,5$ )
<b>Fibra 1% Resíduo Cobre 20% (F1 RC20)</b>	107,94 ( $\pm 7,27$ )	1,64 ( $\pm 0,25$ )	18,9 ( $\pm 1,8$ )
<b>Fibra 2% Resíduo Cobre 20% (F2 RC20)</b>	198,16 ( $\pm 12,35$ )	1,41 ( $\pm 0,19$ )	25,5 ( $\pm 4,0$ )

De acordo com a Tabela 25, os resultados obtidos mostram o aumento da resistência à flexão quando se aumenta as proporções de fibras e resíduo no compósito híbrido, principalmente o compósito F1 RC20 que teve um aumento de aproximadamente 65% em relação a matriz plena. Tornando o resíduo constante em 10% na sua fração e aumentando apenas a fração de fibra no compósito, pode-se notar a aumento tanto da resistência a flexão quanto do modulo de elasticidade quando comparados com a matriz plena. Ao mesmo acontece quando se tem o aumento da fração de resíduo para 20% e mantendo a fração de fibra em 1%.

A Figura 65 ilustra o gráfico comparativo dos compósitos puros e dos compósitos híbridos com adição de cobre e reforçados com fibras de bananeira.

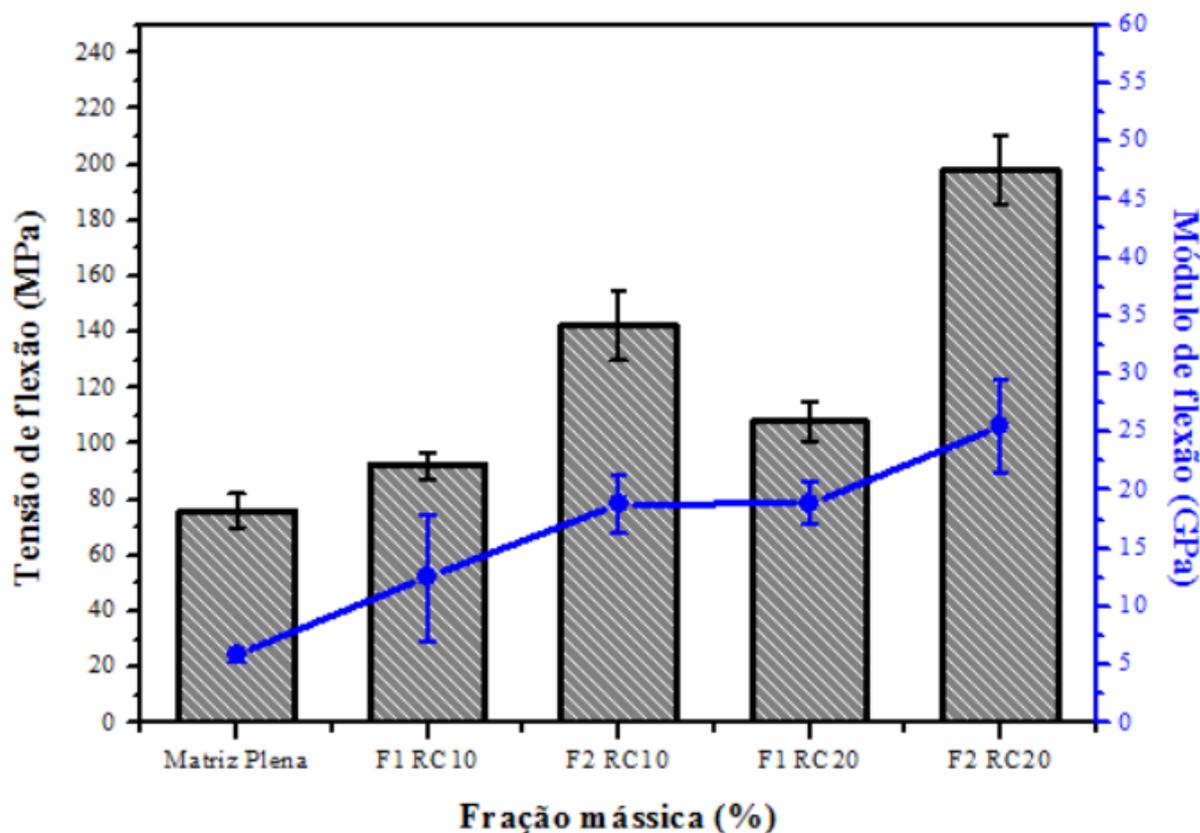


Figura 65 - Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

A Tabela 26 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de flexão dos compósitos híbridos (F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20) seguindo os mesmos parâmetros estatísticos utilizados nos tratamentos anteriores.

Tabela 26 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de flexão dos compósitos híbridos.

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	28460,756	4	7115,189	126,0619	4,13587E-09	3,356690
Dentro dos grupos	620,86207	11	56,44200			
Total	29081,618	15				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (126,06) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,36) ao nível de significância 5%, mostra portanto uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese  $H_0$ , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (resistência à flexão) com grau de confiança superior a 95% de probabilidade. Pelo  $P\text{-valor} < \alpha$  constata-se que os tratamentos das frações do compósito híbrido foram significativos na flexão. Como  $H_0$  (hipótese nula) foi rejeitada, pode-se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma.

A Tabela 27 e a Figura 66 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos híbridos para o ensaio de flexão, identificando quais os materiais que se diferem.

Tabela 27 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
<b>F1 RC20-F1 RC10</b>	15,5839895	-4,068403913	35,23638292	0,157628192
<b>F2 RC10-F1 RC10</b>	50,0328084	30,38041498	69,68520181	6,75647E-06
<b>F2 RC20-F1 RC10</b>	105,8070866	86,1546932	125,45948	1,581E-10
<b>MP-F1 RC10</b>	-16,35564304	-34,99954044	2,288254355	0,100455234
<b>F2 RC10-F1 RC20</b>	34,4488189	14,79642548	54,10121231	0,000519153
<b>F2 RC20-F1 RC20</b>	90,22309711	70,5707037	109,8754905	1,83156E-09
<b>MP-F1 RC20</b>	-31,93963255	-50,58352995	-13,29573515	0,000657474
<b>F2 RC20-F2 RC10</b>	55,77427822	36,1218848	75,42667163	1,6423E-06
<b>MP-F2 RC10</b>	-66,38845144	-85,03234884	-47,74455404	7,26073E-08
<b>MP-F2 RC20</b>	-122,1627297	-140,8066271	-103,5188323	8,885E-12

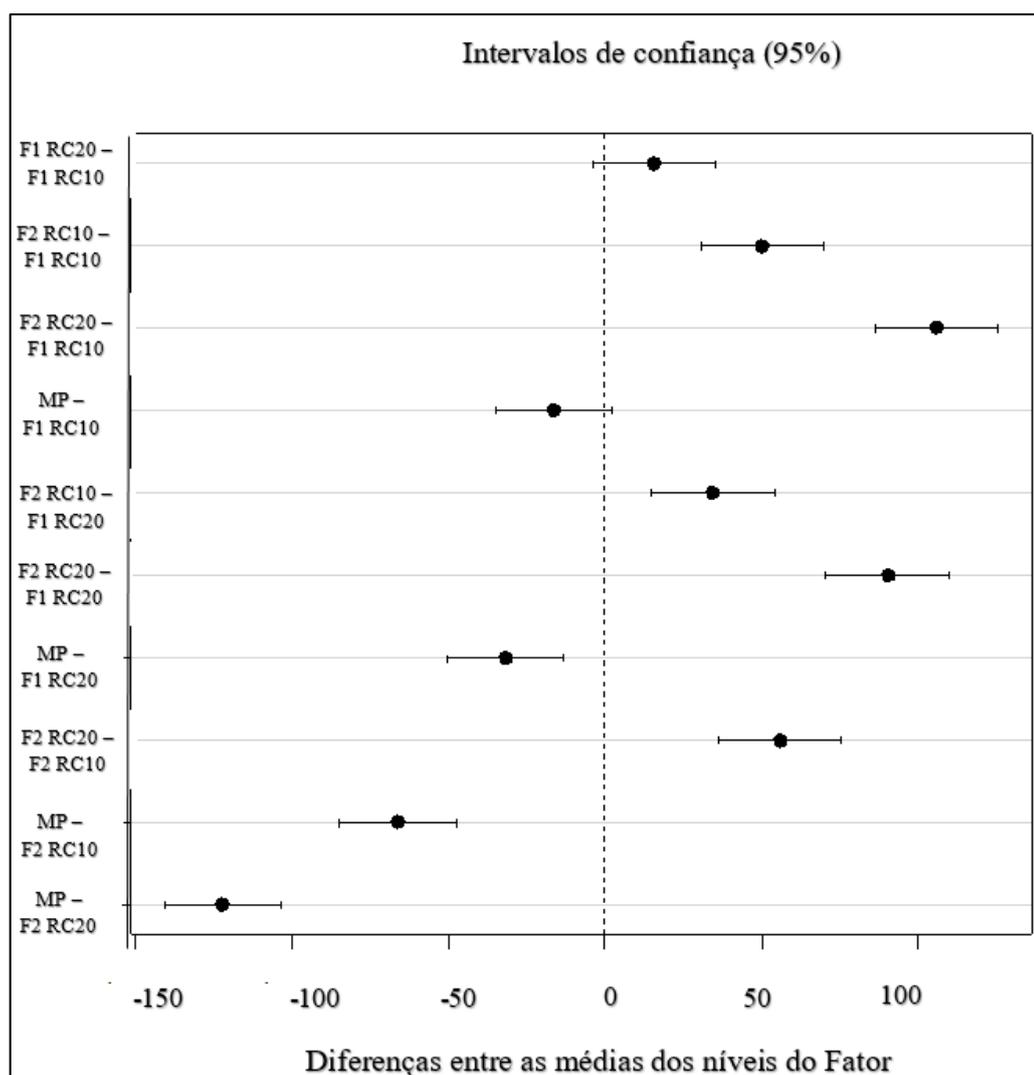
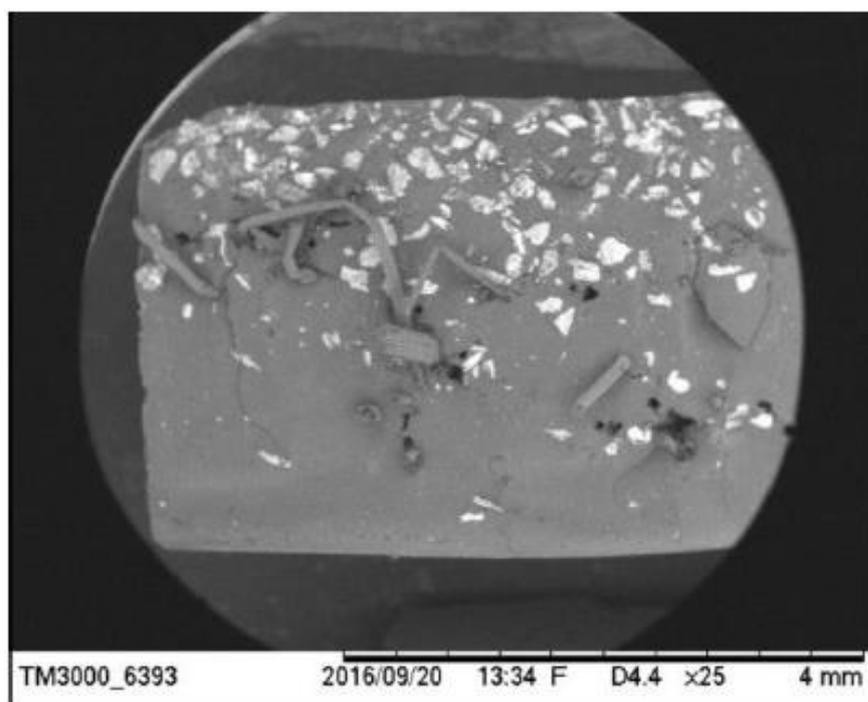


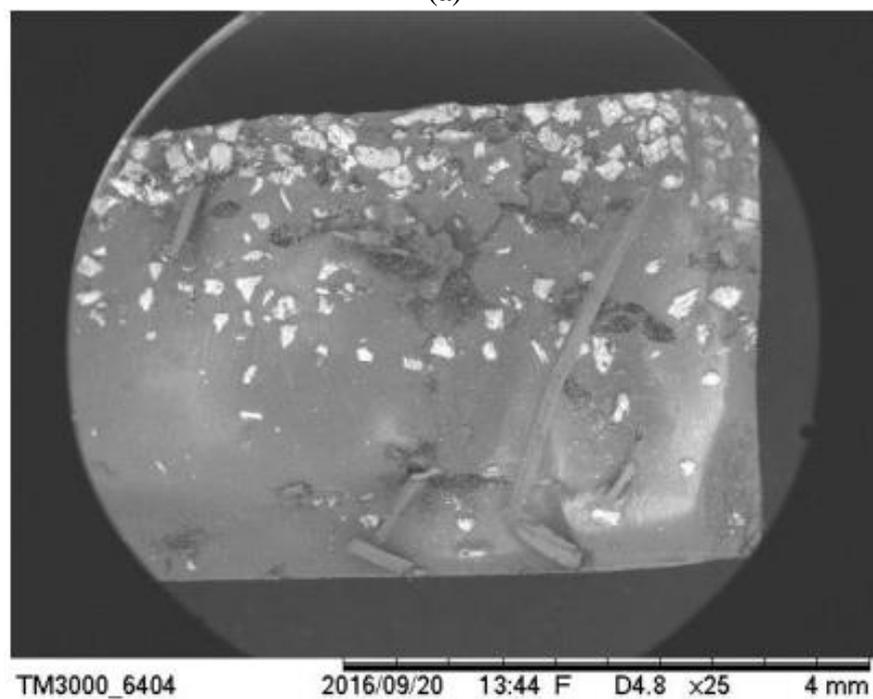
Figura 66 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

Apenas os tratamentos F1 RC20-F1 RC10 e MP-F1 RC10 apresentaram resultados equivalentes, indicando que não houve diferença significativa entre essas frações. Os demais tratamentos mostraram valores estatisticamente significativos, na qual o compósito F2 RC20 apresentou os melhores resultados de resistência à flexão e módulo de flexão.

A Figura 67 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de flexão dos compósitos híbridos com adição de cobre e reforçados com fibras de bananeira.



(a)



(b)

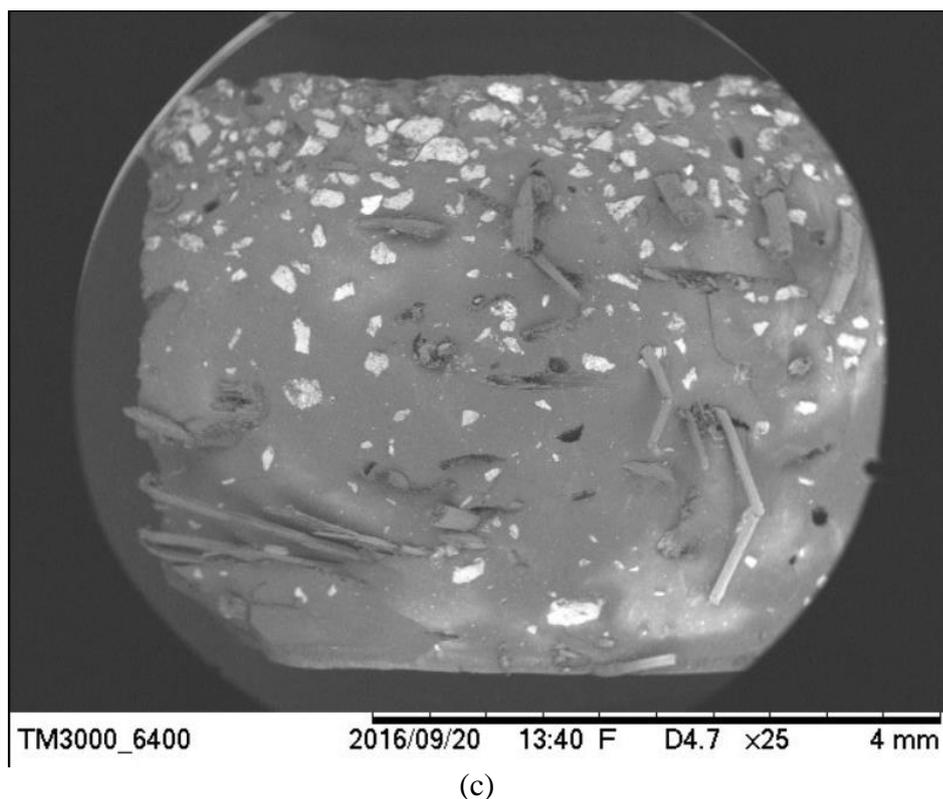


Figura 67 – Microscopia eletrônica de varredura: (a) F1 RC10; (b) F2 RC10; (c) F2 RC20.

A Figura 67 (a) mostra a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com fibras de 1% e resíduo com 10%, e nela pode se perceber uma presença de vários mecanismos de falha, como por exemplo, pull-out, sedimentação do resíduo na matriz, mas há também uma maior incidência de fibras faturadas dispostas no sentido do carregamento. Na Figura 67 (b) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com fibras de 2% e resíduo com 10%, e nela nota-se a sedimentação do resíduo dentro da matriz, porém há uma quantidade maior de fibras presentes na matriz, onde as mesmas foram rompidas e acomodadas no sentido do carregamento do esforço auxiliando no aumento de suas propriedades quando comparadas ao compósito híbrido com 1% de fibra. Fato este ocorrido similarmente ao compósito híbrido reforçado com 1% de fibra e 20% de resíduo de cobre (F1 RC20). Na Figura 67 (c) tem-se a superfície de fratura do compósito híbrido reforçado com fibras de 2% e resíduo com 20%, na qual nota-se que apesar das presenças ainda incidentes de alguns mecanismos de falhas já citados, há uma predominância da presença de fibras melhor distribuídas e rompidas dentro da matriz, mostrando a boa interação entre a interface matriz/resíduo/fibra, ratificando assim ter apresentado o melhor resultado à flexão.

### 4.4.2.3 Ensaio de impacto Charpy

#### 4.4.2.3.1 Compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira

Um importante fator para seleção de materiais poliméricos é sua resistência ao impacto. Desta forma, os compósitos reforçados com fibras de bananeira foram estudados. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de bananeira foram avaliados quanto a sua resistência ao impacto, onde foi obtido os seguintes resultados conforme a Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto.

<b>Fração mássica (%)</b>	<b>Resistência ao impacto média (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Matriz Plena</b>	7,00 ( $\pm 0,41$ )
<b>Fibra 1% (F1)</b>	13,12 ( $\pm 2,27$ )
<b>Fibra 2% (F2)</b>	10,75 ( $\pm 1,83$ )
<b>Fibra 3% (F3)</b>	10,49 ( $\pm 2,25$ )

Com base nos resultados mostrados na Tabela 28, verificou-se que a matriz plena possui baixa resistência (por se tratar de um material frágil) e com isso houve um aumento da resistência ao impacto para todas as frações das fibras em relação a matriz plena, mostrando que as fibras de bananeira atuaram como reforço dentro da matriz polimérica. Fato este esperado já que as inclusões de fibras dentro da matriz acabam atuando como barreiras dificultando a propagação de trincas.

Tal fato ocorre devido a incorporação de fibras acarretarem um comportamento diferencial em relação a matriz plena. Pois a área de fratura não é totalmente transversal, e uma parte das fibras acompanha o sentido longitudinal de seu alinhamento.

Segundo Margem (2013), isto indica que as trincas geradas pelo impacto, iniciam uma propagação transversal pela matriz, como se espera em polímeros frágeis, mas ao esbarrarem nas fibras, tendem a se propagar na interface fibra/matriz, estando de acordo com o mecanismo de ruptura em compósitos com fraca resistência interfacial.

Isso acaba se tornando paradoxal, já que uma fraca resistência interfacial proporciona uma maior tenacidade ao compósito, por gerar uma maior área de fratura e, conseqüentemente, maior energia de impacto absorvida.

A Figura 68 ilustra o gráfico comparativo dos compósitos puros e reforçados com fibras de bananeira nas frações 1%, 2% e 3% quanto à sua resistência ao impacto.

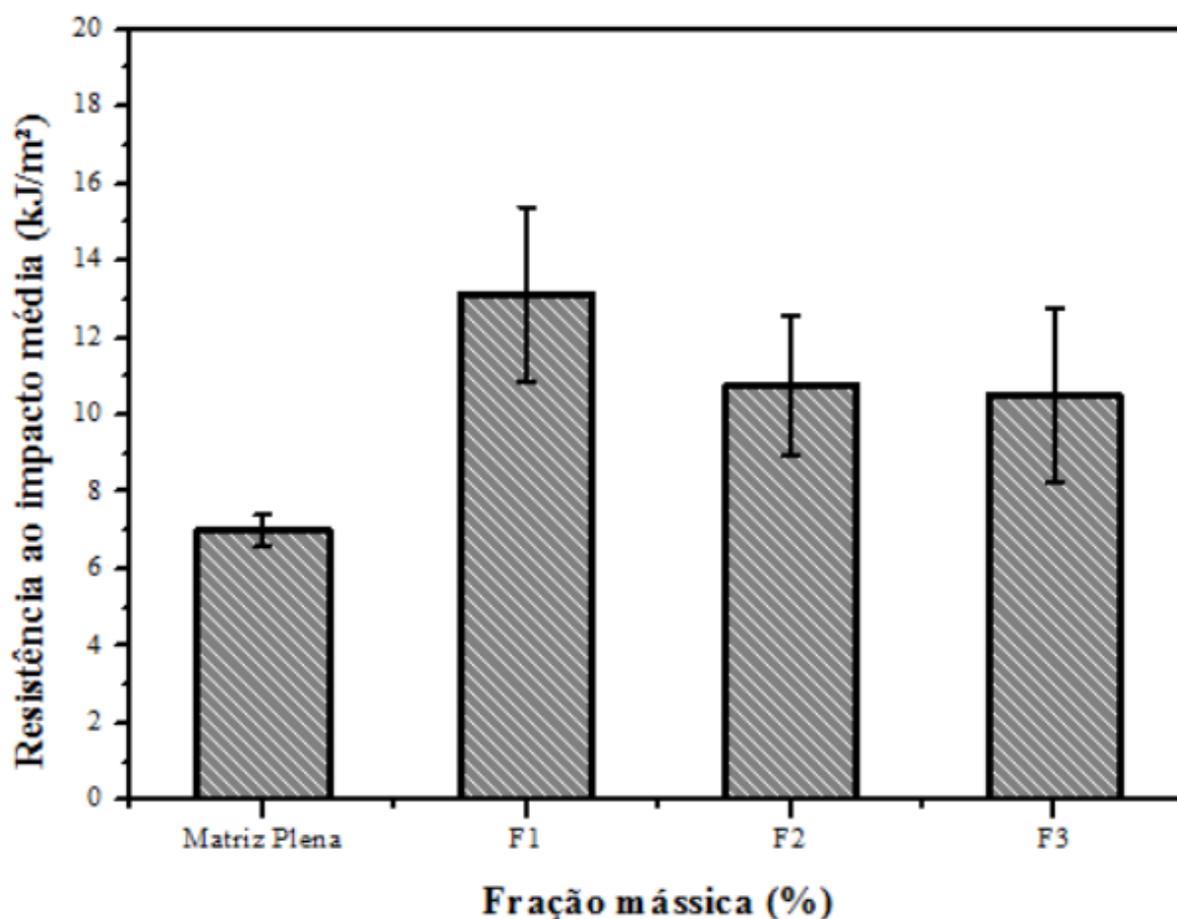


Figura 68 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

Seguindo o mesmo procedimento estatístico dos tratamentos anteriores, a Tabela 29 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de impacto dos compósitos reforçados com fibras de bananeira.

Tabela 29 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de impacto dos compósitos reforçados com fibras.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	93,65223707	3	31,21741236	8,966898669	0,002166581	3,490294819
Dentro dos grupos	41,77686869	12	3,481405725			
Total	135,4291058	15				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (8,97) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,49) ao nível de significância 5%, se aceita a hipótese de que existe diferença significativa entre as resistências ao impacto dos materiais estudados, rejeitando assim  $H_0$ . Sendo  $P\text{-valor} < \alpha$  ratifica que deve existir, pelo menos um contraste significativo entre as médias dos valores tratados. Assim, foi utilizado o método de Tukey para identificar quais os compósitos que se diferem.

A Tabela 30 e a Figura 69 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos reforçados com fibras de bananeira para o ensaio de flexão.

Tabela 30 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1, F2 e F3.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
<b>F2-F1</b>	-2,843826772	-6,042575704	0,35492216	0,090596655
<b>F3-F1</b>	-3,151826772	-6,350575704	0,04692216	0,054177135
<b>MP-F1</b>	-6,399618266	-9,598367198	-3,200869334	0,000166806
<b>F3-F2</b>	-0,308	-3,506748932	2,890748932	0,99240488
<b>MP-F2</b>	-3,555791494	-6,754540426	-0,357042562	0,026812764
<b>MP-F3</b>	-3,247791494	-6,446540426	-0,049042562	0,045956616

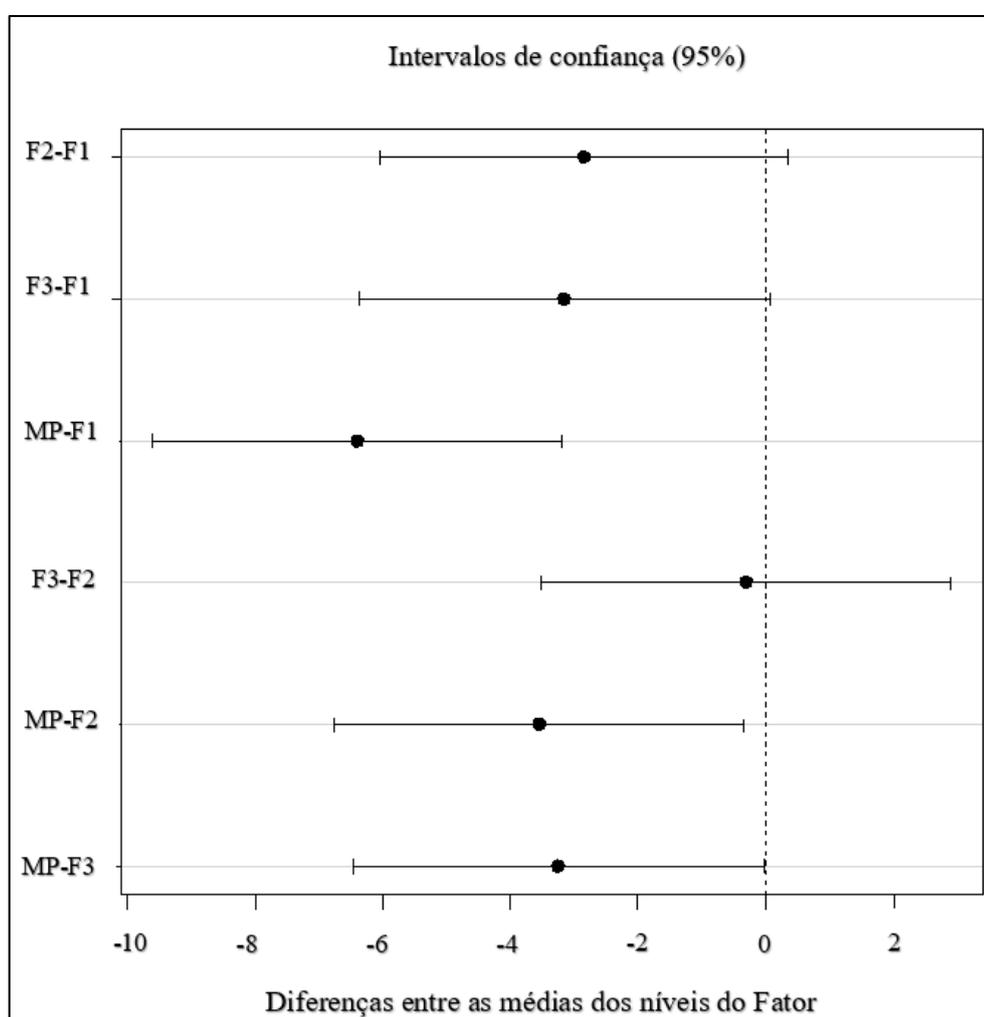


Figura 69 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

Os tratamentos F2-F1, F3-F1 e F3-F2 apresentaram resultados equivalentes, indicando que não há nenhuma diferença significativa entre os reforços de fibra de bananeira de 1%, 2% e 3%, entretanto é significativa a inclusão do reforço. Pois quando comparados com a matriz plena, estes tratamentos apresentam significativa diferença, sendo que o compósito reforçado

com fibras de bananeira com 1% apresentou as maiores resistências médias ao impacto quando comparado com a matriz plena e as outras frações.

A Figura 70 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de impacto dos compósitos de matriz plena e os compósitos reforçados com as fibras de 1%, 2% e 3%.

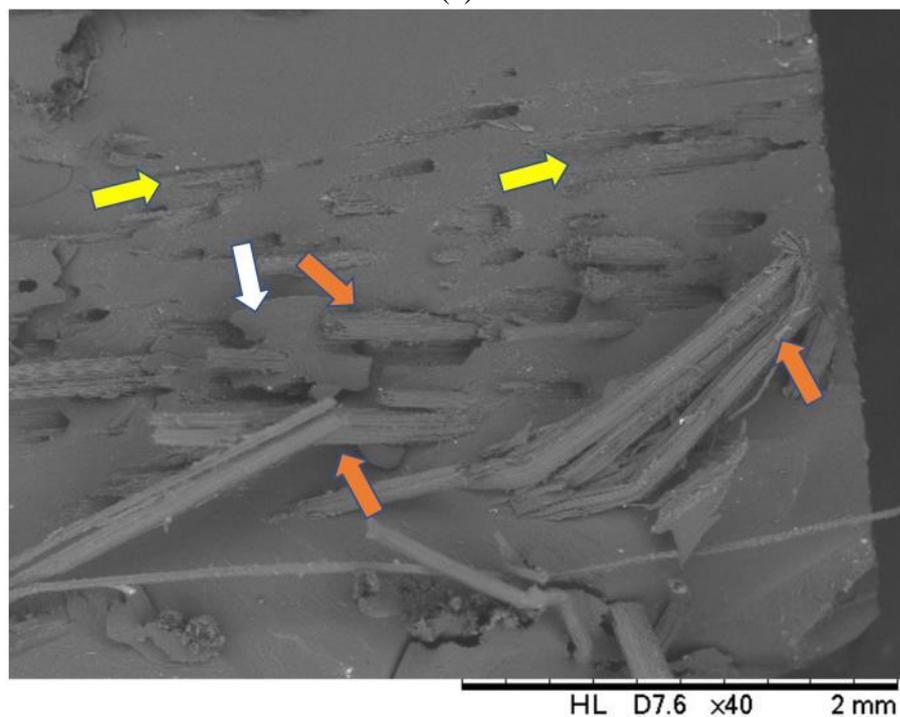
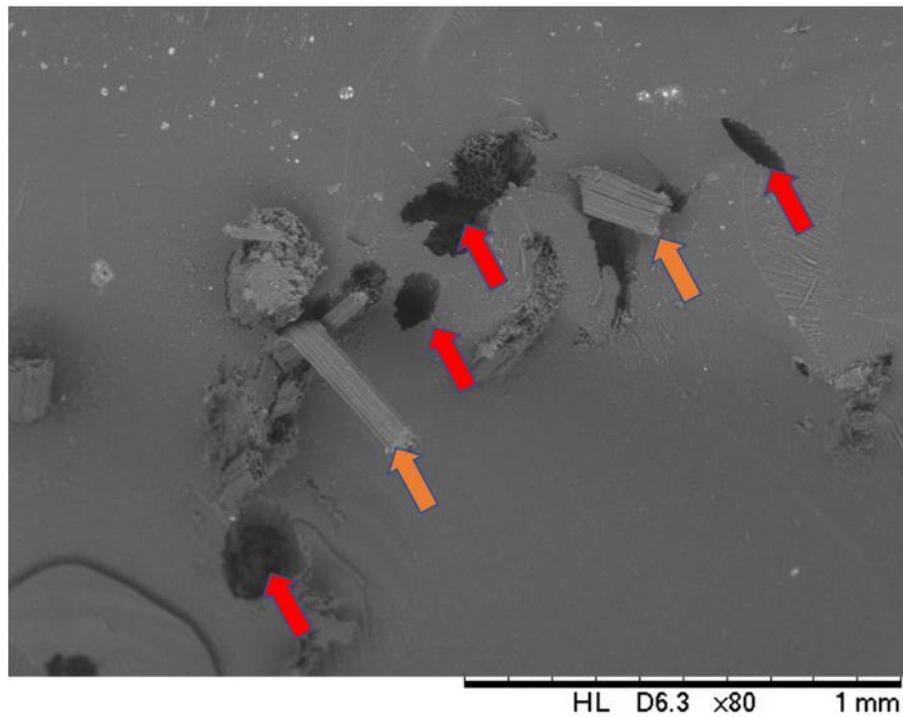


Figura 70 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de impacto: (a) Fibra 1%; (b) Fibra 3%.

A Figura 70 (a) mostra a superfície de fratura do compósito reforçado com fibra de bananeira com 1%, a qual teve melhor desempenho mecânico, e esse fato é explicado pela maior incidência de pull-out (seta vermelha) - elemento que eleva a propriedade de impacto - pois esse mecanismo de falha tende a dissipar a energia durante a fricção mecânica prevenindo possíveis concentrações de tensão nas áreas ao longo das fibras. Na Figura 70 (b) mostra a superfície de fratura do compósito com 3% de fibra, entretanto esse comportamento foi similar ao reforçado com 2%, na qual encontra-se alguns mecanismos de falha que tenderam diminuir a resistência ao impacto quando comparados com o compósito reforçado com 1%. Nota-se a presença ainda de algumas fibras descoladas (fibras amarelas), porém percebe-se a presença de alguns agregados da matriz plena que se soltaram durante o ensaio (seta preta) e a presença de muitas extremidades de fibras que são consideradas como concentradores de tensão (seta alaranjada).

#### 4.4.2.3.2 Compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre

Os compósitos poliméricos reforçados com resíduo de flotação de minério de cobre foram avaliados quanto a sua resistência ao impacto, onde foi obtido os seguintes resultados conforme a Tabela 31.

Tabela 31 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto.

<b>Fração mássica (%)</b>	<b>Resistência ao impacto média (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Matriz Plena</b>	7,00 ( $\pm 0,41$ )
<b>Resíduo Cobre 10% (RC10)</b>	8,93 ( $\pm 0,07$ )
<b>Resíduo Cobre 20% (RC20)</b>	14,17 ( $\pm 2,17$ )
<b>Resíduo Cobre 30% (RC30)</b>	16,54 ( $\pm 3,29$ )

De acordo com a Tabela 31 observou-se uma tendência de aumento da resistência ao impacto com o aumento do percentual de resíduo de cobre adicionado à matriz plena. Esse aumento gradativo da resistência pode estar relacionado à excelente interação entre as fases partícula/matriz, resultando assim, em uma grande capacidade de absorção de energia. O compósito RC30 foi o que apresentou melhor desempenho, com uma resistência ao impacto 50% superior à matriz plena.

Segundo Torres (2013), as novas regiões recheadas de partículas promovem um obstáculo a mais quando o material é solicitado mecanicamente por alguma força externa. Com base nisso quando essa força se depara com uma partícula, a tensão aplicada contorna a partícula ou então se propaga fraturando a mesma, e de uma maneira ou de outra, essa situação envolve

um gasto a mais em absorção de energia de material, justificando assim o aumento da resistência ao impacto.

A Figura 71 ilustra o gráfico comparativo dos compósitos puros e com a adição do resíduo de cobre nas proporções de 10%, 20% e 30% quanto a sua resistência ao impacto.

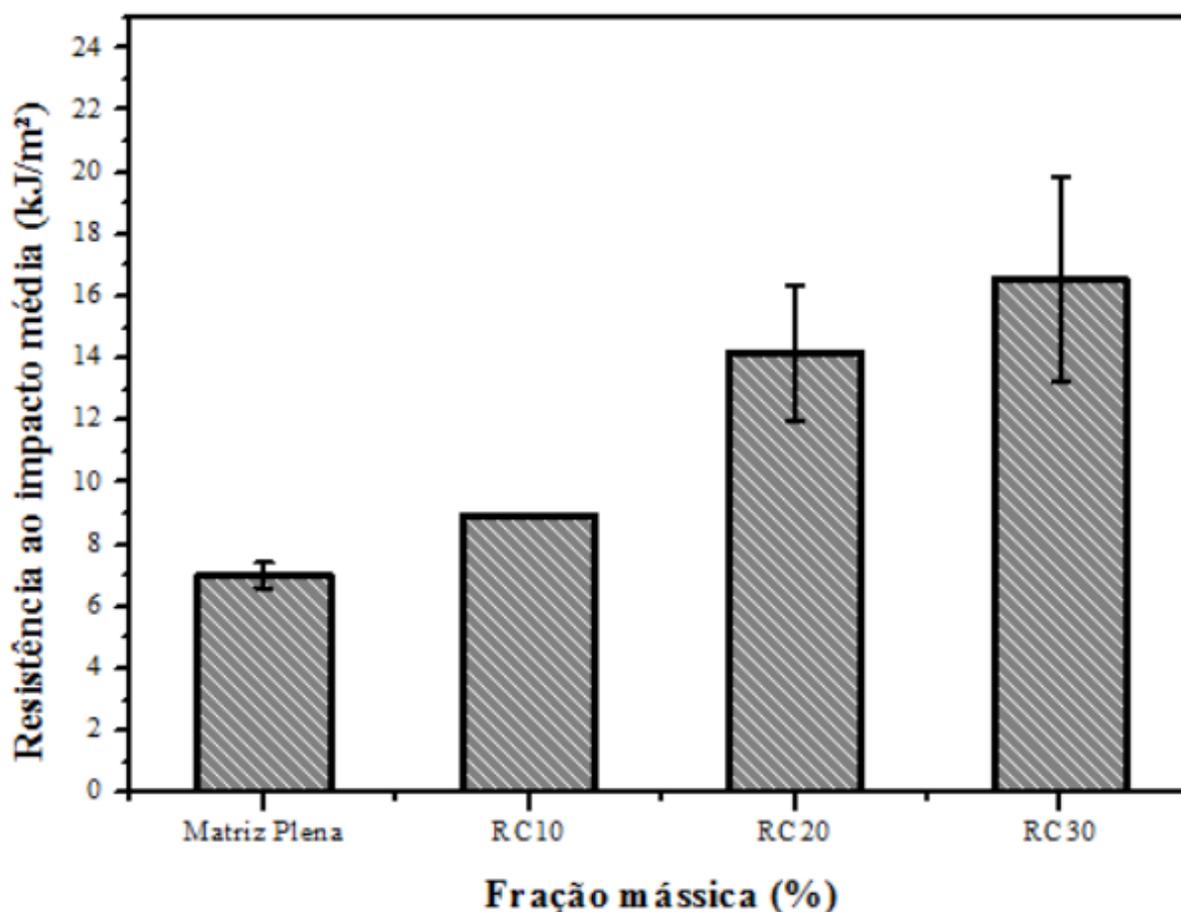


Figura 71 – Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

Seguindo o mesmo procedimento estatístico dos tratamentos anteriores, a Tabela 32 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de impacto dos compósitos reforçados com resíduos de cobre.

Tabela 32 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de impacto dos compósitos reforçados com resíduos de cobre.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	282,561349	3	94,18711632	35,63208372	2,96262E-06	3,490294819
Dentro dos grupos	31,71987933	12	2,643323278			
Total	314,2812283	15				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (35,63) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,49) ao nível de significância 5%, mostra portanto uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese  $H_0$ , concluindo que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a resistência ao impacto com grau de confiança superior a 95% de probabilidade. Pelo P-valor  $< \alpha$  constata-se que os tratamentos das frações de resíduo foram significativos no ensaio de impacto. Como  $H_0$  (hipótese nula) foi rejeitada, pode-se verificar que os tratamentos diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma.

A Tabela 33 e a Figura 72 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos com resíduo de cobre para o ensaio de impacto, identificando essa diferença.

Tabela 33 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, RC10, RC20 e RC30.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
<b>RC10-MP</b>	1,943799817	-1,639218834	5,526818469	0,431701675
<b>RC20-MP</b>	7,187019841	3,604001189	10,77003849	0,000162156
<b>RC30-MP</b>	9,549224565	5,966205914	13,13224322	5,62526E-06
<b>RC20-RC10</b>	5,243220023	1,660201372	8,826238675	0,00350332
<b>RC30-RC10</b>	7,605424748	4,022406096	11,1884434	8,64829E-05
<b>RC30-RC20</b>	2,362204724	-1,220813927	5,945223376	0,272412259

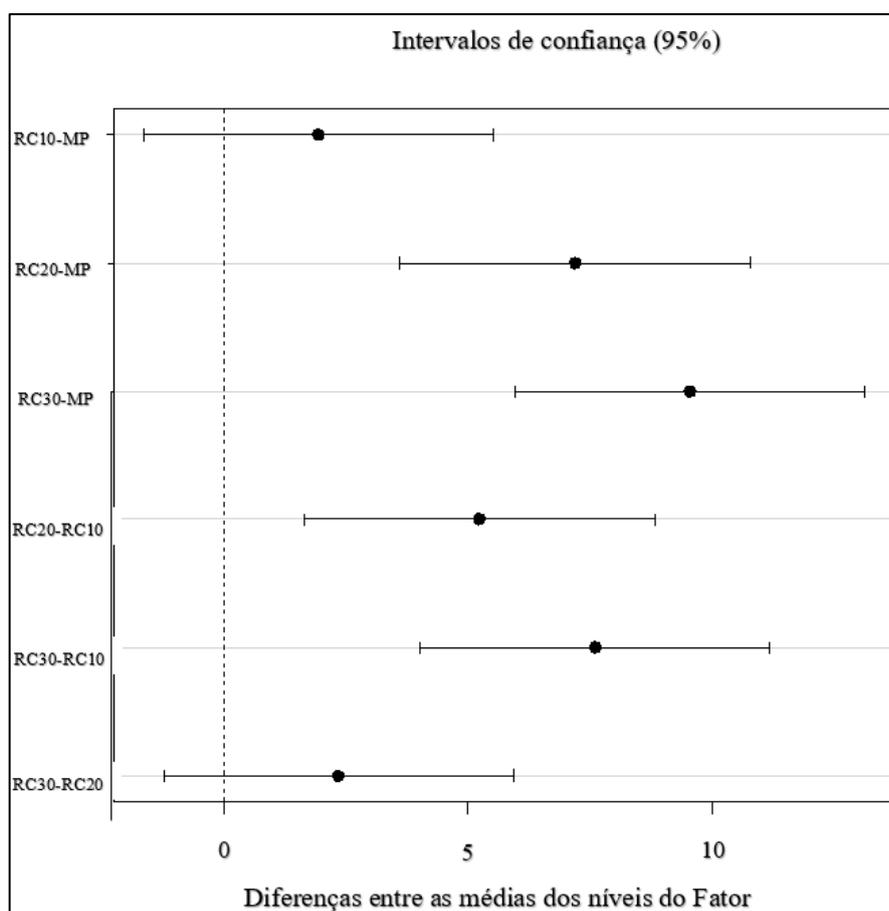
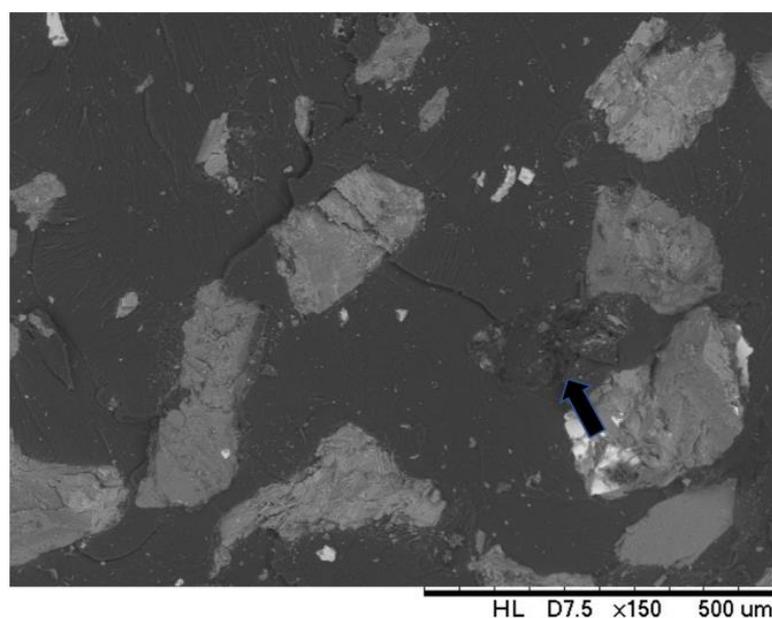


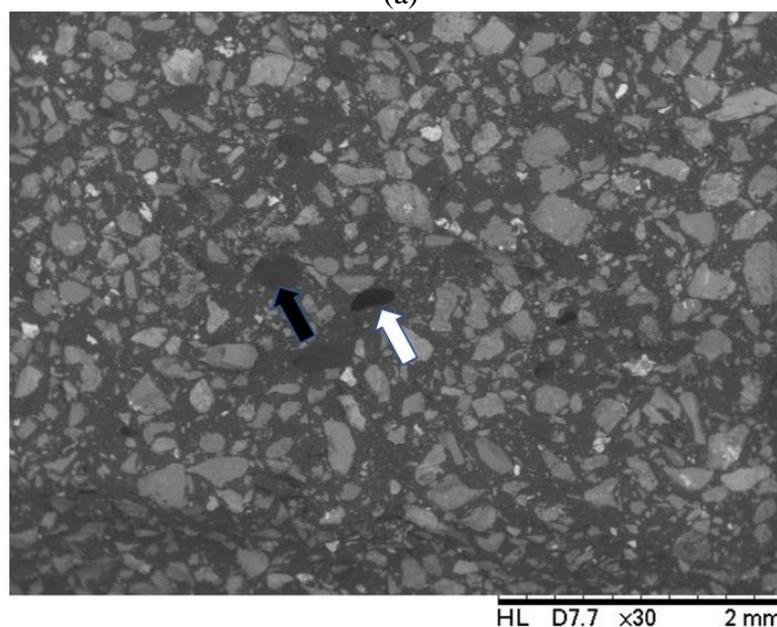
Figura 72 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

Com base nesses resultados pode-se afirmar que os tratamentos RC10-MP e RC30-RC20 apresentaram resultados equivalentes, indicando que não há nenhuma diferença significativa entre a matriz plena e o reforço RC10; e entre os reforços RC20 e RC30. A diferença significativa pode ser observada principalmente entre o reforço RC30 com relação as outras frações apresentando o melhor resultado de resistência ao impacto.

A Figura 73 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de impacto dos compósitos de matriz plena e os compósitos reforçados com resíduo de cobre nas proporções de 10%, 20% e 30%.



(a)



(b)

Figura 73 – Microscopia eletrônica de varredura da fratura após o ensaio de flexão: (a) RC10; (b) RC20; (c) RC30.

As Figuras 73 (a) e (b) mostram as superfícies de fraturas dos compósitos reforçados com resíduo de cobre de 10% e 30%, respectivamente. Nota-se em ambas as fraturas as presenças de crateras (seta preta) e vazios (seta branca), entretanto os compósitos RC30 apresentaram maiores valores de resistência ao impacto devido a melhor distribuição do resíduo dentro da matriz exigindo assim uma maior absorção energia para romper o material, como explicado anteriormente.

#### 4.4.2.3.3 Compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira

Os compósitos poliméricos híbridos com adição de resíduo de flotação de minério de cobre e fibras de bananeira foram avaliados quanto a sua resistência ao impacto conforme a Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados obtidos através do ensaio de impacto.

<b>Fração mássica (%)</b>	<b>Resistência ao impacto média (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Matriz Plena</b>	7,00 ( $\pm 0,41$ )
<b>Fibra 1% Resíduo Cobre 10% (F1 RC10)</b>	10,27 ( $\pm 1,95$ )
<b>Fibra 2% Resíduo Cobre 10% (F2 RC10)</b>	14,17 ( $\pm 2,15$ )
<b>Fibra 1% Resíduo Cobre 20% (F1 RC20)</b>	17,32 ( $\pm 2,20$ )
<b>Fibra 2% Resíduo Cobre 20% (F2 RC20)</b>	21,26 ( $\pm 2,27$ )

Novamente nota-se a partir da Tabela 34 a baixa resistência ao impacto da matriz plena e a confirmação que tanto a fibra quanto o resíduo de cobre agem como reforço no compósito. Dando uma ênfase para o compósito F2 RC20 que apresentou o melhor resultado a resistência ao impacto quando comparado com todas as outras frações, aproximadamente 300% superior quando comparado com a matriz plena e aproximadamente 120% em relação ao compósito F1 RC20 segundo melhor resultado encontrado.

Esses valores podem ser explicados pelo fato da forte interação matriz/resíduo/fibra que aumentam a energia de descolagem fibra/matriz. Essas fortes interações exibem maior adesão e acabam requerendo maior consumo de energia para o aparecimento de trincas no compósito durante o ensaio. E por fim uma maior transferência de esforços cisalhantes interfaciais entre matriz/resíduo/fibra exigem o aumento para o arranchamento da fibra, contribuindo assim para o aumento da resistência ao impacto dos compósitos analisados.

A Figura 74 ilustra o gráfico comparativo dos compósitos puros e dos compósitos híbridos com adição de cobre e reforçados com fibras de bananeira quanto a sua resistência ao impacto.

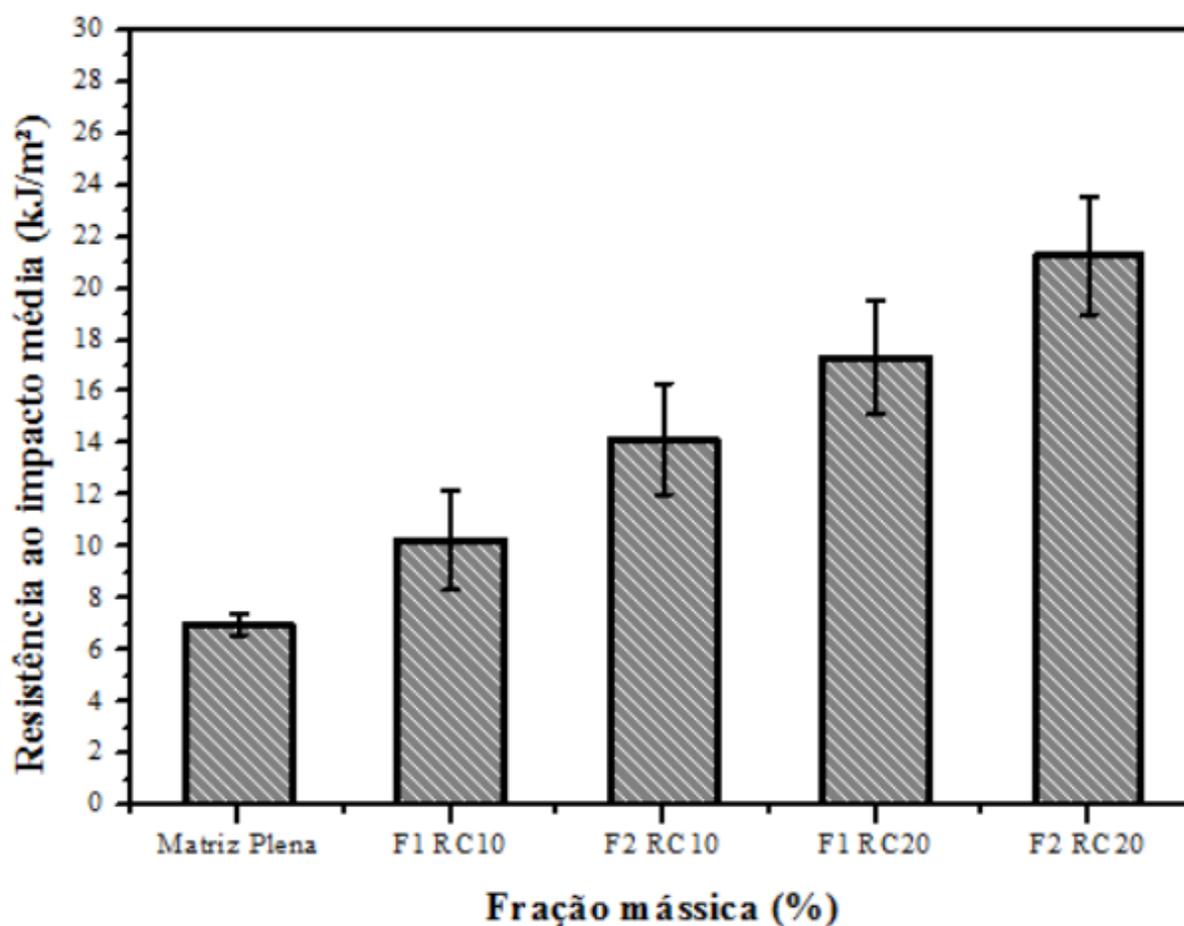


Figura 74 - Gráfico da fração mássica dos compósitos versus suas propriedades mecânicas.

A Tabela 35 apresenta os dados gerados pela ANOVA para o ensaio de impacto dos compósitos híbridos (F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20) seguindo os mesmos parâmetros estatísticos utilizados nos tratamentos anteriores.

Tabela 35 – Dados gerados pela “ANOVA: único fator para ensaio de impacto dos compósitos híbridos.

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	556,8939	4	139,2234	33,30468	2,67736E-07	3,055568
Dentro dos grupos	62,70446	15	4,180297			
Total	619,5983	19				

Como o  $F_{\text{calculado}}$  (33,30) foi superior ao  $F_{\text{tabelado}}$  (3,06) ao nível de significância 5%, mostra portanto uma diferença significativa para os tratamentos, rejeitando assim a hipótese  $H_0$ , podendo concluir que os tratamentos possuem efeitos diferentes sobre a propriedade analisada (resistência ao impacto) com grau de confiança superior a 95% de probabilidade. Pelo P-valor  $< \alpha$  constata-se que os tratamentos das frações do compósito híbrido foram significativos no

ensaio de impacto. Como  $H_0$  (hipótese nula) foi rejeitada, pode-se verificar os tratamentos que diferem entre si, com isso foi utilizado o teste de Tukey que permite a comparação das médias uma a uma.

A Tabela 36 e a Figura 75 mostram os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos compósitos híbridos para o ensaio de impacto, identificando quais os materiais que se diferem.

Tabela 36 – Resultados do teste de Tukey para os tratamentos MP, F1 RC10, F2 RC10, F1 RC20 e F2 RC20.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
<b>F1 RC20-F1 RC10</b>	7,086614173	3,418932145	10,7542962	0,000103681
<b>F2 RC10-F1 RC10</b>	3,937007874	0,269325845	7,604689903	0,031653166
<b>F2 RC20-F1 RC10</b>	11,02362205	7,355940019	14,69130408	1,6951E-07
<b>MP-F1 RC10</b>	-3,250011967	-6,917693995	0,417670062	0,098192569
<b>F2 RC10-F1 RC20</b>	-3,149606299	-6,817288328	0,51807573	0,114616873
<b>F2 RC20-F1 RC20</b>	3,937007874	0,269325845	7,604689903	0,031653166
<b>MP-F1 RC20</b>	-10,33662614	-14,00430817	-6,668944111	4,7277E-07
<b>F2 RC20-F2 RC10</b>	7,086614173	3,418932145	10,7542962	0,000103681
<b>MP-F2 RC10</b>	-7,187019841	-10,85470187	-3,519337812	8,66835E-05
<b>MP-F2 RC20</b>	-14,27363401	-17,94131604	-10,60595199	2,16774E-09

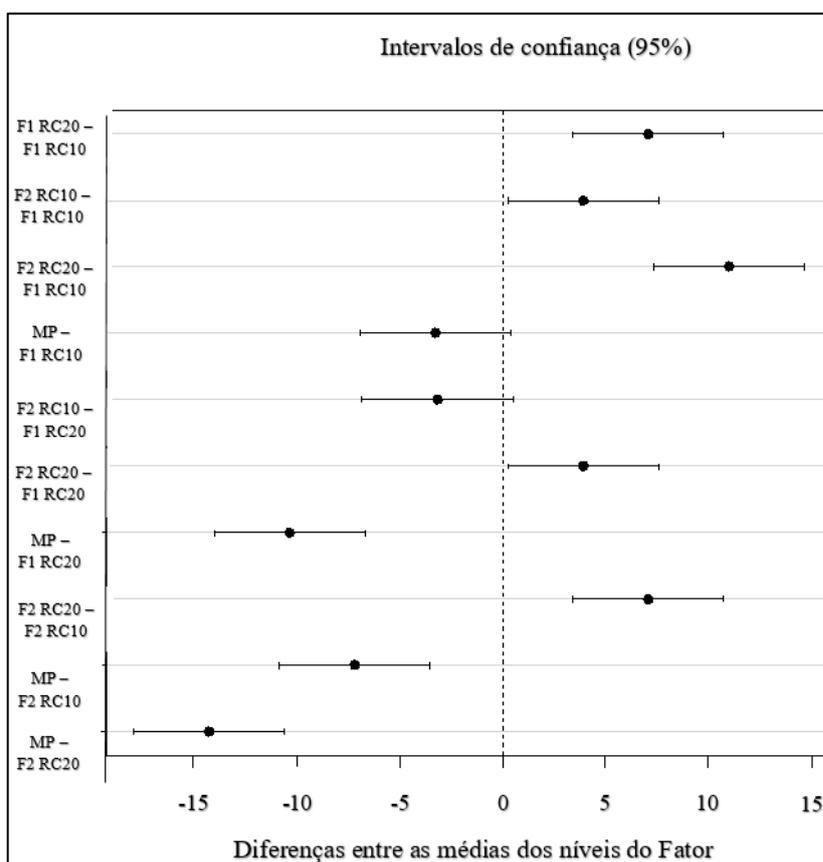
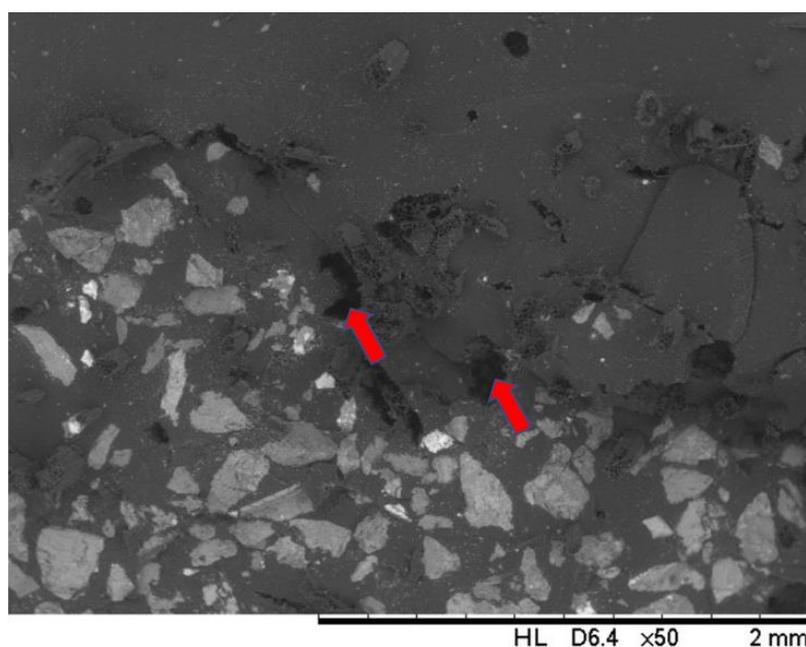


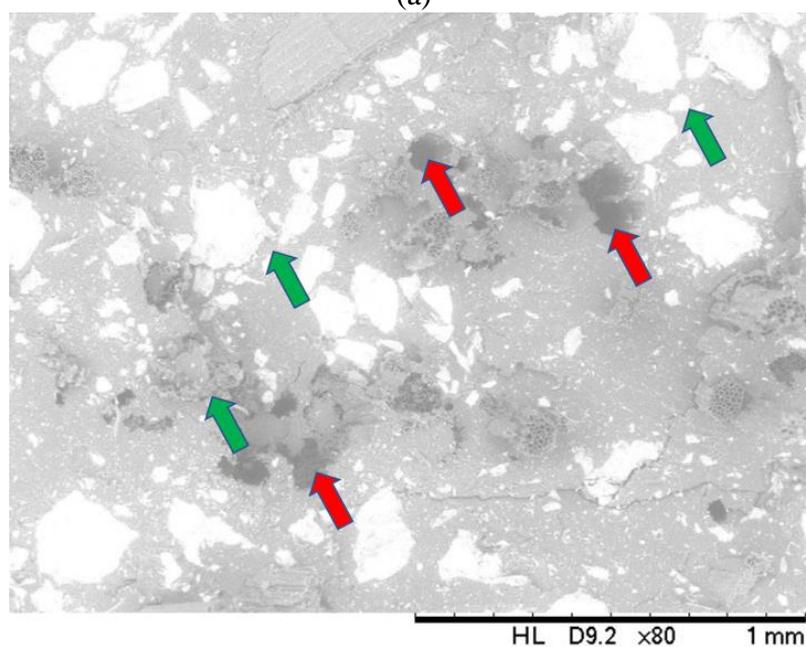
Figura 75 – Gráfico das diferenças entre as médias dos níveis do Fator.

Apenas os tratamentos F1 RC20-F1 RC20 e MP-F1 RC10 apresentaram resultados equivalentes, indicando que não houve diferença significativa entre essas frações. Os demais tratamentos mostraram valores estatisticamente significativos, na qual o compósito F2 RC20 apresentou os melhores resultados de resistência ao impacto, sobressaindo a todas as frações analisadas.

A Figura 76 mostra as superfícies de fratura após os ensaios de impacto dos compósitos híbridos com adição de cobre e reforçados com fibras de bananeira.



(a)



(b)

Figura 76 – Microscopia eletrônica de varredura: (a) F1 RC10; (b) F2 RC20.

A Figura 76 (a) e (b) apresentam as superfícies de fratura dos compósitos híbridos com fibras de bananeira e resíduo de cobre nas proporções F1 RC10 e F2 RC20, respectivamente a que apresentou o menor e o maior resultados de resistência ao impacto entre as frações analisadas. Ambas apresentaram resultados superiores a matriz plena, fato esse explicado devido a inserção de fibras na matriz que aumentou a resistência ao impacto pelo mecanismo de dissipação de energia. As fibras foram arrancadas (pull-out) da matriz (seta vermelha) e dissiparam energia durante o processo de fricção mecânica. Foi verificada certa uniformidade de distribuição das fibras e do resíduo de cobre na proporção de 20% (seta verde) na matriz, fibras fraturadas ao longo da matriz e fibras arrancadas (pull out), caracterizando mecanismo de fratura frágil.

#### 4.4.3 Teste de flamabilidade dos materiais compósitos

##### 4.4.3.1 Ensaio de flamabilidade horizontal

Inicialmente o ensaio foi realizado com corpos de prova na posição horizontal, e segundo a norma se houver classificação HB do material deve-se prosseguir para o ensaio da UL94-98 com os corpos de prova na posição vertical. A Tabela 37 mostra os resultados do ensaio de flamabilidade horizontal de todas as séries confeccionadas, analisando o tempo (s), a velocidade de queima (mm/min), se houve queima total dos corpos de prova e sua classificação.

Tabela 37 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal.

<b>Compósitos</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Velocidade (mm/min)</b>	<b>Queima total</b>	<b>Classificação</b>
<b>Matriz Plena</b>	189,33	23,81	Sim	HB
<b>Fibra 1%</b>	243,00	18,66	Sim	HB
<b>Fibra 2%</b>	261,66	17,22	Sim	HB
<b>Fibra 3%</b>	242,33	18,57	Sim	HB
<b>Cobre 10%</b>	322,00	14,51	Sim	HB
<b>Cobre 20%</b>	266,00	17,12	Sim	HB
<b>Cobre 30%</b>	307,00	14,81	Sim	HB
<b>Cobre 40%</b>	266,00	17,12	Sim	HB
<b>Fibra 1%/Cobre 10%</b>	307,00	14,66	Sim	HB
<b>Fibra 2%/Cobre 10%</b>	271,00	17,04	Sim	HB
<b>Fibra 1%/Cobre 20%</b>	332,66	13,67	Sim	HB

Nos testes de flamabilidade horizontal, três amostras de cada porcentagem foram submetidas a queima conforme determina a norma UL 94, foi observado que todas as amostras não extinguiram chama, queimando totalmente até o limite estipulado pela norma. Segundo a resolução do CONTRAN nº 675, exige que os revestimentos internos da indústria

automobilística tenham uma velocidade de propagação de chama de 250 mm/min. Já nos países com pesquisa avançadas na área, esse valor é de 80 mm/min. Analisando a Tabela 37 verifica-se que todos as séries dos compósitos confeccionados apresentaram valores bem menores do que a resolução exige. Verifica-se também que todos os compósitos obtiveram uma velocidade de queima inferior à matriz plena, aproximadamente 45%, como o caso do compósito híbrido reforçado com 1% de fibra de bananeira e 20% de resíduo de cobre. Com base nisso, os compósitos de matriz plena, compósitos reforçados com fibras de bananeira, compósitos com resíduo de cobre e os compósitos híbridos possuem classificação HB, obedecendo todos os critérios estabelecidos para isso.

#### 4.4.3.2 Ensaio de flamabilidade vertical

O teste de flamabilidade vertical foi realizado com cinco amostras de cada porcentagem. Os testes apresentaram, para todas as porcentagens, um único valor de tempo de queima T1 estipulado pela norma UL 94 já que a chama não se extinguiu após os dez segundos de contato com o corpo de prova. A Tabela 38 mostra os resultados do ensaio de flamabilidade vertical, analisando o tempo de queima (s), se houve ou não gotejamento e também se houve a ocorrência de queima total dos corpos de prova.

Tabela 38 – Resultados do ensaio de flamabilidade vertical.

<b>Compósitos</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Gotejamento</b>	<b>Queima total</b>	<b>Classificação</b>
<b>Matriz Plena</b>	290	Sim	Sim	-
<b>Fibra 1%</b>	266	Sim	Sim	-
<b>Fibra 2%</b>	321	Sim	Sim	-
<b>Fibra 3%</b>	205	Sim	Sim	-
<b>Cobre 10%</b>	222	Sim	Sim	-
<b>Cobre 20%</b>	154	Sim	Sim	-
<b>Cobre 30%</b>	189	Sim	Sim	-
<b>Cobre 40%</b>	188	Sim	Sim	-
<b>Fibra 1%/Cobre 10%</b>	202	Sim	Sim	-
<b>Fibra 2%/Cobre 10%</b>	212	Sim	Sim	-
<b>Fibra 1%/Cobre 20%</b>	195	Sim	Sim	-

De acordo com a Tabela 38, com exceção da matriz plena, do compósito de fibra com 1% e 2%, todas as outras séries obtiveram valores de tempo de queima abaixo dos 250 segundos estipulados pela norma. Porém, durante os ensaios ocorreram gotejamento e queima total dos corpos de prova até a haste de sustentação. Entretanto nenhum deles foi classificado como  $V_0$ ,  $V_1$  ou  $V_2$ , pelo fato de que todos tenham sofrido ignição seguida de uma queima autossustentada na primeira aplicação da chama ao corpo de prova, o que impede que o material possua uma

classificação segundo a norma UL 94V. Como não houve a capacidade de extinção da chama por parte do material, há a necessidade de adição de algum aditivo que possa ajudar na retardância da chama e adequá-lo em alguma classificação da norma UL 94.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

A fibra de bananeira possui microestruturas semelhantes às demais fibras vegetais, onde em sua composição microestrutural, pode-se dar destaque ao alto percentual das microfibrilas de celulose, conduzindo a bons resultados nas propriedades mecânicas. A caracterização mecânica das fibras de bananeira mostrou que estas, apesar de não terem sofrido qualquer tratamento, apresentaram bons resultados de resistência à tração dentre os encontrados na literatura.

O resíduo de cobre caracterizado fisicamente se mostrou condizente com outros resíduos minerais já estudados por outros pesquisadores, proporcionando sua utilização como reforço e/ou enchimento em materiais compósitos, apresentando em suas fases elementos minerais (muscovita) importantes para o retardamento de chamas em materiais compósitos.

Notou-se o aumento das propriedades mecânicas, tração, flexão e impacto, com adição das fibras de bananeira nas frações de 1%, 2% e 3%. Os compósitos com fibras de 1% tiveram o melhor resultado para com os ensaios de tração e impacto, enquanto que os compósitos com fibras de 2% de fração mássica obtiveram o melhor resultado entre os compósitos durante os ensaios de flexão. Os valores obtidos nos ensaios de tração se mostraram aquém de outras pesquisas utilizando fibras vegetais como reforço de materiais compósitos, como por exemplo, o uso de fibras de sisal e curauá. Entretanto nos estudos de flexão e impacto as fibras de bananeira obtiveram propriedades mecânicas superiores em todas as frações confeccionadas.

Com relação aos compósitos poliméricos com a adição do resíduo de flotação do minério de cobre, notou-se que para os ensaios de tração apenas os compósitos com as frações de 30% e 40% obtiveram resultados próximo ou superiores à matriz plena. Para o ensaio de flexão e impacto todos os compósitos obtiveram resultados satisfatórios. Isso mostra a viabilidade do uso do resíduo como partícula de reforço para materiais compósitos, principalmente devido a homogeneidade dessas partículas (30% e 40%) quanto incorporadas na matriz plena.

Para os compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibras de bananeira e adição de resíduo de flotação do minério de cobre, a fração que obteve as melhores propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto, foi a proporção de fibra 2% e resíduo de cobre 20%. Resultados estes considerado até melhores que os compósitos com reforço apenas de fibra ou

apenas com resíduo, ratificando diversas pesquisas que mostram a melhora das propriedades quando se trabalha com materiais compósitos híbridos.

Todos os compósitos estudados em relação a resistência a chama obtiveram classificação HB pela norma ASTM D635. Porém, nenhuma série se enquadrou nas condições para serem classificadas de acordo com a norma UL-94.

Os mecanismos de falhas predominantes nos compósitos que apresentaram melhores resultados foi o rompimento das fibras. E para os compósitos que apresentaram resultados inferiores os mecanismos de falhas predominantes foram o pull out e o descolamento de fibras da matriz. Além da ocorrência de sedimentação total do resíduo nas frações de 10% e 20% do resíduo de flotação de cobre, acima destas frações houve uma melhor dispersão das partículas dentro da matriz possibilitando a melhoria de suas propriedades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABMACO. **Compósitos II: Tecnologia de processos**. Ed. ABMACO, 2009.

ADAMIAN, R., 2009, *Novos materiais: Tecnologia e aspectos econômicos*. 1ª edição. Rio de Janeiro, Escola Politécnica, UFRJ/COPPE.

AGRIANUAL: anuário estatístico da agricultura brasileira. São Paulo: Instituto FNP, 2012. p. 177-188.

ALBINANTE, S. R., PACHECO, É. B. A. V., VISCONTE, L. L. Y. (2013) Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. **Química Nova**, vol. 36, n. 1, p. 114-122.

ALBUQUERQUE, R. J. **Desenvolvimento de Materiais Compósitos para Dutos de Aço**. UFRJ. Rio de Janeiro. 2005.

ALVES, E. J. **A cultura da banana: aspectos técnicos, sócio-econômicos e agroindustriais**. Brasília: EMBRAPA-SPI/Cruz das Almas, 2º edição - 585p. 1999.

ARAÚJO, J.R.; WALDMAN, W.R.; DE PAOLI, M.A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibers: Coupling agent effect. *Polymer Degradation and Stability*, n. 93, p. 1770–1775, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP. Normas técnicas ABCP. São Paulo: ABTCP, 1974.

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 790 - 2010 "**Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

BALZER, P.; VICENTE, L.L.; BRIESEMEISTER, R.; BECKER, D; SOLDI, V.; RODOLFO JUNIOR, A.; FELTRAN, M.B. Estudo das Propriedades Mecânicas de um Composto de PVC Modificado com fibra de bananeira. Artigo de divulgação, Santa Catarina, 2007.

BARRA, G.M.O.; **Compósito poliuretano/fibra natural: preparação e estudo da viabilidade de utilização de fibra natural inorgânica.** Monografia do concurso público de professor adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BASF. We create chemistry. 1998. Disponível em: <<https://www.basf.com/br/pt/company/about-us/history/1990-2014.html>> Acesso em: 15/10/2015

BITTENCOURT, E. **Processamento e caracterização de compósitos lignocelulósicos a partir de resíduo de madeira particulado e fibras vegetais**, 157 f. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J.; **Composites reinforced with cellulose based fibers**, Progress in Polymer Science, v. 24, p. 221 - 274, 1999.

BOONYAPOOKANA, A., NAGATA, K., MUTOH, Y. Fatigue crack growth behavior of silica particulate reinforced epoxy resin composite. *Composites Science and Technology*, v. 71, n. 8, p. 1124-1131, 2011.

BRAGA, E. M. Tecnologia Metalúrgica. 2010, Belém (aula). Disponível em: <[http://www.ufpa.br/getsolda/docs\\_graduacao/Aula\\_Tecnologia\\_Metalurgica01.pdf](http://www.ufpa.br/getsolda/docs_graduacao/Aula_Tecnologia_Metalurgica01.pdf)> Acesso em: 15/10/2015.

BRAHMAKUMAR, M.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, R.M. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composite. **Composites Science and Technology**. v.65, p.563-569, 2005.

BRASIL. Ministério das Cidades. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução n°. 675 de 08 de setembro de 1986. **Dispõe sobre requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Seção 1, página 13534, 09 de setembro de 1986.

BURGET, I., Exploring the micromechanical design of plant cell walls. **American Journal of Botany**, v.93, p.1391-1401, 2006.

CAIN, R., PINFOLD, M.K., LINDSEY, K.A. **An Introduction to Automotive Composites.** Rapra Technology Limited: United Kingdom, 2002.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Material science and engineering: an introduction.** 7. Ed. [S.l.]: Jhon Wiley and Sons, Inc, 2007.

CALLISTER JÚNIOR, W.D.; **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 7. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

CASARIL, A. **Análise micromecânica 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.

CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. Instituto Militar de Engenharia – IME. Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais. Tese de Doutorado.189f.2014.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora. 2006.

CAO Y., CAMERON J. Impact Properties of Silica Particle Modified Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite. **Journal of Reinforced Plastics and Composites** 2006 25: 761, 2006a.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Cadastro de áreas contaminadas no Estado de São Paulo. São Paulo, Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/relacao\\_areas.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relacao_areas.asp)>. Acesso em: 12 dez. 2015.

CHARLET, K.; BALEY, C.; MORVAN, C.; JERNOT, J.P.; GOMINA, M.; BRÉARD, J. Characteristics of Herme`s flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites. **Composites: Part A**, v. 38, p.1912–1921, 2007.

CHEUNG, H.; HO, M.; LAU, K.; CARDONA, F.; HUI, D. Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications. **Composites: Part B**, n.40, p. 655–663, 2009.

CORDIOLI, S. **Oficina de Avaliação e Planejamento do Projeto Fibra da bananeira 2008/2009**. Santa Catarina, 2008.

CORREA, C. A., FONSECA, C. N. P., NEVES, S. Compósitos termoplásticos com madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 13, n. 3, p. 154-165, 2003.

COSTA, D.S. Caracterização mecânica, física e microestrutural de fibras de bambu. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS, 2011.

DALPIAZ, G. **Estudo do efeito das cargas minerais em compósitos poliméricos particulados em matriz de polipropileno**, 236 f. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

DANTAS, C. M. **Influência da qualidade de absorção de água nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos de manta de fibra de vidro e tecido juta**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Dissertação de mestrado. 2011.

DIAMOND, J. - *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, Viking Publishers, p.575, 2005.

DIEZ-GUTIÉRREZ, S., RODRÍGUES-PÉRES, M. A., DE SAJA, J. A. and VELASCO, J. I. “Dynamic mechanical analysis of injection-moulded discs of polypropylene and untreated and silane-treated talc-filled polypropylene composites” in: *Polymer* 40. Pp. 5345-5353, 1999.

DITTENBER, D.B.; GANGARAO, H.V.S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites: Part A* (2012), doi:10.1016/j.compositesa.2011.11.019

ELEKEIROZ. **Manual básico do poliéster insaturado**. Várzea Paulista, SP: 2004, 60p.

EURO AKTION, (2016). Tabela de densidade de materiais. Disponível em: <https://www.euroaktion.com.br/Tabela%20de%20Densidade%20dos%20Materiais.pdf>. Acesso em: 29/12/2016.

FAGURY, R. V. G. **Avaliação de fibras Naturais para a fabricação de compósitos: açaí, coco e juta**. 2005. 49f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.

FOELKEL, C. E. B.; ANDRADE, J. O. M.; ZVINAKEVICIUS, C.; SILVA, A. R. Madeiras tropicais para produção de celulose para papel: *Trema micrantha*. *Cenibra Pesquisa*, n.70, p.1-9, 1978.

FONCECA, F.M.C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos à base de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) reciclado e fibras vegetais**. Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais. Dissertação de Mestrado. 2006.

FU, S.-Y.; FENG, X.-Q; LAUKE, B.; MAI, Y.-W. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 39, n. 6, p. 933-961, set. 2008.

GACHTER, R.; MÜLLER, H. **Plastic Additives Handbook**, 3 ed., Ed. Hanser Publishers, Munich Vienna, New York, 2001.

GALIP, H; HASINPOGLU, H; GUNDUZ, G. *J.Appl. Polym.*1999 e **Plastics Additives & Compounding**. p.28-33; April, 2001.

GANGA, R. M. D. Resultados parciais sobre o comportamento de seis cultivares de banana (*Musa spp*) em Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17., 2002, Belém. **Anais...** Belém Embrapa/DDT, 2002. 1 CD- ROM.

GEORGE, J; SREEKALA, M.S.; THOMAS, S. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. **Polymer Engineering and Science**, v. 41, n.9, p 1471-1485, 2001.

GEHLEN, L. R. **Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açaí e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado**. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Dissertação de Mestrado.104f.2014.

GILDO, C. C. R. **Compósito poliéster reforçado por fibras de sisal: avaliação do comprimento e proporção das fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

GORNI, A. A. Introdução aos Plásticos. **Revista Plástico Industrial**. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/intropol.html>. Acesso em 22/02/2015.

GUIMARÃES JÚNIOR, M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, Vol. 11, 442-456, 2010.

HULL, D., CLYNE, T. W., 1981, *An Introduction to Composite Materials*. 2 ed. Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press.

HULL, D.; **An Introduction to composite materials**. Cambridge University Press. New York, 246 p., 1988.

IDUCULA, M.; MALHOTRA S. K.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Dynamic Mechanical Analysis of Randomly Oriented Intimately Mixed Short Banana/Sisal Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites. **Composites Science and Technology**. p.1077-1087, 2005. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY (IAWA). List of microscopic features for wood identification. *IAWA Bulletin*, Leiden, 10(3), 226 (1989).

JANG, J.-S.; VARISCHETTI, J.; LEE, G.W.; SUHR, J. Experimental and analytical investigation of mechanical damping and CTE of both SiO<sub>2</sub> particle and carbon nanofiber reinforced hybrid epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 42, n. 1, p. 98-103, 2011.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites: Review. *Carbohydrate Polymers*, n.71, p. 343–364, 2008.

KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAURS, I. Livro: **Cellulose Fibers: Bio and Nano-Polymer Composites**. New York: Springer. 2011.

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. Second Edition, Taylor & Francis Group, London, New York, 2006.

KHUNOVÁ, V; HURST, J; JANIGOVÁ, I; SMATKO, V. Plasma treatment of particulate polymer composites for analyses by scanning electron microscopy: II. A study of highly filled polypropylene/calcium carbonate composites. **Polymer Testing**, v. 18, n. 7, p. 501-509, 1999.

KURUVILLA, J.; THOMAS, S.; PAVITHRAN, C. Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites. **Polymer**, v.37, n.23, p5139-49, 1996.

LEÃO, M. A. **Fibras de Lucuri: um reforço alternativo de compósitos poliméricos**. 2008. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais**. Ciência e Tecnologia. Ed. Edgard Blücher, 2006.

LIMA, A.B.T. *Aplicações de Cargas Minerais em Polímeros*. São Paulo. 2007. 87p. Disponível em:

<file:///C:/Users/WIN%207/Downloads/DISSERTACAOANTONIOBTLIMAFinal%2(1).pdf> Acesso em: 24/10/2015.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. Noções de anatomia de madeira como base para identificação. **Boletim técnico da Associação Brasileira de Preservadores de Madeira**, v.2, n.1, p.1-36, 1974.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design**. New York, Marcel Dekker, p. 312, 1988.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a Polímeros. 2ª ed. – São Paulo: Editora Blücher. 1999.

MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. Tradução de Astrid de Carvalho. São Paulo: EDUSP, 2005.

MARGEM, J. I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva**. 2013. Tese doutorado em engenharia de materiais, CCT, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes – RJ.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e Tecnologia**. São Paulo. Artliber Editora, 2011.

MARTINS NETO, J.A. **Desempenho mecânico de compósitos híbridos de fibras naturais e poliéster não saturado**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM. Dissertação de Mestrado. 74f. 2010.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D.; **Composite materials: engineering and Science**. London. Chapman & Hall. 1994.

MERLINI, C (2011). **Análise experimental de compósitos de poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras de bananeira**. Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais-PPCEM. Dissertação de Mestrado.104f.2011.

MOREIRA, R. S. **Banana: teoria e prática de cultivo**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.335.

MOREIRA, R. S. **Banana: teoria e prática de cultivo**. São Paulo: Fundação Cargill, 1999. 1 CD-ROM.

MOREIRA, W. Materiais 1-2. Em: **Compósitos I: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e tendências**. ABMACO, 2008.

MUELLER, D.H.; KROBJILOWSKI, A. New discovery in the properties of composites reinforced with natural fibers. **Journal of Industrial Textiles**. v. 33, p. 112-127, 2003.

MURPHY, J. Additives for Plastics Handbook. Elsevier Science. Second Edition. 2001.

NBR NM 52 - 2009 "**Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**", Associação Brasileira de Norma Técnica - ABNT.

NBR 12766 – 1992 “Rochas para revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente”. Associação Brasileira de Norma Técnica – ABNT.

PAULA, J. E.; SILVA JÚNIOR, F. G. Anatomia de madeiras indígenas com vistas à produção de energia e papel. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 19, n. 12, p. 1807-1821, dez. 1994.

PEREIRA, J. C. Curso de projeto estrutural com materiais compósitos. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 122p. 2003.

PIRES, E.N.; **Efeito do tratamento superficial em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2009.

PRASAD, A.V.R., MOHANA, K., NAGASRINIVASULU, G. Mechanical properties of banana empty fruit bunch fibre reinforced polyester composites. **Indiana Journal of Fibre & Textile Research**, v.34, p. 162-167, 2009.

RABELLO, M.S.; **Aditivção de Polímeros**. Ed.Artliber, São Paulo, 2000.

RAO, K.M.M., RAO, K.M. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. **Composites structures**, v.77, p.288-295, 2007.

RATH, Eduardo Fingeri; KALACHE, J. F. Indústria do Cobre-Tecnologia e processos (artigo). 1997. Disponível em:  
[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/onhecimento/relato/cobre.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/onhecimento/relato/cobre.pdf). Acesso em: 5/10/2015.

REGIANI, A. M. Eletrólitos sólidos poliméricos à base de polisacarídeos: síntese e caracterização. Tese (Doutorado em Ciências na área de Físico-química) – Instituto de Química de São Carlos, São Paulo, 2000.

RIBEIRO, J. A. S. Bem Mineral. 2011. Disponível em:  
<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral brasileiro-2001-cobre>. Acesso em: 20/10/2015.

RODRIGUES, J. S. **Comportamento mecânico de material compósito de matriz poliéster reforçado por sistema híbrido fibras naturais e resíduos da indústria madeireira**. 2008. 35f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará, 2008.

ROSATO, D. V. **Reinforced Plastic Handbook**. Publisher: Elsevier, 2004.

SALIBA JÚNIOR, C. C. **Avaliação das propriedades Mecânicas de Poliuretano tendo como agente de reforço uma nova fibra inorgânica natural**. Pontifícia Universidade

Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Pós-graduação em engenharia mecânica, Dissertação de Mestrado, outubro de 2003, 93p.

SANTOS, A. M. **Estudos de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco par aplicações em engenharia**. Universidade Federal do Paraná – UFP. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Dissertação de Mestrado.127 f.2006.

SANTOS, I. H. V. S. **Disponibilidade de nutrientes em produtos de frutas da amazônia, açaí (*euterpe precatória*) e cupuaçu (*theobroma grandiflorum*);**, produzidos no reflorestamento economico consorciado adensado –Reca. Porto Velho, Rondônia, 2010.128f.

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. Disponível em <http://www.silaex.com.br>, acessado janeiro de 2014.

SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. Centro de Ciências e Tecnologia. Tese de Doutorado.110f.2014.

SILVA, M; CRUZ, D. **Análise mecânica e microestrutural de placas de compósitos poliméricos reforçados com fibras da bananeira híbrida pv 0376 com orientação randômica**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2014.

SILVA, C. C. **Influência da umidade nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos híbridos (sisal/vidro)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRN. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica – PPGEM. Dissertação de Mestrado.100 f.2012.

SILVA, A. E. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibra de vidro**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas – PPGEM. Dissertação de Mestrado.86 f.2010.

SILVA, R. V.; **Compósito de resina poliuretana derivada do óleo de mamona e fibras vegetais**. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

SIMMONDS, N.W. **Los platanos**. Barcelona: Blume, 1973. 539p.

SOUZA, A. S. Propagação. In: ALVES, E. J. (Org). **A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais**. Brasília: Embrapa- SPI/Cruz das Almas: Embrapa-NPMF, 1999. p. 151-195.

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** (tese doutorado). 2010.

TORRES, R. B. **Desenvolvimento de compósito híbrido de fibra de vidro e micropartículas de sílica e cimento para uso em caneleiras**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPMEC. Universidade Federal de São João Del-Rei. 70f. 2013.

TSAI, J.-L.; CHENG, Y.-L. Investigating Silica Nanoparticle Effect on Dynamic and Quasi-static Compressive Strengths of Glass Fiber/Epoxy Nanocomposites. **Journal of Composite Materials**, v. 43, n. 25, p. 3143-3155, 2009.

**UL 94 - 2000**, The Standard for Safety of Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances testing.

VALLE, Ayro Eyer do. **Qualidade Ambiental 14000**. 8 ed. São Paulo: Senac, 2002.

VEIGA, José Elida. **A emergência socioambiental**. São Paulo: Senac, 2007.

VENKATESHWARAN, N., ELAYAPERUMAL, A., JAGATHEESHWARAN, M. S. Effect of fiber length and fiber content on mechanical properties of banana fiber/epoxy composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. n. 30, p. 1621-1635, 2011.

VENTURA, A. M. F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 21, n. 3/4, p. 10-19, 2009.

WETZEL, B.; HAUPERT, F; FRIEDRICH, K. Impact and wear resistance of polymer nanocomposites at low filler content. *Polymer Engineering Science*. v.42, 1919. 2002.