



**INFLUÊNCIA DA LAMA VERMELHA E FIBRA DE CURAUÁ
Ananas lucidus, Mill, NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS EM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER ISOFITÁLICO**

Kamila Silva Nunes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: José Antônio da Silva Souza

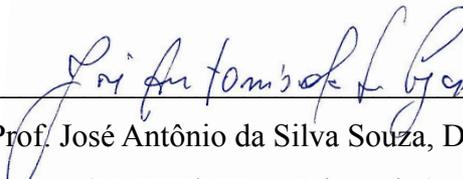
Belém
Maio de 2015

INFLUÊNCIA DA LAMA VERMELHA E FIBRA DE CURAUÁ
Ananas lucidus, Mill, NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS EM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER ISOFITÁLICO

Kamila Silva Nunes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA PROCESSOS.

Examinada por:



Prof. José Antônio da Silva Souza, D.Eng.
(PPGEP/UFPA-Orientador)



Prof. Edilson Marques Magalhães, D.Eng.
(PPGEP/UFPA-Membro)



Prof. Roberto Tetsuo Fujiyama, D.Sc.
(PPGEI /ITEC/UFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

MAIO DE 2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Nunes, Kamila Silva

Influência da lama vermelha e fibra de curauá ananas lucidus, mill, nas propriedades físicas e mecânicas em compósitos de poliéster isofitálico/ Kamila Silva Nunes.- 2015.

Orientador: José Antonio da Silva Souza

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2015

1.Materiais - propriedades mecânicas 2. Compósitos poliméricos 3. Resíduos I. Título

CDD 23.ed.620.11292

Dedico este trabalho *in memoriam*
ao meu querido pai Mario Severino Nunes
e à minha avó Maria Joaquina da Silva.

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo incentivo e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Prof. Dr. José Antônio pela oportunidade de realizar este projeto.

Ao Prof. Dr. Eduardo Braga que concedeu o financiamento junto à FAPESPA deste trabalho.

Ao Prof. Edinaldo Cunha pelo seus conhecimentos na área de compósitos e pela paciência e ajuda na realização deste trabalho.

À Prof^a. Dra. Raimunda Maia pela sua experiência e conhecimento: obrigada também.

Às pessoas que indiretamente incentivaram e acreditaram em mim.

Por último a duas pessoas que conheci durante esta jornada das quais levarei para sempre em minha vida, seus conselhos, suas experiências e principalmente suas amizades; no momento que mais precisei estavam ao meu lado incentivando e apoiando para realização deste trabalho: Lianne Maria Magalhães Dias você é uma pessoa incrível, sou muito grata em ter tua amizade; Kátia Tavares Campos desde início você me incentivou a não desistir, e aprendi muito contigo.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGE/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processo (M.Eng.)

**INFLUÊNCIA DA LAMA VERMELHA E FIBRA DE CURAUÁ *Ananas lucidus*,
Mill, NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM COMPÓSITOS DE
POLIÉSTER ISOFITÁLICO**

Kamila Silva Nunes

Maio/2015

Orientador: José Antonio da Silva Souza

Área de Concentração: Engenharia de Processos

O uso de materiais como carga em compósitos poliméricos é cada vez mais incentivado do ponto de vista ambiental, visando à sustentabilidade. A utilização da lama vermelha resíduo do processo Bayer, como carga é alinhada aos interesses da indústria de compósitos, somadas as opções de destino dos resíduos pela indústria metalúrgica. A fibra de curauá *Ananas lucidus*, Mill, é um material de potencial reforço em compósito polimérico com o poliéster isofitálico. Neste sentido, o presente trabalho apresenta estudos que elucidam a influência da aplicação destes materiais nas propriedades físicas e mecânicas, como massa específica, porosidade, módulo de elasticidade e resistência a tração respectivamente. Para tal, foram fabricados compósitos variando-se o percentual da fração volumétrica de lama vermelha na faixa de 0% a 30%, e compósitos com lama vermelha e fibra de curauá, mantendo-se fixa a fração volumétrica de fibra de curauá em 10%. Os compósitos foram efetuados em duas etapas: em que na primeira etapa utilizou-se o processo *Hand-lay-up* (manual) para o preparo da resina, mistura e a aplicação da fase dispersa. Na segunda etapa foi usada a moldagem sobre pressão de 0,5 MPa, e analisados segundo norma ASTM 3039 os ensaios de tração. Os resultados mostraram que ocorre a redução da massa específica e aumento da porosidade com a adição de fibra de curauá, e a redução da resistência tração com o aumento de lama vermelha e do Módulo de Young, e através da análise morfológica das fraturas dos materiais por microscopia eletrônica de varredura (MEV), observou-se melhoria na adesão fibra/lama/matriz robustecendo a evidencia dos resultados.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M.Eng.)

INFLUENCE OF RED MUD AND CURAUÁ *Ananas lucidus*, Mill, FIBER ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN POLYESTER ISOFITALIC COMPOSITE

Kamila Silva Nunes

May/2015

Advisor: José Antonio da Silva Souza

Research Area: Process Engineering

The use of materials as filler in polymer composites is becoming encouraged the environmental standpoint, in order to sustainability. The use of red mud residue from the Bayer process, as load, is aligned with the interests of the composites industry, added destination options waste metallurgical industry. The fiber curauá *Ananas lucidus*, Mill, is a potential reinforcement material in polymeric composite with isofitalic polyester. In this sense, the present work shows studies that elucidate the influence of application of these materials in the physical and mechanical properties such as density, porosity, elastic modulus and tensile strength respectively. For this purpose, it was manufactured composites by varying the percentage of the volume fraction of red mud in the range of 0% to 30%, and composites with red mud and curauá fiber, keeping fixed the volume fraction of 10%. The composites were made in two stages: in the first step was used the hand-lay-up method for the preparation of the resin mixture and the application of the dispersed phase. In the second step, it was used the molding pressure of 0.5 MPa, and analyzed according to the ASTM 3039 tensile tests. The results showed that there is a reduction of density and porosity increase with the addition of curauá fiber, and reducing traction resistance with increasing red mud and Young's modulus, and through morphological analysis of fractures of materials by scanning electron microscopy (SEM) it was observed an improvement in the adherence fiber/red mud/matrix steeling the evidence of results.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 ASPECTOS GERAIS E MOTIVAÇÃO..... | 1 |
| 1.2. OBJETIVO GERAL | 3 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA | 4 |
| 2.1 MATRIZES POLIMÉRICAS | 4 |
| 2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS..... | 6 |
| 2.2.1. Processos de Fabricação de compósitos..... | 7 |
| 2.3. FIBRA DE CURAUÁ | 10 |
| 2.4. LAMA VERMELHA..... | 12 |
| 2.4.1. Processo Bayer de Produção de Alumina..... | 12 |
| 2.4.2 Utilização de lama vermelha..... | 16 |
| 2.5. ENSAIO DE TRAÇÃO | 17 |
| CAPÍTULO 3 MATERIAS E MÉTODOS | 19 |
| 3.1. MATÉRIA PRIMA..... | 19 |
| 3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 22 |
| 3.2.2 Preparação da placa compósito..... | 22 |
| 3.3. ENSAIO DE TRAÇÃO | 24 |
| 3.4. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE E POROSIDADE APARENTE | 25 |
| 3.5. ANÁLISE MORFOLÓGICA | 27 |
| CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 28 |
| 4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO | 28 |
| 4.2. DENSIDADE E POROSIDADE APARENTE | 31 |
| 4.3. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)..... | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3.1 Caracterização microestrutural das fraturas dos compósitos reforçados com fibra de curauá..... | 33 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 36 |
| 5.1 CONCLUSÕES..... | 36 |
| 5.2 SUGESTÕES | 36 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 37 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Representação da resina de poliéster isoftálico..... | 5 |
| Figura 2.2 Aplicação de compósito: lateral da porta, assoalho, tetos, porta malas; isoladores acústicos dentre outros | 6 |
| Figura 2.3. Processo hand layup..... | 7 |
| Figura 2.4. Processo de produção de compósito Spray up..... | 8 |
| Figura 2.5. Processo de produção compósito pultrusão | 9 |
| Figura 2.6. Processo de produção de compósito RTM..... | 9 |
| Figura 2.7. Planta de curauá | 11 |
| Figura 2.8. Curva Termogravimétrica do curauá roxo e branco | 12 |
| Figura 2.9. Minério de bauxita | 13 |
| Figura 2.10. Esquema Processo Bayer..... | 13 |
| Figura 2.11. Difratoograma da Lama Vermelha submetida a secagem 100°C (% ω).... | 15 |
| Figura 2.12. Área de disposição de lama vermelha, Aughinish, Irlanda..... | 15 |
| Figura 2.13. Esquema Representativo corpos de prova ensaio de tração transversal .. | 18 |
| Figura 2.14. Esquema representativo corpos de prova ensaio de tração longitudinal... | 18 |
| Figura 3.1. Resina de poliéster AM 910..... | 19 |
| Figura 3.2. Fotografia lama Vermelha | 20 |
| Figura 3.3. Fotografias fibras de curauá antes da cardagem | 21 |
| Figura 3.4 Fotografias da manta de fibra no molde (a) e da manta fibra após a prensagem (b). | 21 |
| Figura 3.5 Cat. met. Umedecido 1,5% (a), Produto Comercial BUTANOX M50 (AEROJET®) MEK-P (b) | 22 |
| Figura 3.6 Molde de aço inoxidável para conformação do compósito..... | 23 |
| Figura 3.7 Fluxograma fabricação placa de compósito..... | 23 |
| Figura 3.8 Fotografia do Equipamento universal de ensaio de tração | 25 |
| Figura 3.9 Fotografias corpos de prova..... | 25 |
| Figura 3.10 Fotografia do Equipamento para medição massa seca, úmida e imersa. ... | 26 |
| Figura 3.11 Fotografia do Equipamento MEV..... | 27 |
| Figura 4.1 Corpos de prova após análise de tração | 28 |
| Figura 4.2. Gráfico Módulo de elasticidade dos compósitos reforçados 10%FCC..... | 29 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.3. Gráfico das médias dos valores das tensões máximas dos compósitos reforçados com FCC..... | 30 |
| Figura 4.4. Gráfico da Massa Específica Aparente (MEA) do compósito sem fibra de curauá..... | 32 |
| Figura 4.5. Gráfico porosidade aparente compósito 0% e 10% FCC..... | 33 |
| Figura 4.6. Microscopia eletrônica varredura compósito 10%LV reforçado 10% FCC | 34 |
| Figura 4.7. Microscopia eletrônica de varredura compósito 20%LV reforçado 10% FCC..... | 34 |
| Figura 4.8. Microscopia eletrônica de varredura compósito 30% LV reforçado 10% FCC..... | 35 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 Características gerais da fibra de curauá..... | 10 |
| Tabela 2.2 Principais constituintes químicos da Lama Vermelha (%)..... | 14 |
| Tabela 2.3 Diferentes tipos de rejeitos sólidos e sua utilização e reciclagem potenciais em materiais construção civil. | 16 |
| Tabela 3.1 Características da resina AM 910 AEROJET..... | 19 |
| Tabela 3.2 Composição dos compósitos produzidos..... | 24 |
| Tabela 4.1 Resultados densidade e porosidade das placas produzidas..... | 31 |

NOMENCLATURA

| | |
|-----|-------------------------------------|
| FCC | FIBRA DE CURAUÁ CARDADA |
| FC | FIBRA DE CURAUÁ |
| LV | LAMA VERMELHA |
| PI | POLIÉSTER ISOFTÁLICO |
| MEA | MASSA ESPECÍFICA APARENTE |
| MEV | MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA |
| PA | POROSIDADE APARENTE |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS E MOTIVAÇÃO

Compósitos são materiais multifásicos cujas propriedades apresentam proporções significativas das propriedades dos materiais constituintes. Apresentam inúmeras aplicações técnicas. São usualmente constituídos por duas fases, a fase dispersa (uma fase descontínua que pode conter as cargas e o reforço do compósito) e matriz (a fase contínua que envolve a fase dispersa), as quais não se fundem nem reagem entre si (CALLISTER, 2007). Compósitos de matrizes poliméricas são muito utilizados em inúmeras aplicações, onde serviços de longo prazo em ambientes agressivos (ambientes ácidos ou alcalinos) são requisitados. (BAGHERPOUR, BAGHERI e SAATCHI, 2009)

Os espectros de aplicações cobertos pelos compósitos, e em particular pelos compósitos de matrizes poliméricas, abrangem a fabricação de peças não estruturais, tais como as placas de sinalização de trânsito em poliéster reforçado por fibras de vidro, até aplicações com alto comprometimento mecânico como, por exemplo, nas aeronaves para transporte de passageiros. Qualquer que seja a aplicação desejada, a estrutura ou o componente estará submetida a esforços estáticos e/ou dinâmicos que podem resultar em danos que levem o material a falhas prematuras (NAGLIS & D'ALMEIDA, 1998).

Neste contexto, as resinas de poliéster insaturadas são importantes materiais usados na indústria de compósitos. As resinas termofixas se tornam importantes, pois possuem elevados módulos de Young e uma faixa de temperatura de uso relativamente alta, devido suas densas reticulações. Uma aplicação comum em uso comercial das resinas termofixas é na forma de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (SPERLING, 2006). As fibras de vidro têm sido mais utilizadas por serem as mais baratas e por consequência terem o maior potencial de custo-benefício. (GU, 2009).

A busca por novos materiais visando minimizar os problemas ambientais, tão discutidos nos últimos tempos, tem levado os cientistas a desenvolver compósitos utilizando fibras naturais como cargas ou reforços. As fibras naturais, além de serem de fontes renováveis, possuem baixo custo quando comparadas com as fibras sintéticas (ISHIZAKI, 2006).

A utilização de compósitos de matrizes poliméricas reforçados com fibra vegetal, em detrimento as fibras sintéticas, tem sua importância, atualmente, em função da leveza por apresentar reduzidas massas específicas, e propriedades mecânicas significativas quando comparadas com as fibras sintéticas, como no caso a fibra de curauá, planta nativa e atualmente cultivada na região Amazônica, em estudos de melhoramentos pela EMBRAPA- PA. Utilizada em diversos segmentos industriais com ênfase na indústria automotiva (TOMCZAK, 2007).

A lama vermelha, um resíduo da indústria de alumina, também apresenta potencial para uso com carga em compósitos poliméricos que poderá contribuir economicamente na redução dos custos de produção, bem como nas questões relacionadas com o ambiente contribuindo como uma das opções para o destino do resíduo que é acumulado em grandes quantidades nos depósitos da refinaria da empresa Hydro Alunorte em Barcarena Pará. Enormes esforços têm sido direcionados a nível mundial para questões de gestão da lama vermelha (BALOMENOS, 2011). Por muitos anos, pesquisas têm sido realizadas na utilização desse resíduo na indústria cerâmica, fabricação de cimento, construção de indústria de materiais como matéria-prima na fabricação de construção e pavimentação de blocos e pavimentação de estradas, como um pigmento, na agricultura para melhorar a qualidade do solo, como dispersivo no solo para diminuir a taxa de lixiviação de fósforo pela água da chuva etc (LIU *et al.*, 2009)

Compósitos poliméricos desenvolvidos com lama vermelha e fibras vegetais como juta e sisal, apresentaram bons resultados referente a melhoria das propriedades estruturais, com destaques a resistência mecânica, resistência as intempéries e a retardância de chama. Os compósitos elaborados com poliéster ortoftálico, carregado com lama vermelha e reforçado com fibras de sisal e juta, superam matérias como a madeira, resistentes aos fungos, ao calor, a roedores e a corrosão. Os autores constataram que a aplicação conjunta destes materiais contribui também, com a relação custo/benefício, encorajando o uso como teto, cobertura e painéis (SAXENA *et al.* 2008).

1.2. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo estudar a influencia da adição de lama vermelha e fibra de curauá nas propriedades físicas e mecânicas de compósito de matriz de poliéster isofitálico.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os efeitos da utiliza o de lama vermelha como carga em compósito de matriz polimérica nas propriedades físicas do compósitos.
- Estudar os efeitos da utiliza o da fibra de curauá como reforço da matriz de poliéster isofitálico, nas propriedades físicas dos compósitos.
- Avaliar os efeitos da adi o de lama vermelha e fibra de curauá nas propriedades físicas dos compósitos.
- Avaliar propriedades mecânicas dos compósitos com fra o volumétrica de lama vermelha nas propor es de 0%, 10%, 20% e 30% com reforço de fibra de curauá de 10% em fra o volumétrica.
- Avaliar a região de fratura dos compósitos com fibra e LV, através da microestrutura por (MEV) e constatar a adesão matriz/LV/fibra de curauá e a dispersão de fibra e lama vermelha nos compósitos.
- Comparar os resultados em rela o aos trabalhos já existentes em literatura, com outras resinas, e outras fibras.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MATRIZES POLIMÉRICAS

Muitos dos plásticos, borrachas e materiais fibrosos que são úteis nos dias de hoje consistem polímeros sintéticos. De fato, desde o fim da Segunda Guerra Mundial, o campo dos materiais foi virtualmente revolucionado pelo advento dos polímeros sintéticos. Os materiais sintéticos podem ser produzidos de maneira barata, e as suas propriedades podem ser administradas num nível em que muitas delas são superiores às suas contrapartes naturais. Em algumas aplicações, peças metálicas e de madeira foram substituídas por plásticos, que possuem propriedades satisfatórias e podem ser produzidos a custos mais baixos (CALLISTER, 2002).

Várias resinas termoplásticas e termofixas têm sido utilizadas como matrizes em compósitos. As resinas termofixas mais utilizadas em compósitos de alto desempenho são as fenólicas, epóxis, bismaleimidas e poliamidas. Essas resinas exibem excelente resistência a solventes assim como a altas temperaturas. Estima-se que mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por polímeros termofixos (DE PAIVA *et al.*, 1999).

Os polímeros termoplásticos deformam quando aquecidos (e por fim se liquefazem) e endurecem quando são resfriados, processos que são totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. Esses materiais são fabricados normalmente pela aplicação simultânea de calor e pressão. Em nível molecular, à medida que a temperatura é elevada as forças de ligação secundárias são diminuídas (devido ao aumento do movimento molecular), de modo tal que o movimento relativo de cadeias adjacentes é facilitado quando uma tensão é aplicada. Além disso, os termoplásticos são relativamente moles e dúcteis.

Os polímeros termofixos se tornam permanentemente duros quando submetidos a aplicação de calor e não amolecem com um aquecimento subsequente. Durante o tratamento térmico inicial, ligações cruzadas covalentes são formadas entre cadeias moleculares adjacentes. Os termofixos são geralmente mais duros, mais fortes e mais frágeis do que os polímeros termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional. A maioria dos polímeros com ligações cruzadas e em rede, entre eles as borrachas

vulcanizadas, os epóxis e as resinas fenólicas e algumas resinas de poliéster são do tipo termofixo (CALLISTER, 2002).

As resinas de poliéster insaturadas são amplamente utilizadas como matrizes para compósitos poliméricos por causa de seu custo relativamente baixo, bom equilíbrio de propriedades, e adaptabilidade a diversos processos de fabricação. Elas são utilizadas principalmente em moldagem por compressão (compostos de moldagem de folha), a moldagem por injeção (compostos de moldagem agranel), moldagem por transferência de resina (MTR), pultrusão, enrolamento filamental, e processos hand lay-up. A resina é normalmente preparada pela reação de um diol saturado com uma mistura de um ácido dibásico insaturado e um ácido dibásico ou saturado ou seu anidrido correspondente, Figura 2.1. É comumente referida como poliéster de uso geral, e típicos exemplos são ortoftálico, isoftálico, e bisfenol-A poliésteres de ácido fumárico. Comercialmente, a resina está disponível sob a forma de soluções contendo 60-70% em peso do pré-polímero em um solvente reativo, normalmente estireno (VILLAS, 2000).

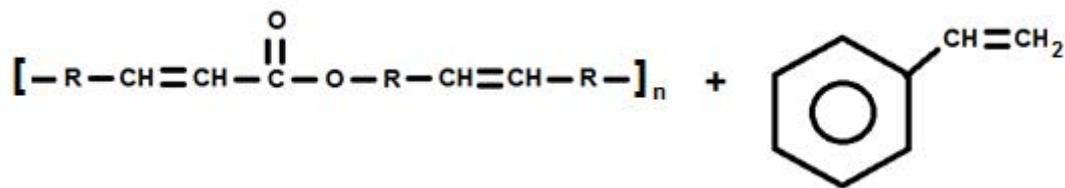


Figura 2.1. Representação da resina de poliéster isoftálico.

Poliésteres insaturados são amplamente utilizados como laminados, materiais de construção, adesivos, revestimentos, na indústria da construção, a indústria elétrica, etc. Apesar de muitas vantagens, tais como a capacidade de temperatura ambiente, a transparência, a densidades baixas, os poliésteres típicos tem algumas desvantagens. (WORZAKOWSKA, 2009)

Eles não são duras o suficiente, altamente inflamável, e a sua resistência ao impacto é mais baixa do que a de outros polímeros termoendurecíveis como epoxy.

Por conseguinte, as suas propriedades são frequentemente melhoradas e modificadas em dois métodos vulgarmente utilizados: mistura física e composição e modificação química (ASSAD, 2013).

2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS

São materiais com propriedades específicas e não usuais, são necessários para uma gama de aplicações de alta tecnologia, tais como as encontradas nas indústrias aeroespacial, submarina, de bioengenharia e de transporte. Os engenheiros aeronáuticos estão buscando materiais estruturais que apresentem baixas massas específicas, sejam resistentes, rígidos e tenham resistência a abrasão e impacto, e que não sejam corroídos com facilidade. Essa é uma combinação de características. Dentre os monolíticos, os materiais resistentes são relativamente densos; o aumento da resistência ou da rigidez resulta geralmente em uma redução de tenacidade (CALLISTER, 2012).

As combinações e as faixas das propriedades dos materiais foram, e ainda estão sendo, ampliadas pelo desenvolvimento de materiais compósitos. De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, tal que é obtida a melhor combinação de propriedades. De acordo com esse princípio da ação combinada, melhores combinações de propriedades são criadas por uma combinação de dois ou mais materiais distintos (CALLISTER, 2012).

Para *Zah et al* (2007) os materiais compósitos podem ser encontrados em várias peças de automóveis, tais como painéis interiores, pára-choques de carros e tanques de combustível, conforme Figura 2.2.



Figura 2.2. Aplicação de compósito: lateral da porta, assoalho, tetos, porta malas; isoladores acústicos dentre outros **Fonte:** PEMATEC TRIANGEL (2014).

Para VASILIEV e MOROZOV (2001) as propriedades mecânicas dos materiais podem ser caracterizadas por vários tipos de ensaios. Testes estáticos, dinâmicos, destrutivos, não destrutivos, de curta duração e de longa duração são alguns exemplos desses ensaios. Uma curva de tensão vs. deformação é uma forma de representar alguns desses tipos de ensaios. Para análise de ensaios mecânicos em geral, alguns parâmetros

são de grande importância como módulo de Young, tensão e deformação no escoamento, tensão máxima, tensão e deformação na ruptura e tenacidade.

2.2.1. Processos de Fabricação de compósitos

- Moldagem manual (Hand Lay-up)

O processo mostrado na Figura 2.3 é adequado para produção de baixos e médios volumes, de partes grandes e de altas resistências, sem investimentos em equipamentos de processo. Uma combinação de reforços em rolo é colocado em um molde aberto Figura 2.3, com um desmoldante pré-aplicado em sua superfície, e impregnada com resina, que se sobrepõe camada por camada. Quando da cura da resina, a superfície do molde é reproduzida no lado do compósito que está em contato com molde (MESQUITA, 2008).



Figura 2.3. Processo hand lay up. **Fonte:**ANCEL (2015).

- Moldagem por Aspersão

Este processo é similar e combina-se com o manual (Hand-lay-up), quando da compactação que pode ser feita por meio de um rolete. No processo a pistola, a fibra de vidro picada é lançada sobre um jato de resina a combinação de materiais é direcionada para o molde conforme Figura 2.4, onde o compósito toma sua forma (MESQUITA, 2008).



Figura 2.4. Processo de produção de compósito Spray up. Fonte: ANCEL (2015).

-Moldagem a Vácuo (Vacuum bag)

Este processo é um melhoramento dos processos manuais e por aspersão, onde uma bolsa de vácuo é utilizada para aplicação da resina. Neste, a qualidade do produto melhora, devido a uma maior eficiência na retirada de resina volátil e bolhas (MESQUITA, 2008).

-Pré-impregnados (PREPREGS)

Há vários processos de fabricação de pré-impregnados, onde em qualquer situação é fundamental a uniformidade de distribuição do polímero, em uma particular fração de massa. O prepreg é uma forma intermediária de compósito, feito pela impregnação de reforço de resina que sai parcialmente curada, antes de partir para moldagem (MESQUITA, 2008)

O semimanufaturado pode ser transformado em compósito por meio de empilhamento e compactação das lâminas que o formam, podendo esta ser realizada em prensas ou autoclaves (meio gasoso) e hidroclaves (meio líquido) (MESQUITA, 2008).

-Pultrusão (Pultrusion)

Iniciado na década de 1950, caracterizado pela alta decadência de produção por ser altamente automatizado, este é um processo contínuo que permite a fabricação de perfis lineares de seção transversal constantes tal como vergalhões, vigas, canaletas e

tubos, que são prismáticos, após a impregnação do reforço com a resina, o material é puxado através de um molde de metal aquecido adequadamente a cura da resina que dá a forma da seção transversal. Após a saída do molde a resina cura e o perfil já está formado como é mostrado na Figura 2.5 (MESQUITA, 2008).



Figura 2.5. Processo de produção compósito pultrusão. **Fonte:** ANCEL (2015).

-Moldagem por Transferência de resina (RTM)

Utilizado a partir de década de 1970, o reforço é colocado na parte inferior do molde "macho-fêmea" como mostra a Figura 2.6. Depois que o molde é fechado, ocorre a transferência da resina localizado no vaso de injeção adjacente à câmara do molde, derivando daí o nome do processo. A resina molha e cura-se, formando a parte de compósito (MESQUITA 2008).



Figura 2.6. Processo de produção de compósito RTM. **Fonte:** ANCEL (2015).

-Moldagem por Injeção

Caracterizado por etapas cíclicas, um composto de moldagem de termoplástico ou termorrígido é transportado até um molde fechado onde é injetado. As duas metades são mantidas sob pressão até que a resina cure. A taxa do fluxo e a temperatura são os parâmetros de controle (MESQUITA, 2008).

-Moldagem por Centrifugação

Este processo molda peças de revolução de formas cilíndricas e ocas, tais como tanques, tubulações e postes, sendo o mandril preparado para ser moldado por dentro. A manta de fios cortados é colocada em um molde cilíndrico oco, ou fios contínuos de *roving* são cortados diretamente sobre as paredes internas do molde onde a força centrífuga força os componentes contra a parede durante o processo de cura (MESQUITA, 2008).

2.3. FIBRA DE CURAUÁ (*Ananash lucidus*. Mill)

O curauá é uma “bromeliácea” (*Ananas lucidus*. Mill), da mesma família do conhecido abacaxi, inclusive com aspectos muito semelhantes Figura 2.7., porém a fibra do curauá possui as seguintes características: Resistência mecânica; Leveza; Ausência de odor; Suavidade ao toque (PEMATEC TRIANGEL, 2014). Em comparação com outras fibras ligno celulósicas a fibra curauá (*Ananas lucidus*. Mill) tem sido raramente estudadas Tabela 2.1 mostra as características da fibra de curauá.

Tabela 2.1. Características gerais da fibra de curauá. Adaptada de LOPES (2011).

| c | ϕ (μm) | Celulose (%) | Hemicelulose (%) | Ligina (%) | $\Theta^{\circ}_{(MF)}$ |
|------|--------------------------|--------------|------------------|------------|-------------------------|
| 0,92 | 40-300 | 71-74 | 21 | 8-11 | 18,8 |

ρ Massa específica; ϕ diâmetro da fibra; $\Theta^{\circ}_{(MF)}$ Ângulo de inclinação micro fibrilar.

A planta é nativa da Amazônia, onde os índios daquela região têm conhecimento desde a era pré-colombiana para fazer redes. Existem quatro variedades de plantas: branco, roxo, vermelho, branco e brilhantes, as mais comuns são curauá roxo com

folhas roxo-avermelhado e curauá branco com luz folhas verdes e crescimento menor que do curauá roxo.

A Figura 2.7 mostra uma plantação de curauá. Para cada planta curauá há 20-24 folhas anuais, o equivalente a 2 kg de fibra. numa área de 1 ha é possível produzir 3,600 kg de fibra seca anualmente, num período de 5-6 anos, o que corresponde ao seu ciclo de vida útil. O caule da planta atinge até 1.5m com folhas eretas de 5 cm de largura, 0,5 cm de espessura e comprimento de aproximadamente 1,5 m(SILVA, 2008).

Fibra de processamento consiste de desfibração das folhas, seguida por secagem, amaciamento, e clareamento das fibras manualmente ou mecanicamente. Porque eles são macios e resistentes, as fibras de curauá são empregadas como material das indústrias têxteis e automotivos, fabricação sacos, produção de fios, escovas, etc.. A toxina encontrada no soro planta também pode ser utilizada para produzir bactericidas.

No Brasil, as fibras de curauá são produzidas principalmente no estado do Pará onde comunidades locais cultivam as fibras associadas a outros cultivos, como mandioca, legumes e feijão. O governo do Pará vem estimulando a implantação de novos projetos para melhor utilizar a fibra de curauá. No momento, há uma parceria com uma empresa do setor automotível para produzir tapetes de curauá, e para atender as necessidades da matéria-prima, o programa foi criado para estimular a produção de fibras por pequenos agricultores.

Este projeto permitiu a inclusão de agricultores familiares em um processo que envolve alta tecnologia e, ao , contribuiu para a estabilização do homem que trabalha no campo SILVA (2008).



Figura 2.7. Planta de curauá. **Fonte:** PEMATEC TRIANGEL (2014).

2.3.1 Utilização da fibra de curauá em matrizes poliméricas

SILVA E AQUINO (2008) através da análise térmica TGA Figura 2.8, das fibras de curauá branco e curauá roxo, para avaliar a estabilidade térmica e auxiliar na determinação da temperatura máxima de uso das referidas fibras em compósitos poliméricos. Identificaram três estágios de decomposição, onde no primeiro estágio evidencia-se a temperatura de 80°C, com perda de massa na ordem de 5 e 3 % da massa de fibra de curauá roxo e branco respectivamente correspondente a evaporação de água. Na segunda fase de decomposição a 235°C, atribuída ao início da decomposição das fibras, sendo a perda de massa correspondente a hemicelulose e lignina e o terceiro estágio em torno de 380°C correspondente a combustão final. Obtendo-se como resíduo carbonífero a percentagem de 19% para o curauá branco e 16,8% para o curauá roxo. Sendo observado que estes percentuais são comumente encontrados nas fibras lignocelulósicas em geral. Concluindo não haver diferença relevante na estabilidade térmica entre as fibras e que ambas podem ser usadas sem distinção na fabricação de compósitos.

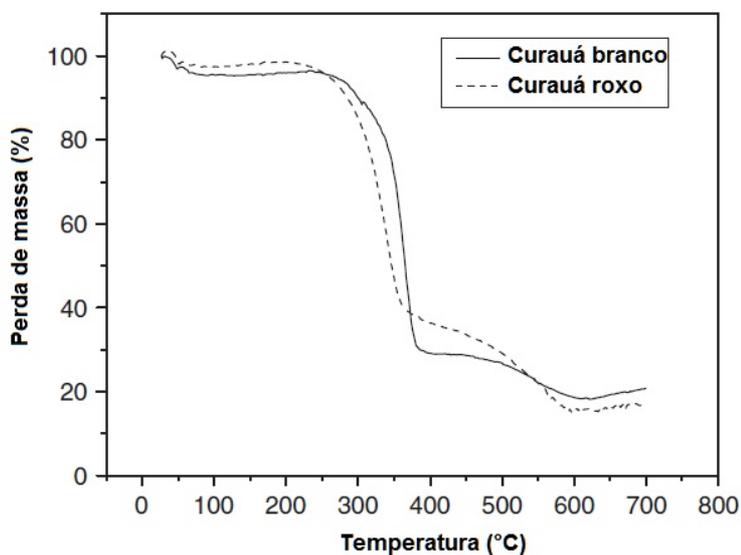


Figura 2.8. Curva Termogravimétrica do curauá roxo e branco **Fonte:** SILVA (2008)

2.4. LAMA VERMELHA

2.4.1. Processo Bayer de Produção de Alumina

A China possui maiores reservas de bauxita de 2300 Mt (8% das reservas mundiais), precedido pela Austrália, Guiné, Índia, Jamaica e Brasil (SAXENA; ASOKAN, 2010). A

bauxita matéria prima para produção de alumina Figura 2.9 é composta por hidróxidos de alumínio, incluindo principalmente gibbsita $[Al(OH)_3]$, boehmite $[\gamma-AlO(OH)]$ e diásporo $[\alpha-AlO(OH)]$, e outros compostos, tais como hematita $[Fe_2O_3]$, goetita $[FeO(OH)]$, quartzo $[SiO_2]$, rutilo / anatase $[TiO_2]$ e caulinita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$.



Figura 2.9. Minério de bauxita. Fonte: HYDRO (2015).

No entanto, a produção de alumina a partir da bauxita está associada com sérios problemas ambientais, a lama vermelha resíduo de grande importância que dependendo da qualidade da bauxita gera uma quantidade de rejeito que varia de 55 a 65% do processo de produção SAMAL *et al*, 2012 *apud* Mahadevanand Ramachandran, (1996), processo inventado por Karl Josef Bayer (1847-1904) HABASHI (1995) Figura 2.10.

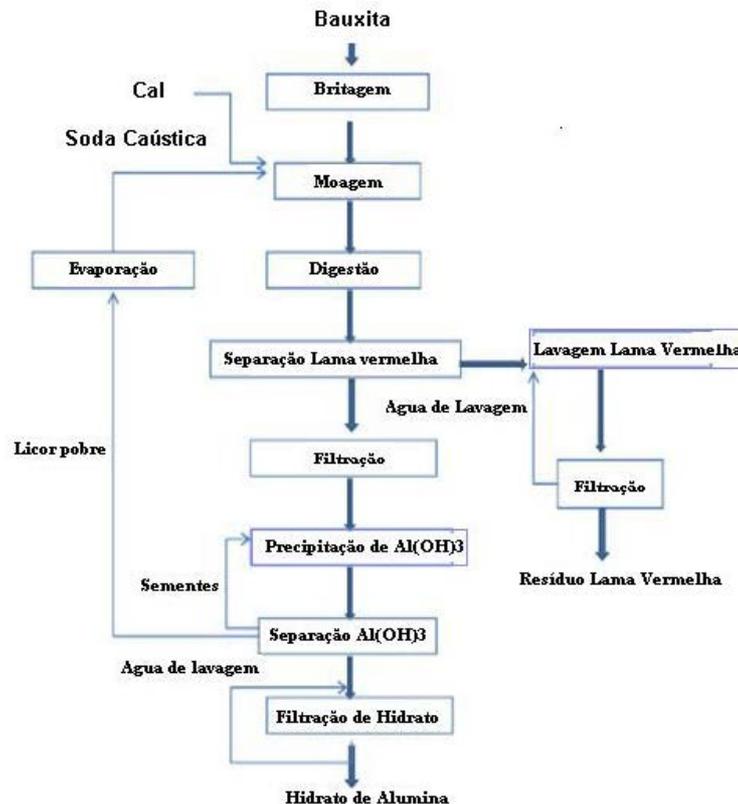


Figura 2.10. Esquema Processo Bayer Adaptado SAMAL *et al*. (2013).

A lama vermelha Figura 2.12 é um resíduo sólido de cor marrom-avermelhada produzida durante a processamento físico e químico da bauxita (LIU D., W.U, 2012) é composto principalmente de areia grossa e partículas finas, as propriedades e fases variam de acordo com a origem da bauxita e processo de produção de alumina, e que varia ao longo do tempo, quando estocada. A quantidade de álcali na lama vermelha é de cerca de 2 a 3 g/L (calculada por Na_2O), Tabela 2.2 mostra os principais constituintes da lama vermelha gerada no processo Bayer da HYDRO ALUNORTE.

Tabela 2.2 Principais constituintes químicos da Lama Vermelha (%)

| Constituintes da LV | (%) peso |
|----------------------------|-----------------|
| Fe_2O_3 | 29,538 |
| SiO_2 | 17,283 |
| CaO | 1,082 |
| Al_2O_3 | 22,539 |
| TiO_2 | 4,058 |
| Na_2O | 12,508 |
| V_2O_5 | 0,280 |
| MgO | 0,148 |
| K_2O | 0,027 |
| PF (Perda ao Fogo) | 12,035 |

Fonte: QUARESMA (2012)

A lama vermelha apresenta em sua composição mineral Figura 2.11 obtida através de difratometria de raio-x. Os minerais da lama vermelha podem ser classificados segundo duas categorias: as provenientes da bauxita, gibbsita (Gb), hematita (H), goetita (Go), Anatásio (A), quartzo (Q), caulinita (K), e uma segunda categoria que são formados durante o processo Bayer, neste caso a sodalita (S) (MAGALHÃES, 2012).

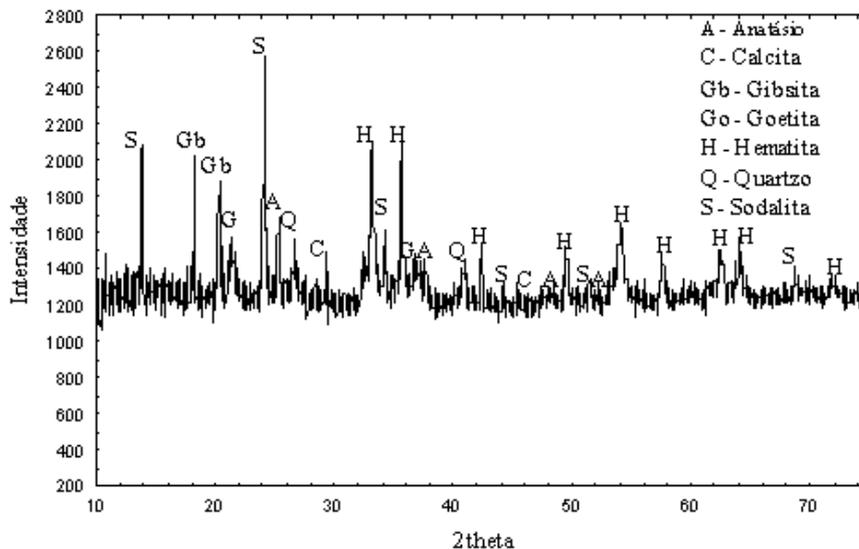


Figura 2.11. Difratoograma da Lama Vermelha submetida a secagem 100°C (% ω) **Fonte:** QUARESMA (2012).

A lama vermelha é rica em sílica, Ferro, Titânio, Alumínio, pode ser usada em tratamento de água, coagulante adsorvente, ou catalisador para remover poluentes, como fenol, cádmio, fosfatos, fluoreto, cobre, arsênio, e corantes. É usada como fase de reforço para materiais poliméricos como cloreto de polivinil (PVC), poliéster isofitálico, polipropileno (ZHANG *et al.*, 2011).



Figura 2.12. Área de disposição de lama vermelha, Aughinish, Irlanda **Fonte:** WAO (2015).

Tal como para o tratamento de lama vermelha, a primeira escolha da maioria das empresas de todo o mundo seria estocando-a em um pátio aberto ou marinho dumping. Uma vez que existe uma grande quantidade de alcalino industrial, flúor e metais pesados e outros poluentes potenciais na lama vermelha, armazenagem a longo prazo não só ocupa os escassos recursos da terra, mas também facilmente pode levar a uma

grave poluição das imediações solo, do ar e das águas subterrâneas. Por outro lado, o tratamento por marinho despejo pode destruir o equilíbrio ecológico do oceano. A violação do dique no estaleiro de armazenamento lama vermelha no Ajkai TimfoldgyarZrt fábrica de alumina na Hungria em 04 de outubro de 2010 lançou entre 600.000 e 700.000 m³ de lama vermelha cáustica em suspensão. Este incidente é inédito, dada a escala de amplitude e do tipo de material envolvido (LIU, WU, 2012 *apud* REEVES *et AL*, 2011).

2.4.2 Utilização de lama vermelha

Os tomadores de decisão empolítica, econômica, esetores sociais estão agora seriamente o ferecendo mais atenção para as questões ambientais. Consequentemente, maiores mudanças em relação à conservação dos recursos e reciclagem de resíduos por uma gestão correta a tomar lugar em nossos modos de vida e de trabalho, muitas autoridades e investigadores estão trabalhando para tero privilégio de reutilizar os resíduos Tabela 2.3 nomeio ambiente e formas economicamente sustentáveis (AUBERT, 2006).

A utilização de resíduos sólidos em materiais de construção é um de tais esforços inovadores. O custode materiais de construção está aumentando dia adia por causa da alta demanda, escassez de matérias-primas, e alto preço da energia (SAFIUDDIN *et al*, 2010).

A enorme quantidade de lama vermelha descarregada por indústrias produtoras de alumina a partir da bauxita representa um problema ambiental e econômico, numerosos relatórios propondo reutilizar a lama vermelha tem avançado, especialmente para a produção de corpos cerâmicos ou cimentos. (SGLAVO, 2000).

Tabela 1.3. Diferentes tipos de rejeitos sólidos e sua utilização e reciclagem potenciais em materiais construção civil.

| Tipo de resíduo sólido | Detalhes da fonte | Potenciais utilização e reciclagem |
|-------------------------------|---|--|
| Agroindustrial(orgânico) | Bagagem, arroz e palha de trigo e casca, serras e resíduos de moinho, casca de amendoim, juta, sisal, haste do algodão, resíduos vegetais | Placas de cimento, painéis de partículas, isolamento placas, painéis de parede, telhas, pasta, painéis de construção fibrosos, tijolos, à prova de ácido cimento, fibra de coco, compósitos reforçados, compósitos poliméricos |

Tabela 2.3. Continuação.

| | | |
|----------------------------|---|---|
| Industrial (inorgânico) | Resíduos da combustão de carvão, escória de aciaria, lama vermelha resíduo de bauxita, restos de construção | Tijolos, blocos, telhas, cimento, tintas, fino e graúdo agregados, concreto, madeira produtos substitutos, produtos cerâmicos |
| Mineração/ Mineral | resíduos de carvão; resíduos de mineração rejeito de ferro, cobre, zinco, ouro e indústrias de alumínio | Tijolos, finos e grossos agregados leves, telha |
| Resíduos não perigosos | Resíduos de gesso, lama de cal, resíduos de pedra de cal, vidro quebrado e cerâmicas, resíduos de processamento mármore, pó de forno | Blocos, tijolos, cimento clinker, hidráulico ligante, placas de estafe, gesso, cimento super-sulfatado |
| Resíduos perigosos | Materiais contaminados, resíduos de jateamento galvanização, metalúrgica, lamas de águas residuais e estações de tratamento, resíduos curtume | Quadros, tijolos, cimento, cerâmica, azulejos |

Fonte: PAPPU (2007).

2.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

A resistência e a rigidez mecânica podem ser variadas significativamente em diferentes áreas do compósito pela seleção do tipo, da forma, da orientação apropriada das fibras e pelo controle do local de concentração da fibra (CUNHA, 2006).

As geometrias dos cdp's utilizados nos ensaios de resistência à tração foram adotadas conforme a norma ASTM D 3039/D 3039M-00, que determina que os cdp's tenham uma espessura entre (0,508 a 2,54)mm, uma largura de 12,7mm e um vão de no mínimo 127mm para os ensaios de tração longitudinal Figura 2.14, onde a aplicação da carga é na orientação normal do compósito (através da espessura). Para os ensaios de tração transversal Figura 2.13, uma largura de 25,4mm e comprimento útil mínimo de 38,1mm, com a carga aplicada ortogonalmente à orientação do plano dos compósitos. Os tabs para fixação na máquina de ensaio são de fibra de vidro medindo (60 x 12,75 x 7,4)mm para a tração longitudinal (CUNHA, 2006)

Os tabs para fixação na máquina de ensaio são de fibra de vidro medindo (60 x 12,75 x 7,4)mm para a tração longitudinal e (60 x 25,4 x 7,4)mm para a tração transversal sendo colados nas extremidades dos cdp's. Os tabs são colados com filme adesivo para reduzir a concentração de tensões na interface de colagem, distribuir homogeneamente as forças de agarramento na fixação do corpo-de-prova na máquina de ensaio e proteger a superfície do laminado contra danos.

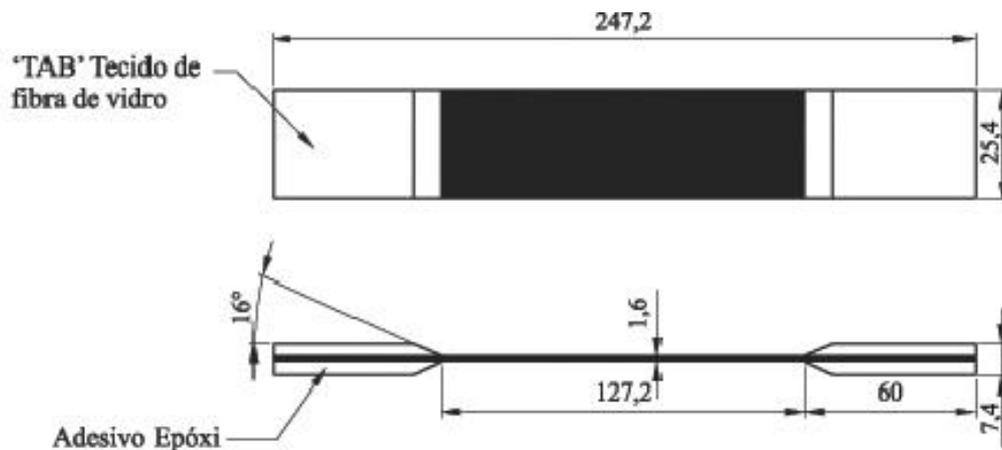


Figura 2. 13. Esquema Representativo corpos de prova ensaio de tração transversal **Fonte:** EBAH (2013)

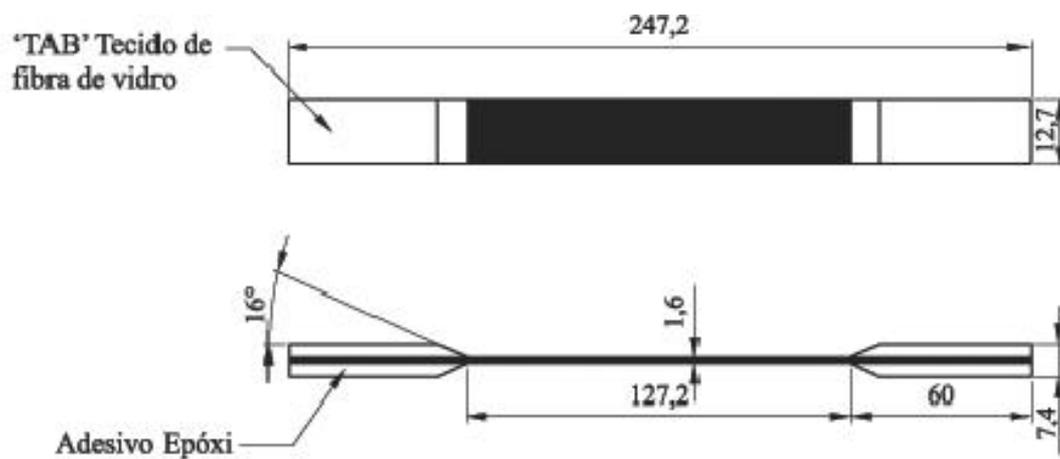


Figura 2. 14. Esquema representativo corpos de prova ensaio de tração longitudinal **Fonte:** EBAH (2013)

Os tabs são obtidos a partir de laminados de vidro/epóxi, que devido ao baixo módulo de elasticidade do compósito, deformam-se elasticamente distribuindo tensões por uma grande área e absorvendo energia. Para cada família de compósito foram avaliadas 6 amostras com dimensões de (247,2 x 25,4 x 1,6)mm, sendo comprimento x largura x espessura, para a tração transversal e (247,3 x 12,7 x 1,6)mm para a tração longitudinal (CUNHA, 2006).

CAPÍTULO 3

MATERIAS E MÉTODOS

3.1. MATÉRIA PRIMA

Para fabricação do compósito utilizou-se para matriz o poliéster isofitálico proveniente da empresa A AEROJET BRASILEIRA DE FIBERGLASS LTDA, lama vermelha cedida pela empresa HYDRO ALUNORTE S.A, e fibra de curauá *Ananas erectifolius* proveniente da empresa PEMATEC TRIANGEL de Santarém-PA, o acelerador de cobalto (solução de cobalto 1,5% v/v) (CAT.MET.UMEDECIDO), 1% de catalizador metil-etil-cetona também adquiridos de AEROJET.

A resina utilizada AM 910AEROJET®, Figura 3.1de média reatividade, amarelada,não acelerada (ausência de promotor de reticulação), baixa viscosidade, boa resistência química as principais característica estão apresentadas na Tabela 3.1.



Figura 3.1. Resina de poliéster AM 910

Tabela 3.1 Características da resina AM 910 AEROJET

| PROPRIEDADE | REFERÊNCIA | UNIDADE | MEDIDA |
|--------------------------------------|------------|-------------------|-----------|
| Viscosidade <i>Brookfield</i> 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 Sólido | I-CQ-01 | % | 59 -63 |
| Massa Específica a 25°C | I-CQ-16 | g/cm ³ | 1,10-1,15 |

A lama vermelha Figura 3.2 resíduo do processo Bayer, proveniente da empresa Hydro Alunorte situada na cidade de Barcarena-Pará, foi submetida à secagem em estufa com recirculação do ar a 100°C durante 24h. Após a secagem a LV foi desintegrada manualmente e peneirada, em peneira de *Tyler* de 28 *mesh* para facilitar a desagregação do resíduo.



Figura 3.2. Fotografia lama vermelha

As fibras de curauá foram adquiridas da região de Santarém-PA, as fibras foram extraídas em máquinas extratoras, submetendo-se as folhas da planta de curauá ao sistema de laminas que promovem a raspagem da mucilagem que envolve as fibras. Em seguida foram secas de forma natural e embaladas em fardos de 25 kg aproximadamente.

As fibras de curauá, Figura 3.3, foram cardadas (operação que consiste na limpeza, separação e orientação dos feixes de fibra por ação mecânica, utilizando-se escovas de aço manualmente). Em seguida a fibra foi cortada em tamanho médio de 3cm, visando a formação de uma manta para o reforço, sendo as fibras distribuídas randomicamente. Um molde de aço com tampa de forma retangular foi utilizado para a obtenção das placas.



Figura 3.3. Fotografias fibras de curauá antes da cardagem

As fibras de curauá cardadas onde partes do material da superfície das fibras foram removidas, como a hemicelulose e sujeiras superficiais, facilitando a separação dos feixes de fibra permitindo a liberação de fibrilas dos feixes originais, e assim, conferindo ao material maior facilidade para a impregnação com resina, além de favorecer a orientação das fibras.

As fibras foram distribuídas uniformemente no molde de aço Figura 3.4a em seguida, foram prensadas com carga de 0,1 tonelada para conformação da manta e redução do volume, Figura 3.4b.

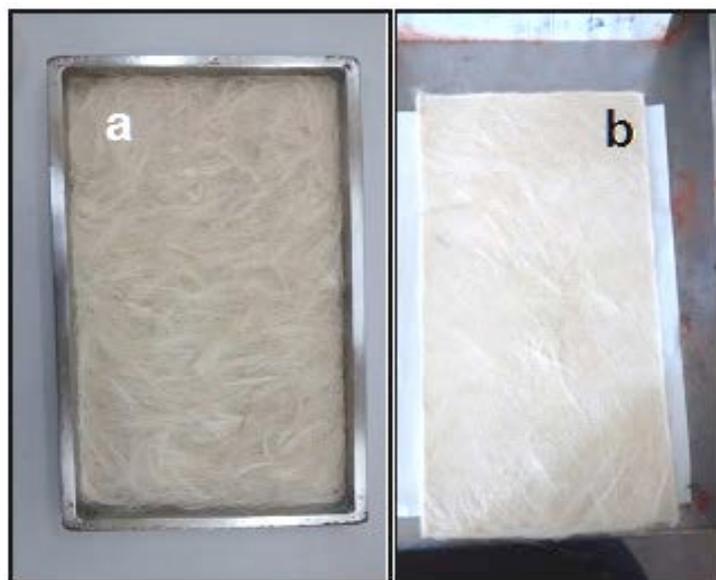


Figura 3.4. Fotografias da manta de fibra no molde (a) e da manta fibra após a prensagem (b).

(a)

(b)

Foi utilizado neste trabalho acelerador comercialmente conhecido como CAT. MET. UMEDECIDO 1,5% (solução de octoato de cobalto 1,5%), e catalisador produto comercial BUTANOX AM 50 Figuras 3.5a e 3.5b.



Figura 3.5. Cat. met. Umedecido 1,5% (a), Produto Comercial BUTANOX M50 (AEROJET®) MEK-P (b)

3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.2.2 Preparação da placa compósito

A Figura 3.6 ilustra o molde com dimensões de 32,1cm de comprimento x 17,3 cm de largura x 1,8cm de espessura foi limpo com água e detergente e secado com ar quente seguido da distribuição em sua superfície de desmoldante líquido fornecido pela AEROJET FIBERGLASS, para facilitar a remoção do compósito após prensagem.

A fase dispersante, matriz de poliéster isofitálico, proveta graduada de 500 mL foi utilizada para medição da resina e colocou-se em recipiente. Pipeta graduada de 4mL foi utilizada para adicionar o acelerador de cobalto (1,5% v/v), foi agitado manualmente até a observação visual de uma fase contínua escura, seguido da adição da lama vermelha (v/v), através da densidade ($\rho=2,13\text{g/cm}^3$) foi medido a quantidade de amostra utilizada, foi gradativamente adicionada com agitação manual constante onde formou uma polpa densa. Pipeta graduada de 10mL foi utilizada para adicionar 1%(v/v) de catalisador metil-etil-cetona, a mistura foi colocada no molde e após aproximadamente 20 min atingiu seu ponto em gel foi compactada a uma pressão de 0,5MPa, na prensa com capacidade de 15 toneladas.

A prensagem tem como propósito conformar a placa de compósito, homogeneizar o processo e atuar na espessura do material produzido. A Figura 3.7 ilustra o fluxograma do processo de fabricação das placas de compósito.



Figura 3.6 Molde de aço inoxidável para conformação do compósito

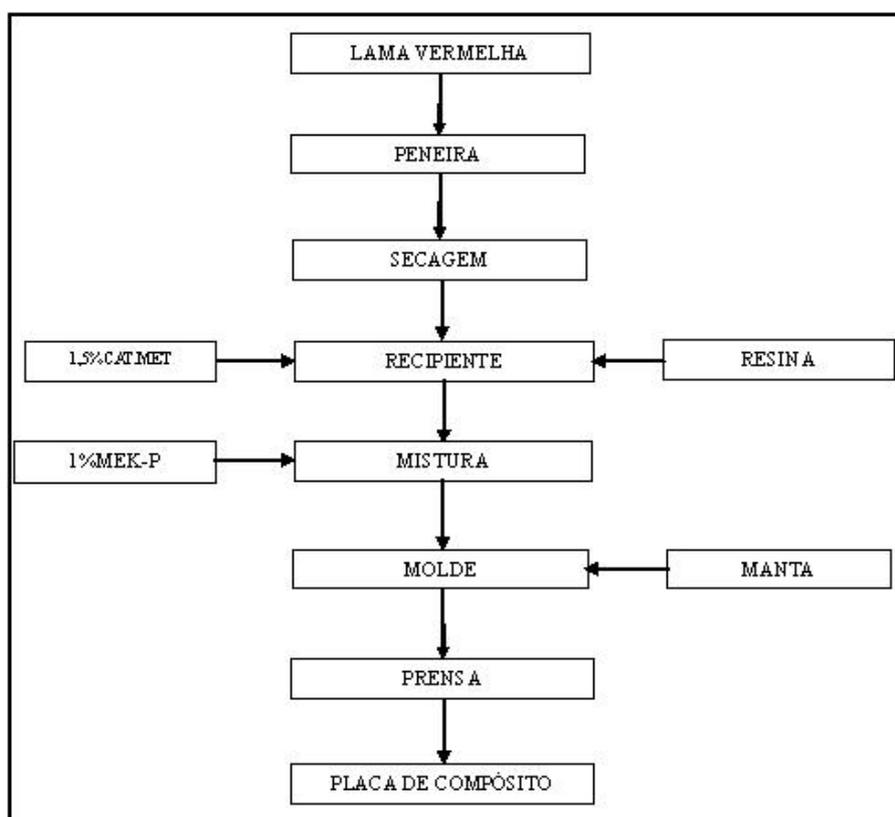


Figura 3.7. Fluxograma fabricação placa de compósito

Foram fabricadas placas com as proporções relacionadas na Tabela 3.3, variando o percentual de cada componente em relação ao volume de resina poliéster, após processo de prensagem foram cortadas por serra diamantada, para obtenção de corpos de prova para os ensaios de

Tabela 3.2 Composição dos compósitos produzidos

| %Resina | %LV | %FCC |
|----------------|------------|-------------|
| 100 | 0 | 0 |
| 90 | 10 | 0 |
| 80 | 20 | 0 |
| 70 | 30 | 0 |
| 90 | 0 | 10 |
| 80 | 10 | 10 |
| 70 | 20 | 10 |
| 60 | 30 | 10 |

3.3. ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova Figura 3.9 foram obtidos segundo norma ASTM 3039, foram ensaiados na máquina AROTEC WDW - 100 E III Figura 3.8 com carga de 2mm/min, localizada no Laboratório de Resistência dos Materiais do Instituto Federal Tecnológico do Pará (IFPA), foram feitos ensaios com cinco corpos de prova para cada compósito de lama vermelha reforçado com 10% de fibra de curauá, com comprimento útil de 150mm.

Este equipamento possui duas garras onde o corpo de prova é colocado e tracionado, os resultados são observados no computador.



Figura 3.8. Fotografia do Equipamento universal de ensaio de tração



Figura 3.9. Fotografias corpos de prova

3.4. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE E POROSIDADE APARENTE

Para determinação da massa específica aparente utilizou-se a seguinte fórmula:

$$MEA = \frac{M_s}{(M_s - M_i)} \times \rho_{H_2O}$$

Sendo: MEA = massa específica aparente

M_s = massa seca.

M_i = massa imersa.

Para obtenção da massa específica aparente multiplica-se o resultado pela massa específica da água a $T=25^\circ\text{C}$, onde $\rho_{\text{água}}= 1\text{g/cm}^3$

A porosidade aparente foi calculada através da fórmula:

$$PA = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \times 100$$

Sendo: PA = porosidade aparente

M_s = massa seca.

M_i = massa imersa.

M_u = massa úmida

Através do aparato Figura 3.10 foi calculado a massa seca, úmida e imersa, para cada corpo de prova, que consiste em uma balança semi-analítica, um recipiente com volume de água suficiente para cobrir as amostras e suporte que é acoplado a balança para medição da massa imersa.



Figura 3.10. Fotografia do Equipamento para medição massa seca, úmida e imersa.

Os ensaios de densidade e porosidade foram feitos para compósitos com e sem fibra de curauá.

3.5. ANÁLISE MORFOLÓGICA

As imagens da fratura do ensaio de tração foram obtidas no equipamento TM 3000 *Microscope Hitachi*, Figura 3.11, utilizando elétrons retroespalhados e energia de 5kv.



Figura 3.11. Fotografia do Equipamento MEV

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova após os ensaios de tração Figura 4.1, apresentam certa regularidade nas posições de fratura, podendo observar que não houve quebra na região de garra, evento possível de ocorrer em compósito com poliéster termofixo por ser rígido porém frágil e pelas imperfeições provocadas pelo corte dos corpos de prova.



Figura 4.1. Corpos de prova após análise de tração

A Figura 4.2 e 4.3 mostra o comportamento mecânico dos compósitos com adição de lama vermelha e fibra de curauá. O Módulo foi reduzindo com aumento percentual do rejeito reforçado com 10%(v/v) de fibra de curauá.

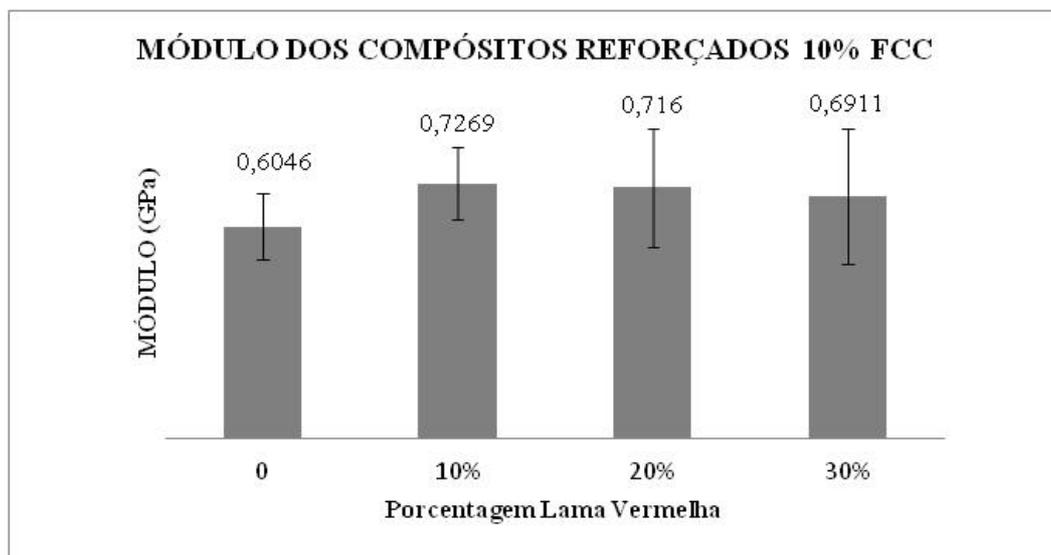


Figura 4.2. Gráfico Módulo de elasticidade dos compósitos reforçados 10%FCC

A adição de lama vermelha como carga teve maior resistência com concentração de 10%(v/v), acima desse percentual sua resistência diminui.

A adição de fibra mostra que o material tende a ter propriedades mecânicas mais tenaz, o que pode ser observado nos resultados.

Segundo SAXENA (2012) os resultados dos testes de módulo de ruptura em diversas combinações de poliéster, de lama vermelha e fibras de sisal, verifica-se que a adição de lama vermelha no polímero aumenta o módulo de Young de laminados. Surpreendentemente, o módulo de ruptura é reduzido em compósitos de fibra de sisal de poliéster cortadas, e que melhores resultados podem ser obtidos entre lama vermelha/poliéster/fibra tecida. Neste trabalho com fibra cortada de curauá observou-se que o módulo de Young diminui conforme literatura.

SAXENA (2012) o reforço com fibras tecidas tem interconectividade entre as fibras adjacentes, o que dá força adicional para complementar a fraca interface resina/fibra. Para melhor resultado custo e eficácia segundo SAXENA (2012) a melhor combinação é entre resina/lama vermelha/fibra tecida.

SATAPATHY e PATNAIK (2008) verificaram que em todas as variações de lama vermelha 10%, 20% e 30% a resistência à tração dos compósitos diminuiu com o aumento de teor de carga.

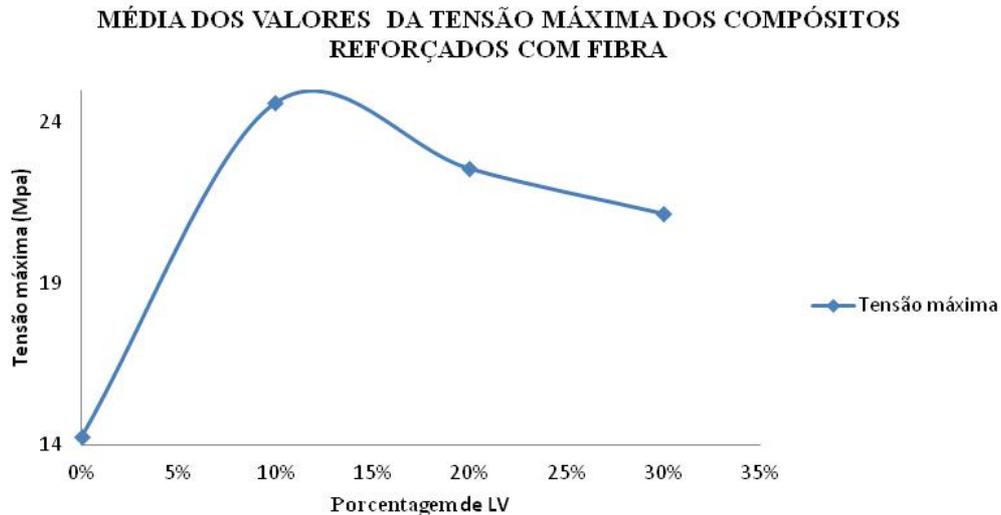


Figura 4.3. Gráfico das médias dos valores das tensões máximas dos compósitos reforçados com 10%FCC

Para a matriz de poliéster isofitálico (resina termofixa) o módulo de elasticidade teórico é de 2,06-4,41GPa (CALLISTER, 2012).

Pode haver duas razões para o declínio da resistência a tração do composto com adição de LV; Uma possibilidade é que a reação química na interface partícula/matriz é fraca para transferir a tensão de tração para a carga; a outra é que os pontos dos cantos das partículas de forma irregular resultem em concentrações de tensão na matriz poliéster (SATAPATHY e PATNAIK, 2008).

Segundo CALLISTER (2012) as características mecânicas de um composto reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também do grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é importante para extensão dessa transmissão de carga.

Segundo ZHANG *et al.* (2011) obtiveram aumento da resistência a tração em compósitos poliméricos usando lama vermelha nas frações mássicas de 0% a 15%, mas em frações mássicas acima de 20% a resistência a tração diminuiu drasticamente. Onde atribuem este comportamento a formação de maior número de agregado da partícula de lama vermelha em percentual acima de 15 % (m/m), contribuindo para o aparecimento de regiões de elevada concentração de tensões, que reduzem a resistência ao esforço de tração.

O aumento de lama vermelha acima de 15% (m/m) exerce influência positiva referente ao módulo de Young, pela contribuição da rigidez das partículas de lama vermelha (ZHANG *et al.*2011).

No presente trabalho ocorreu comportamento distinto em relação ao uso de LV e fibra de curauá, os resultados da tensão de ruptura com fibra de curauá sem LV foi de 14,24 Mpa. Com o aumento de lama vermelha para 10% (v/v) foi alcançada tensão de ruptura de 24,62 Mpa e para os valores de frações volumétricas de 20 e 30% de LV e 10% de fibra de curauá os resultados de tensão reduziram para 22,59Mpa e 21,19 Mpa respectivamente. Este comportamento é justificado pelo aumento da dispersão das fibras de curauá com a adição de maior percentual de LV no compósito, esse aspecto pode ser visualizado nas microscopias das Figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

4.2. DENSIDADE E POROSIDADE APARENTE

A Tabela 4.1 evidencia os resultados de densidade e porosidade nas diferentes proporções de rejeito de lama vermelha e com reforço de 10% de fibra de curauá cardada (FCC).

Tabela 4.1. Resultados densidade e porosidade das placas produzidas

| % Resina | % LV | % FCC | ρ (g/cm³) | POROSIDADE |
|-----------------|-------------|--------------|---|-------------------|
| 100 | 0 | - | 1,19 | 0,55 |
| 90 | 10 | - | 1,32 | 0,56 |
| 80 | 20 | - | 1,44 | 2,01 |
| 70 | 30 | - | 1,61 | 2,14 |
| 90 | 0 | 10 | 1,18 | 2,37 |
| 80 | 10 | 10 | 1,29 | 3,95 |
| 70 | 20 | 10 | 1,35 | 5,30 |
| 60 | 30 | 10 | 1,49 | 8,78 |

LV Lama vermelha; FCC Fibra cardada; ρ Massa específica

Analisando os resultados de massa específica aparente (MEA) e porosidade aparente (PA) percebe-se que há um crescimento das mesmas em relação a matriz polimérica com a adição de lama vermelha, o que ocorre devido as características do resíduo cerâmico ele tende a aglomerar com aumento de seu percentual, possui uma elevada porosidade, com a adição de 10% de fibra de curauá cardada (FCC) comparando a densidade deste material com material sem fibra há uma redução na mesma, porém a porosidade aumenta em relação ao compósito sem fibra, devido a fibra vegetal ser material absorvente, que pode ser melhor observado na Figura 4.4 ilustra as massas específicas aparentes para compósitos com 0% FCC e 10%FCC.

Para CUNHA *et AL* (2012) a densidade do compósito aumenta com o aumento do teor de lama vermelha no polímero.

MASSA ESPECÍFICA APARENTE DOS COMPÓSITOS 0% E 10% FCC

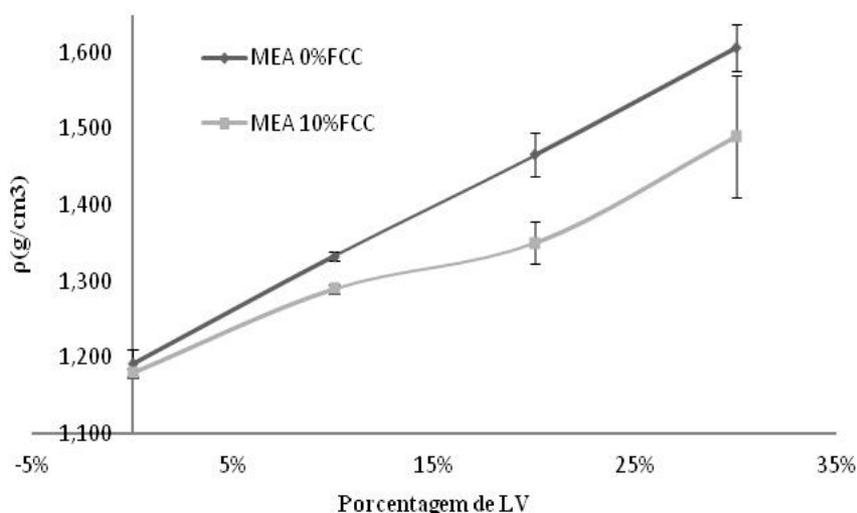


Figura 4.4 Gráfico da Massa Específica Aparente (MEA) do compósito sem fibra de curauá

Os resultados mostraram que a adição de fibra de curauá tem um efeito redutor na massa específica do compósito, essa fibra tem como característica ser um material de baixa massa específica, relacionado com a expressiva quantidade de hemicelulose e outros constituintes com estruturas químicas semelhantes que conferem a fibra a leveza característica dessa matéria prima.

A Figura 4.5 ilustra o comportamento da porosidade com a adição de 10%(v/v) de fibra de curauá como reforço sem lama vermelha e com a adição de LV em 10, 20 e 30% (v/v). Observa-se que com o aumento de LV acima de 10% (V/V) a porosidade do

compósito aumenta até três vezes a porosidade em relação a matriz. E com a adição de fibra de curauá o aumento da porosidade é extremamente elevado, alcançando o máximo de 14 vezes a porosidade do compósito em relação a matriz. Esse comportamento pode ser explicado pelas seguintes razões: A primeira refere-se a capacidade de agregação das partículas de lama vermelha que aumenta com o aumento da fração volumétrica, favorecendo a formação de vazios no interior do compósito. Outro fator é devido à elevação da temperatura durante a cura do polímero pela geração de calor ao reagir com a lama vermelha, que libera vapores capazes de formar bolhas na matriz. E como a adição de fibra é devido a existência de vazios no interior destas.

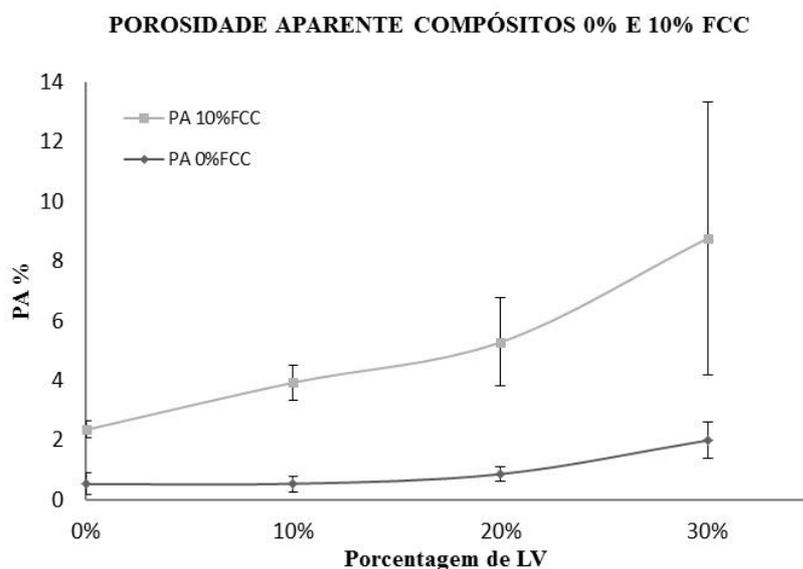


Figura 4.5 Gráfico porosidade aparente compósito 0% e 10% FCC

Analisando a massa específica aparente (MEA) como porosidade (PA) aumenta em ambos os casos com fibra e sem fibra, sendo que há um maior aumento com a adição de fibra da porosidade aparente, a massa específica acontece o inverso o compósito com fibra diminui sua densidade comparado com sem fibra.

4.3. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

4.3.1. Caracterização microestrutural das fraturas dos compósitos reforçados com fibra de curauá

A Figura 4.6 ilustra a micrografia gerada no MEV, do compósito 10% LV

reforçado com 10% de fibra, pode observar espaços vazios, regiões com maior concentração de fibra, áreas onde as fibras foram sacadas (*pull out*) da matriz que podem estar relacionada a impregnação da fibra matriz e lama vermelha durante processo de fabricação, que apresentou maior resistência a tração e Módulo de Young.

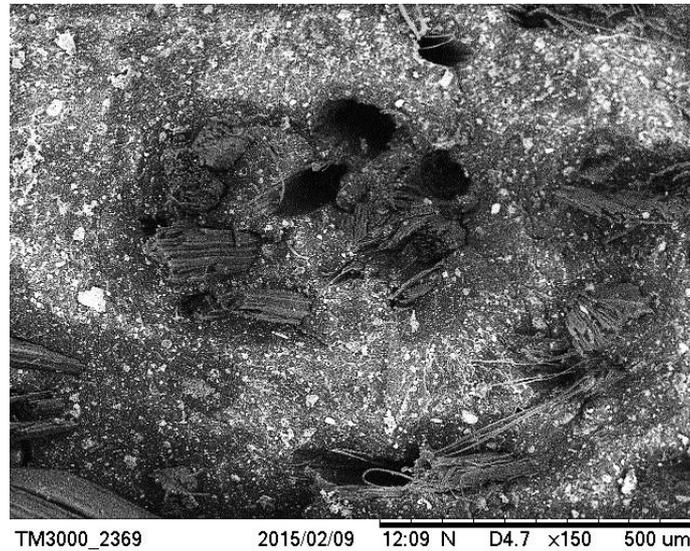


Figura 4.6 Microscopia eletrônica varredura compósito 10%LV reforçado 10% FCC

Observa-se na Figura 4.7 que ocorre os mesmos fatores para compósito com 20%LV reforçado com 10%FCC, há vazios entre as fibras e pontos de *pull out* de fibra, e bolhas.

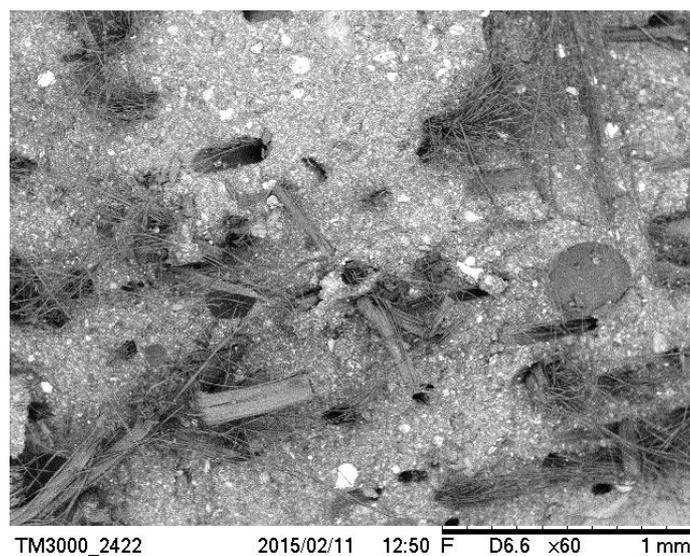


Figura 4.7. Microscopia eletrônica de varredura compósito 20%LV reforçado 10% FCC

A Figura 4.8 ilustra a microestrutura do compósito com 30%(v/v) de lama vermelha reforçado com 10% de FCC.

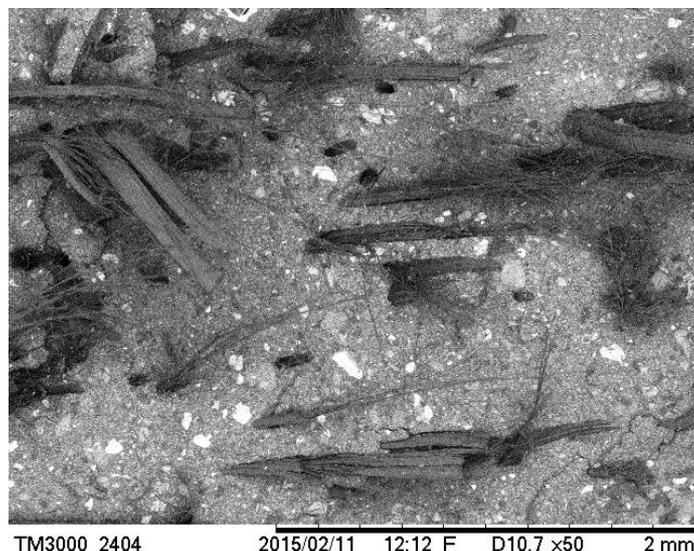


Figura 4.8.Microscopia eletrônica de varredura compósito 30% LV reforçado 10%
FCC

Para todas as imagens analisadas suas micrografias ilustram, que há espaços vazios, descontinuidade com relação a fibra-matriz, buracos, e que influenciaram na nos resultados de resistência. Segundo CUNHA *et al*, 2012 o teor de sílica na lama vermelha, sugere a formação de fissuras, promovido por descontinuidades de ligações cadeia polimérica.

Através dos resultados obtidos de resistência a tração, densidade e porosidade, as características físicas e químicas dos materiais envolvidos para fabricação do compósito influenciam diretamente no produto, a lama vermelha para este trabalho obteve melhor resultado para proporção de 10% v/v com reforço de fibra de curauá de 10% v/v, acima deste valor diminui a resistência e aumenta sua densidade e porosidade, as imagens feitas em MEV, mostra as variáveis que influenciam principalmente na resistência do compósito, como visto nas imagens há fissuras, pontos de tensão, onde a lama vermelha se aglomerou e aumentou a rigidez, sendo assim aumento no módulo de Young, para melhor resultado a dispersão da lama vermelha tem que ser a mais homogênea possível, e com o aumento de rejeito tende a diminuir essa eficiência, com isso na proporção de 10% v/v de lama vermelha obteve-se o melhor resultado.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕESE SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

- A adição de lama vermelha e fibra de curauá em poliéster isoftálico reduziu significativamente a tensão de ruptura em testes de tração, com resultado de 14,24 Mpa;
- O melhor resultado de resistência à tração foi 24,62 MPa, nas proporções de 10%(v/v) de LV e 10% (v/v) de Fibra;
- o aumento de lama vermelha contribui com a melhoria do modulo de elasticidade, alcançando um máximo de 0,7269 GPa para compósito de 10%(v/v) de LV e 10% (v/v) de fibra;
- As imagens obtidas no MEV, mostraram os pontos de falha que são fatores que influenciam nos resultados das propriedades mecânicas e físicas dos compósitos;
- Adição de 10, 20 e 30% (v/v) LV proporcionou aumento da massa específica em 11; 21 e 35% respectivamente. A porosidade apresenta efeito drástico acima de 20% (v/v) de LV, chegando a triplicar seu valor com a adição de 30% (v/v) de LV.
- Com adição de reforço de 10% (v/v) fibra, este valor foi 14 vezes maior em relação a matriz da porosidade.

5.2 SUGESTÕES

- Para melhor discussão dos resultados fazer EDS dos compósitos para identificar presença de sílica na LV, assim avaliar o comportamento mecânico dos compósitos com aumento do mesmo;
- Realizar ensaio de MEV acima de mil vezes para melhor visualização da adesão fibra/matriz/LV no compósito e identificação de pontos de tensão assim como aglomerados de partículas de LV;
- Realizar testes físicos e mecânicos na fibra de curauá utilizada, assim melhor discutir os resultados comparando com cada matéria prima utilizada;
- Realizar outros testes como resistência a abrasão, inflamabilidade, flexão etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCEL, <<http://www.ancel.com.br/>>, Acessado em março de 2015.

ASAAD, Jeannette N. Synthesis and characterization of unsaturated polyester/carborundum composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 129, n. 4, p. 1812-1819, 2013.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3039_D3039M-00E02**, Test method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2005.

AUBERT, J. E.; HUSSON, B.; SARRAMONE, N. Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement: Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash. **Journal of hazardous materials**, v. 136, n. 3, p. 624-631, 2006.

BAGHERPOUR, S.; BAGHERI, R.; SAATCHI, A.. Effects of concentrated HCl on the mechanical properties of storage aged fiberglass polyester composite. **Materials and Design**, vol. 30, nº 2, p. 271-274, 2009.

BARCELLOS, Ivonete O.; DE SOUZA, Antônio C.; SELKE, Anna E. Incorporação de Lodo Industrial em Compósitos de Resina Poliéster. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, p. 155-159, 2009.

BALOMENOS, E. et al. Efficient and complete exploitation of the bauxite residue (red mud) produced in the Bayer process. In: **Proceedings of EMC**. 2011. p. 729-749.

CALLISTER, W. D. Rethwisch; tradução Soares, Sergio Murilo Stamile; revisão técnica D'Almeida, José Roberto Moraes. Rio de Janeiro: LTC 2012, **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 8 th Ed

CALLISTER, W. D.. **Materials Science and Engineering**: an introduction. 7th edition. John Wiley & Sons, 2007. p. 578-579.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia De Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 5ªed. 589p. 2002.

CUNHA, E. J. S.; MIRANDA, R. M.; SOUZA, J. A. S.; OLIVEIRA, M. Jr. A. Influence of the addition of red mud from Bayer process in polymer matrixes of isophthalic polyester. **InternationalComitee for the Study of Bauxite Alumina Aluminium – ICSOBA (2012)**.

CUNHA, José Antônio P.; COSTA, Michelle L.; REZENDE, Mirabel C. Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência à tração de compósitos de fibra de carbono/epóxi modificada. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 3, p. 193-201, 2006.

QUARESMA, Danielly da Silva. **Estudo hidrometalúrgico de compostos de titânio proveniente do resíduo do processo Bayer**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2012. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

DE PAIVA, Jane Maria F., Elisabete Frollini. "Matriz termofixa fenólica em compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar." **Polímeros: Ciência e Tecnologia** (1999).

EBAH, <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAACqsAF/ensaio-tracao> Acessado, fevereiro, 2013.

GU, H..Behaviours of glass fibre/unsaturated polyester composites under seawater environment.**Materials and Design**, vol. 30, nº 4, p. 1337-1340, 2009.

HABASHI, F., 1995.**Bayer's process for alumina production: a historical perspective**. Bull. Hist. Chem. (17/18), 15–19.

HYDRO,<http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-noBrasil/Produtos/Bauxita-ealumina/Bauxita/> <Acessado em março de 2015>

ISHIZAKI, Marina H. et al. Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 3, p. 182-186, 2006

LIU, Wanchao; YANG, Jiakuan; XIAO, Bo. Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues. **Journal of hazardous materials**, v. 161, n. 1, p. 474-478, 2009.

LIU, D. & W. U, C. Stockpiling and Comprehensive Utilization of Red Mud Research Progress 2012; 5, 1232-1246.

LOPES, Felipe Perissé D. et al. Characterization of Thermal Behavior of Polyester Composites Reinforced with Curaua Fibers by Differential Scanning Calorimetry. In: **EPD Congress 2011**. John Wiley & Sons, Inc. p. 297-303

MESQUITA, F. N. de A. **Simulação do comportamento mecânico de tubos em PRFV submetidos à pressão hidrostática**. 2008.

MONTEIRO, Sergio Neves et al. Processing and properties of continuous and aligned curaua fibers incorporated polyester composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 1, p. 2-9, 2013.

NAGLIS, Marcelo MM; D'ALMEIDA, José RM. Avaliação dos modos de falha sob impacto de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras. **Polímeros**, v. 8, n. 1, p. 54-60, 1998.

PAPPU, Asokan; SAXENA, Mohini; ASOLEKAR, Shyam R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. **Building and Environment**, v. 42, n. 6, p. 2311-2320, 2007.

PEMATEC TRIANGEL, <http://www.pematec.com.br/principal.htm>. Acessado em outubro de 2014

RIVAS MERCURY, J. M. et al. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Revista Matéria**, v. 15, n. 3, p. 445-460, 2010.

SAMAL, Sneha; RAY, Ajoy K.; BANDOPADHYAY, Amitava. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India—a review. **International Journal of Mineral Processing**, v. 118, p. 43-55, 2013.

SAFIUDDIN, Md et al. Utilization of solid wastes in construction materials.

SAXENA, M., ASOKAN, P., RUHI, B., and VERMA, A. Incorporation of industrial wastes along with natural fiber for the development of innovative building materials. In: Dr. B. Mishra, Dr. C. Ludwig, and Dr. S. Das (Eds.). **Proceeding of the Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology**, TMS, Cancun, Mexico, pp 451-462, 2008.

SAXENA, M., ASOKAN, P. Utilization of Bauxite RedMud in Wood Substitute Composites. **The International Committee for the Study Of Bauxite, Alumina and Aluminium (ICSOBA)**, v. 3 pag. 9-19, 2010.

SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curauá fiber: a new alternative to polymeric composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, v. 27, n. 1, p. 103-112, 2008

SGLAVO, V. M. et al. Bauxite' redmud' in the ceramic industry. Part 1: thermal behaviour. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 20, n. 3, p. 235-244, 2000.

SATAPATHY, Alok; PATNAIK, Amar. Analysis of dry sliding wear behavior of red mud filled polyester composites using the Taguchi method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008.

SPERLING, L. H. **Introduction to Physical Polymer Science**. 4th edition. John Wiley & Sons, 2006. p. 765.

TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. D. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III – morphology and properties of Brazilian curauá fibers.** Composites: Part A, n. 37, p. 2227-2236, 2007.

VASILIEV Valer MOROZOV., MOROZOV Evgeny V. **Mechanics And Analysis Of Composite Materials.** Elsevier Science Ltd. All rights reserved, 1^a ed. 412p. 2001

WORZAKOWSKA, Marta. Chemical modification of unsaturated polyesters influence of polyester's structure on thermal and viscoelastic properties of low styrene content copolymers. **Journal of applied polymer science**, v. 114, n. 2, p. 720-731, 2009.

ZAH, R. et al. Curauá fibers in the automobile industry—a sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 11, p. 1032-1040, 2007.

ZHANG, Yihe et al. Red mud/polypropylene composite with mechanical and thermal properties. **Journal of Composite Materials**, v. 45, n. 26, p. 2811-2816, 2011.