



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

JULIANA THOMAZ LEFLOCH BARBOSA

**CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS FEITOS COM
RESÍDUOS PÓS-CONSUMO (POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO) E
INDUSTRIAIS (LAMA VERMELHA E FIBRA DE VIDRO/RESINA
EPÓXI)**

Bauru
2019



JULIANA THOMAZ LEFLOCH BARBOSA

**CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS FEITOS COM
RESÍDUOS PÓS-CONSUMO (POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO) E
INDUSTRIAIS (LAMA VERMELHA E FIBRA DE VIDRO/RESINA
EPÓXI)**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini

Bauru
2019



Barbosa, Juliana Thomaz Lefloch.

Caracterização de compósitos poliméricos feitos com resíduos pós-consumo (poliestireno de alto impacto) e industriais (lama vermelha e fibra de vidro/resina epóxi) / Juliana Thomaz Lefloch Barbosa, 2019
95 f. il.

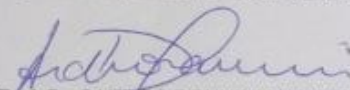
Orientador: Sandro Donnini Mancini

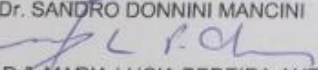
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

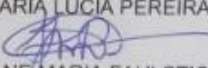
1. Resíduos industriais. 2. Incorporação. 3. Poliestireno. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JULIANA THOMAZ LEFLOCH BARBOSA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 25 dias do mês de janeiro do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Unesp ICT - Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / ICT - Unesp / Sorocaba, Prof^ª. Dr^ª. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / ICT - Unesp / Sorocaba, Prof^ª. Dr^ª. JANE MARIA FAULSTICH DE PAIVA do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos / Campus de Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JULIANA THOMAZ LEFLOCH BARBOSA, intitulada **CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS FEITOS COM RESÍDUOS PÓS-CONSUMO (POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO) E INDUSTRIAIS (LAMA VERMELHA E FIBRA DE VIDRO / RESINA EPÓXI)**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI


Prof^ª. Dr^ª. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA


Prof^ª. Dr^ª. JANE MARIA FAULSTICH DE PAIVA

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar saúde, determinação e oportunidade para realização desse projeto, e me amparar em todos os momentos dessa jornada.

À minha família, por todo amor e confiança, e a todos que de alguma forma colaboraram para realização desse sonho.

Ao professor e orientador Sandro Donnini Mancini, pela oportunidade da realização deste projeto e por todo conhecimento e dedicação durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Sinctronics, em nome da Cristina Belli – gerente de programação, pela oportunidade da parceria, por todo conhecimento compartilhado, dedicação e confiança no projeto. Aos colaboradores do Sinctronics pela recepção e em especial ao Anderson Corsetti e Mariane Martins pela ajuda nos processos de confecção dos corpos de provas e nos ensaios de laboratório.

À empresa Wobben Windpower, aos colaboradores Pablo Bettio Mendes, Tarantine Mendes, Mario Salvestro e Wagner Sampa pelo fornecimento dos resíduos resultantes do processo de lixamento das pás eólicas.

À professora Dr^a Maria Lúcia Pereira Antunes pelo fornecimento dos resíduos da lama vermelha e interface junto ao Mackenzie para a realização dos testes Fluorescência de raios-X da lama vermelha (FRX), pela participação nas bancas de qualificação e defesa e conhecimentos compartilhado.

À professora Dr^a Jane Maria Faulstich de Paiva pelas participações nas bancas de qualificação e defesa e conhecimentos compartilhado.

À Professora Dr^a Elidiane Cipriano Rangel, pelo uso dos equipamentos do laboratório LaPTec para as análises feitas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS).

À técnica do Laboratório de Solos da Unesp, Suzan da Silva Lessa, pelo apoio e conhecimento nas análises granulométricas dos resíduos.

Aos técnicos do LaPTec, em especial a Jamille Altheman, pela ajuda nas análises feitas por Microscopia Eletrônica.

Aos colegas do Programa, pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso, em especial a Carime Souza que ajudou em vários momentos.

À Unesp, em especial os funcionários da secretaria de pós-graduação do Programa.

RESUMO

Apesar da inovação em ciência e tecnologia e do aumento da eficiência de processos produtivos, cada vez mais são buscadas soluções para diminuir a quantidade de resíduos industriais e pós-consumo. A energia eólica (energia limpa) é um setor que está em grande expansão, pois apresentou em 2015 um crescimento de 77% em comparação a 2014. Um dos componentes dos conjuntos geradores é a pá eólica, confeccionada basicamente de uma estrutura feita de resina epóxi, fibras de vidro, madeira e adesivo. O Brasil é o maior produtor de resíduos eletroeletrônicos da América Latina, com mais de 2 milhões de toneladas em 2016. Em relação a 2014, o crescimento foi de quase 10%, sendo que apenas 20% deles foram reciclados. A lama vermelha é um resíduo alcalino, gerada na produção do alumínio que oferece riscos ambientais. Este trabalho visa incorporar a resina epóxi com fibra de vidro e a lama vermelha, em poliestireno de alto impacto (HIPS) presente em resíduos pós-consumo de equipamentos eletroeletrônicos. Os resíduos de produção de alumínio e de pás eólicas foram caracterizados e posteriormente incorporados no HIPS nas proporções de 5%, 10% e 15% (em massa) através do processo de extrusão. Os compósitos então produzidos foram caracterizados pela presença de orgânicos, pelos ensaios teor de umidade, ensaios de índice de fluidez e calorimetria exploratória diferencial (DSC). Os corpos de prova foram confeccionados pelo processo de injeção e caracterizados pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) e composição elementar feita através da técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Foram ainda submetidos a ensaios mecânicos de tração e impacto. Os resultados mostraram que os teores de umidade ficaram dentro das especificações do HIPS reciclado, enquanto os ensaios mecânicos de resistência à tração das incorporações HIPS com 15% de fibra-resina mostraram um aumento em média de 4% e atingiram um acréscimo médio de 34% na elasticidade em relação ao poliestireno puro.

PALAVRAS-CHAVE: resíduos industriais, incorporação, poliestireno.

ABSTRACT

Despite the science and technology's innovation and the efficiency of processes' production, sought solutions to reduce the amount of industrial and post-consumer waste are increasingly. Wind energy (clean energy) is a sector that is in great expansion, having in 2015 a growth of 77% compared to 2014. One of the components of the generator sets is the wind turbine, basically made of a structure made of epoxy resin, fiberglass, wood and glue. Brazil is the largest producer of electrical and electronic waste in Latin America, with more than 2 million tons in 2016. Compared to 2014, growth was almost 10%, with only 20% of them being recycled. Red mud is an alkaline residue that offers environmental risks. This project aims to incorporate the epoxy resin together with fiberglass and the red mud, in high impact polystyrene (HIPS) present in post consumer waste electrical and electronic equipment. Aluminum and wind turbine waste were characterized and later incorporated into HIPS in the proportions of 5%, 10% and 15% (by mass) through the extrusion process. The composites were characterized by the presence of organic, moisture content tests, fluidity index tests and differential scanning calorimetry (DSC). The specimens were prepared by the injection process and characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) and elemental composition made using Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). These composites were mechanically evaluated in tensile and impact strength. The results showed that the moisture contents were within the specifications of the recycled HIPS, while the tensile strength mechanical tests of HIPS incorporations with 15% of fiber-resin showed an average increase of 4% and reached an average increase of 34% in elasticity relative to pure polystyrene.

KEY WORDS: industrial residues, incorporation, polystyrene.

Índice de Figuras

Figura 1 - (a) Lama ainda pastosa e (b) Lama vermelha após secagem	28
Figura 2 - Fibra-resina na forma de pó, oriundo do processo lixamento de pás eólicas.	29
Figura 3 – Fluxogramas das etapas de caracterização (a) do resíduo da mineração e (b) do resíduo eólico	30
Figura 4 – Fluxograma das etapas caracterização dos compósitos.....	34
Figura 5 - Peça advinda da injetora com corpos de prova, tipo I, para ensaios mecânicos de tração e impacto.	37
Figura 6 – Fluxograma da caracterização dos corpos de prova.....	37
Figura 7 – Fotografias das frações da análise granulométrica da lama vermelha, sendo a) maior que 300 μm , b) entre 150 e 300 μm , c) entre 150 e 75 μm e d) menor que 75 μm	41
Figura 8 - Fotografia das frações da análise granulométrica da Fibra-Resina, sendo a) maior que 300 μm , b) entre 150 e 300 μm , c) entre 150 e 75 μm e d) menor que 75 μm	42
Figura 9 - Comparativo porcentagem massa retida em cada peneira da análise granulométrica (lama e fibra de vidro/resina epóxi)	43
Figura 10 – (a) Filamento da proporção 90% HIPS e 10% fibra resina (% em gramas) e (b) <i>Pellets</i> de Poliestireno de alto impacto (HIPS) pós-consumo com carga.....	47
Figura 11 – Fotografia de compósito com lama embalado mostrando a retenção de água.	47
Figura 12 - Gráfico das análises térmicas de calorimetria exploratória diferencial do HIPS reciclado com o resíduo da mineração (lama vermelha).....	51
Figura 13 - Gráfico das análises térmicas de calorimetria exploratória diferencial do HIPS reciclado com o resíduo da fabricação da pá eólica (fibra-resina).	52
Figura 14 - Gráfico das análises térmicas de calorimetria exploratória diferencial do HIPS reciclado com os resíduos em conjunto da mineração da lama vermelha e da fabricação da pá eólica (fibra-resina).....	52
Figura 15 - Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS pós-consumo (sem carga)	54
Figura 16 - (a) Fotografia dos corpos de prova rompidos do HIPS com 5% Lama Vermelha; (b) Fotografia dos corpos de prova rompidos do HIPS com 5% Lama Vermelha e (c) Fotografia dos corpos de prova rompidos do HIPS com 5% Lama Vermelha.....	54
Figura 17 – Micrografia do HIPS pós-consumo a uma ampliação de 950 vezes	61
Figura 18 - (a) Micrografia do HIPS com 5% Lama Vermelha a uma ampliação de 950 vezes; (b) Micrografia do HIPS com 10% Lama Vermelha a uma ampliação de 40 vezes e (c) Micrografia do HIPS com 15% Lama Vermelha a uma ampliação de 40 vezes	62
Figura 19 – (a) Micrografia do HIPS com 5% Fibra Resina a uma ampliação de 950 vezes; (b) Micrografia do HIPS com 10% Fibra-Resina a uma ampliação de 40 vezes e (c) Micrografia do HIPS com 15% Fibra Resina a uma ampliação de 5000 vezes.	64
Figura 20 - (a) Micrografia do HIPS com 2,5%Lama Vermelha e Fibra Resina a uma ampliação de 950; (b) Micrografia do HIPS com 5%Lama Vermelha e Fibra Resina a uma ampliação de 40 vezes e (c) Micrografia do HIPS com 7,5%Lama Vermelha e Fibra Resina a uma ampliação de 40 vezes.	65

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Proporções das Incorporações dos Resíduos Industriais em HIPS Reciclado (% de massa).....	33
Tabela 2 - Análise granulométrica da amostra de lama vermelha.....	42
Tabela 3 - Análise granulométrica da amostra de fibra de vidro/resina epóxi	42
Tabela 4 – Resultados do Ensaio de Fluorescência de raio-X da lama vermelha	44
Tabela 5 – Composição química da lama em diversos países.....	45
Tabela 6 - Porcentagem de inorgânicos presentes no resíduo eólico em pó após queima	46
Tabela 7 - Resultados relativos ao teor de inorgânicos nas amostras com e sem as incorporações teóricas de lama vermelha (5, 10 e 15%) e fibra-resina (5, 10 e 15%).....	48
Tabela 8 - Resultados relativos ao teor de umidade do poliestireno de alto impacto sem incorporação e com incorporação de lama vermelha, fibra-resina e dos dois resíduos.....	49
Tabela 9 - Resultados relativos ao índice de fluidez do poliestireno de alto impacto sem incorporação e com incorporação de lama vermelha, fibra-resina e dos dois resíduos.....	50
Tabela 10 - Temperatura de transição vítrea Tg.....	53
Tabela 11 - Resistência à tração na máxima do HIPS reciclado e dos compósitos tendo lama vermelha e fibra-resina incorporados.....	54
Tabela 12 - Análise de Variância (ANOVA) - Resistência à tração do HIPS reciclado e dos compósitos	55
Tabela 13 - Teste de Tukey - Resistência à tração do HIPS reciclado e dos compósitos	55
Tabela 14 - Deformação no ponto de ruptura do HIPS reciclado e dos compósitos.....	57
Tabela 15 - Análise de Variância (ANOVA) – Deformação no ponto de ruptura do HIPS reciclado e dos compósitos.....	57
Tabela 16 - Teste de Tukey - Deformação no ponto de ruptura do HIPS reciclado e dos compósitos	57
Tabela 17 - Módulo de Elasticidade do HIPS reciclado e dos compósitos.....	58
Tabela 18 - Análise de Variância (ANOVA) – Módulo de Elasticidade do HIPS reciclado e dos compósitos	58
Tabela 19 - Teste de Tukey - Módulo de Elasticidade do HIPS reciclado e dos compósitos.....	59
Tabela 20 - Resultados relativos ao ensaio mecânico de resistência ao impacto	60
Tabela 21 - Análise de Variância (ANOVA) – Resistência ao Impacto do HIPS reciclado e dos compósitos	60
Tabela 22 - Teste de Tukey – Resistência ao Impacto do HIPS reciclado e dos compósitos.....	61
Tabela 23 - Composição (%) átomos - Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS – HIPS reciclado	62
Tabela 24 - Composição (%) átomos - Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS – HIPS reciclado com carga de lama vermelha	63
Tabela 25 - Composição (%) átomos - Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS – HIPS reciclado com carga de fibra resina	64

Tabela 26 - Composição (%) átomos - Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS – HIPS reciclado com cargas de lama vermelha e fibra resina.....	65
--	----

SUMÁRIO

RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI
1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS E OS RESÍDUOS INDUSTRIAIS	16
3.2 A OBTENÇÃO DA LAMA VERMELHA E OS RESÍDUOS INDUSTRIAIS	18
3.3 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS – POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (HIPS) RECICLADO	20
3.4 COMPÓSITOS.....	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS.....	28
4.1.1 Obtenção do resíduo da mineração	28
4.1.2 Obtenção do resíduo eólico.....	29
4.1.3 Obtenção do resíduo de equipamento eletroeletrônico	29
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E EÓLICO	30
4.2.1 Análise Granulométrica	30
4.2.2 Fluorescência de raios-X da lama vermelha (FRX)	31
4.2.3 Determinação do teor de fibra-resina (inorgânicos)	32
4.3 INCORPORAÇÃO DOS COMPÓSITOS	33
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPOSITOS.....	33
4.4.1 Ensaios de Queima de Orgânicos.....	34
4.4.2 Ensaios de Teor de Umidade	34
4.4.3 Ensaios de Teor de Índice de Fluides	34
4.4.4 Ensaios de Calorimetria Exploratória Diferencial	35
4.5 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA – INJEÇÃO	36
4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	37
4.6.1 Ensaios Mecânicos – Tração	37
4.6.2 Ensaios Mecânicos – Impacto.....	38
4.6.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS)	39
4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E EÓLICO	41
5.1.1 Análise Granulométrica	41

5.1.2	Fluorescência de raios-X da lama vermelha (FRX)	44
5.1.3	Determinação do teor de fibra resina (inorgânicos)	46
5.2	INCORPORAÇÃO DOS COMPÓSITOS	46
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	48
5.3.1	Ensaios de Queima de Orgânicos	48
5.3.2	Ensaios de Teor de Umidade	49
5.3.3	Ensaios de Teor de Índice de Fluidez	50
5.3.4	Ensaios de Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC	51
5.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	53
5.4.1	Ensaios Mecânicos – Tração	53
5.4.2	Ensaios Mecânicos – Impacto	60
5.4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS)	61
6	CONCLUSÕES	66
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
9	APÊNDICE	83
9.1	APÊNDICE A.....	83
9.2	APÊNDICE B.....	86
9.3	APÊNDICE C.....	87
9.4	APÊNDICE D.....	91
9.5	APÊNDICE E.....	93

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do desenvolvimento industrial das décadas de 1930 e 1940, o homem vem seguindo um modelo linear de produção de bens, no qual ocorre a extração de matéria-prima, a fabricação e uso dos produtos e por fim, o descarte dos mesmos. Tal comportamento por tanto tempo e em escala global está não só provocando a escassez dos recursos naturais, como também causando outros impactos negativos ao meio-ambiente como a poluição, degradação e a intoxicação de ecossistemas e das pessoas.

Partindo deste contexto, surge o conceito de transformar este modelo linear em um modelo circular de produção, no qual os materiais retornam ao ciclo produtivo. Uma das diretrizes da economia circular é a logística reversa, onde existe o recolhimento de resíduos (normalmente custeado pelo fabricante) para posterior reutilização, recuperação e a reciclagem de materiais, atingindo assim o chamado ciclo fechado de produção. Por exemplo, em 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabeleceu a necessidade de que construísse no Brasil um sistema de logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos, dado que o aumento na geração desses resíduos é notório (BRASIL, 2010).

Sabe-se que boa parte de um produto eletroeletrônico é constituída de material polimérico. Por exemplo, numa impressora multifuncional foram catalogados 25 materiais diferentes, sendo 54,7% de sua massa composta de poliestireno de alto impacto (VALÉRIO, 2014). Assim, a confecção de um material compósito tendo como matriz um plástico advindo de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, como o poliestireno de alto impacto, parece ser uma boa alternativa de investigação.

Compósitos são materiais multifásicos feitos artificialmente e cujas propriedades apresentam proporções significativas das propriedades dos materiais constituintes, e desta forma, possuem um incontável número de aplicações técnicas. Compósitos de matrizes poliméricas estão sendo muito utilizados em uma ampla faixa de aplicações onde serviços de longo prazo em

ambientes hostis (ambientes ácidos ou alcalinos) são requeridos (BAGHERPOUR, BAGHERI e SAATCHI, 2009).

Muitos produtos e equipamentos são produzidos com materiais compósitos como, por exemplo, suportes para circuitos impressos, telhado de casas, painéis de automóveis, lanchas, aviões, tubulações e até mesmo artigos esportivos como raquetes de tênis e quadros de bicicleta (GAY *et al.*, 2003). Além destes, materiais bastante utilizados, como a madeira e o concreto (inclusive o concreto armado), são considerados materiais compósitos (SHACKELFORD, 2008).

Incorporar resíduos industriais numa matriz como a citada anteriormente, de HIPS (sigla do inglês *High Impact Polystyrene*), pode trazer bons resultados, ou seja, compósitos de boa qualidade que diminuam o envio para aterros sanitários tanto de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos quanto de resíduos industriais. Atualmente esses resíduos industriais da obtenção do alumínio e das pás eólicas não encontram mercado de reciclagem e seus destinos são, respectivamente, as barragens e aterros como rejeitos, com altos custos e riscos associados. Essa incorporação traria mais uma alternativa para o HIPS, material popularmente encontrado em equipamentos eletroeletrônicos, que tende a aumentar a sua oferta, em atenção a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Sorocaba, no Estado de São Paulo, é uma das cidades em desenvolvimento econômico do Estado de São Paulo e uma das principais bases de sua economia é a indústria (SEADE, 2014).

Entre outras indústrias, a cidade contempla a empresa Wobben Windpower Indústria e Comércio Ltda, que atua no segmento eólico. A indústria mundial de fabricação de pás eólicas tende a enfrentar um desafio: a destinação dos resíduos industriais gerados. Somam-se ao problema dos resíduos industriais, o descarte de pás após a vida útil. Estima-se que a vida útil de uma pá eólica é 20 anos e que em 2034 poderá ser atingido cerca de 200 mil toneladas anuais de pás usadas em todo o mundo (BRAHMS *et al.*, 2007).

Também em Sorocaba, foi criado em 2012, o Centro de Inovação e Tecnologia – Sinctronics, que desenvolve infraestrutura e tecnologia para coletar e transformar eletroeletrônicos em matéria prima e peças para novos produtos. Trata-se provavelmente da primeira reação da indústria à exigência da Política Nacional e o primeiro ecossistema integrado de soluções sustentáveis voltadas para o mercado de eletroeletrônicos: integra logística reversa, processamento dos materiais, investimentos em pesquisa e desenvolvimento em busca não só de novos usos para os componentes recebidos, como também para garantir a qualidade do material produzido e permitir que os clientes tenham acesso a essa infraestrutura para suas pesquisas (SINCTRONICS, 2017).

Fazendo parte da Região Metropolitana de Sorocaba, distante apenas 25,1 km, fica o município de Alumínio, que abriga a Companhia Brasileira de Alumínio CBA, que atualmente tem capacidade para produzir 466 mil toneladas anuais do metal, produção que é destinada para atender o mercado interno de bens de consumo, construção civil, embalagens e transportes, e também o mercado externo, principalmente para os Estado Unidos, Europa e América Latina. Somente em 2014, o volume exportado foi de quase 20 mil toneladas (SOTTOVIA, 2015).

A bauxita é um minério de onde se extrai a alumina, que será utilizada principalmente para a produção de alumínio. Na obtenção da alumina, é gerado um resíduo altamente alcalino denominado lama vermelha, um passivo ambiental que ocupa extensas áreas para o seu descarte. Milhões de toneladas de lama vermelha estão estocadas no mundo, e outros milhões são acrescentados a cada ano, já que para uma tonelada de alumina obtida, de 1 a 1,5 toneladas de lama vermelha é gerada (POWER *et al.*, 2011; RATH *et al.*, 2013). A lama vermelha pode causar a contaminação do solo, de águas subterrâneas e superficiais, acarretando danos à flora e à fauna, além do risco do rompimento dos diques de disposição (GELENCSÉR *et al.*, 2011; SILVA FILHO *et al.*, 2008). Ainda não há produção em escala industrial que utilize este resíduo, mas já existem projetos-piloto (RED MUD, 2016).

2 OBJETIVOS

A presente dissertação de mestrado busca propor materiais sustentáveis a partir de resíduos industriais e pós-consumo. A ideia é a obtenção de compósitos termoplásticos tendo como matriz o poliestireno de alto impacto pós-consumo de equipamentos eletroeletrônicos e como reforço os resíduos industriais da mineração de alumínio (lama vermelha) e da fabricação de pás eólicas (constituído de resina epóxi e fibra de vidro).

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Incorporar em proporções distintas, sendo 5%, 10% e 15% em massa, resíduos industriais (lama vermelha e resina epóxi com fibra de vidro) em matriz de poliestireno de alto impacto (HIPS) pós-consumo;
- Através de ensaios mecânicos, teor de umidade, índice de fluidez, calorimetria exploratória diferencial (DSC), microscopia eletrônica de varredura MEV e composição elementar através da técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), verificar quais incorporações mantêm as propriedades próximas ou superiores ao HIPS reciclado pós-consumo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS E OS RESÍDUOS INDUSTRIAIS

As pás eólicas são um dos principais componentes de um sistema de geração de energia eólica, são responsáveis pela interação com o vento, e transmitem energia mecânica de rotação para o rotor que por sua vez gera a energia elétrica.

Os principais materiais utilizados na fabricação dos conjuntos eólicos são fibras de vidro e resina epóxi (BARROS, 2010). No processo de fabricação a fibra de vidro é impregnada pela resina epóxi no estado líquido que com o passar do tempo se solidifica em uma reação química chamada de cura. Pela combinação de propriedades e seu relativo baixo custo, os compósitos de resina epóxi reforçada com fibras de vidro são os materiais utilizados em maior volume na fabricação das pás eólicas atualmente. A fibra de vidro é o reforço sendo este o componente responsável por suportar as altas cargas axiais às quais as pás são submetidas. A resina epóxi é a matriz e é responsável por aglutinar e proteger as fibras e ainda conferir resistência às tensões de cisalhamento geradas sobre o material (MALLICK, 2007).

Outros materiais também são utilizados em partes internas da pá (que é oca, formada pela colagem de duas metades), como a madeira-balsa, espuma e outros componentes poliméricos pouco representativos em termos de peso (BRAHMS, 2007).

As resinas epóxi são polímeros termorrígidos comumente utilizados para finalidades onde se exige alta resistência mecânica e baixa densidade, exemplificada pela aplicação na fabricação de pás eólicas, na qual o produto final (pá eólica) é submetido a diversos esforços mecânicos durante o funcionamento, além de apresentar dimensões que variam de 30 a 60 metros (BARROS, 2010). Esse material apresenta alta rigidez e estabilidade térmica, ou seja, propriedades interessantes para finalidades estruturais (GONÇALVES *et al.*, 2011).

As resinas epóxi são convertidas em polímeros termorrígidos pela ação de agentes endurecedores, conhecidos como catalisadores ou agentes de cura (BARROS, 2010). A reação química de cura ocorre com a crescente temperatura e é irreversível.

As fibras de vidro utilizadas para reforços em compósitos poliméricos podem ser subdivididas em duas categorias, sendo a primeira do tipo *E-glass*, composta principalmente por dióxido de silício (SiO_2); a segunda é do tipo *S-glass*, que é uma combinação de SiO_2 , alumínio (Al) e magnésio (Mg). O tipo *E-glass* apresenta menor custo e baixa resistência mecânica, já o tipo *S-glass* é amplamente utilizado para fins estruturais, ou seja, aplicada quando é necessário maior desempenho do componente, exemplo das pás eólicas, e consequentemente maior custo (MAY, 1988; BARROS, 2010).

Oliveira (2017) realizou a caracterização do resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas e sua incorporação em argamassa de cimento Portland. A caracterização do resíduo em pó (mistura de fibras de vidro e resina epóxi trituradas) foi realizada por granulometria, presença de orgânicos, massa específica, área superficial, ângulo de contato, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), MEV e EDS e difração de raios-X (DRX). Esta caracterização é interessante, pois trata-se do mesmo material utilizado na pesquisa desta dissertação de mestrado. Os resultados do ângulo de contato (aproximadamente 108°), no resíduo em pó mostrou que o material é hidrofóbico, apresenta área superficial específica de $2206 \pm 3,3 \text{ cm}^2/\text{g}$ e possuem 76, 2% de inorgânicos, diretamente relacionados à fibra de vidro. Através da micrografia e análise elementar da fibra utilizada na fabricação das pás eólicas, mostra-se que a fibra é do tipo *S-glass*, conforme descrito por MAY (1988), pois foi constatada a presença de alumínio, silício, magnésio e cálcio. No difratograma do resíduo em pó, foi observado hidratos de óxidos de silício e sílica, que apresentam estrutura parcialmente cristalina, ou seja, componentes da fibra de vidro, presentes na composição do resíduo em pó.

Dado o fato que a reação de cura da resina epóxi é irreversível, o material curado é incapaz de retornar ao estado inicial (líquido) já que o retorno a esse

estado significaria quebra das ligações intermoleculares primárias sem a quebra das ligações intramoleculares primárias. Esta quebra de ligações intermoleculares pode ocorrer via fusão com os termoplásticos, que possuem ligações secundárias (mais fracas que as covalentes primárias dos termofixos) entre as cadeias. Por esse motivo, em termofixos e elastômeros, que também possuem ligações covalentes intermoleculares, a reciclagem somente baseada na fusão não é possível (EHRIG, 1992); (LA MANTIA, 2002); (WIEBECK e PIVA, 2005); (ZANIN e MANCINI, 2004); (MANRICH *et al.*, 1997); (MANO *et al.*, 2006); (RADER *et al.*, 1995). Assim, os materiais compósitos dos quais as pás eólicas são fabricadas, normalmente são considerados não recicláveis. Ao se tornarem resíduos, podem ser enquadrados pela norma ABNT NBR 10004 como resíduos classe II A, resíduos não perigosos, porém não inertes, e assim, a rota principal de destinação costuma ser o aterramento.

Com o aumento da quantidade de refugos industriais devido ao aumento da produção de pás e a eminente necessidade de troca das antigas, tem-se que o aterramento deverá se tornar cada vez mais oneroso (BRAHMS, 2007). Além disso, é uma técnica ambientalmente discutível ao menos pelos grandes espaços que os aterros ocupam e pela dificuldade de se encontrar locais adequados para a disposição. Ainda, o aterramento representa de um modo geral, uma maneira simplista de resolver problemas de indústrias que investem em altas tecnologias e na preservação ambiental e tornam esses fatores em agressivas estratégias de marketing. Novas técnicas visando o reaproveitamento e reciclagens dos materiais contidos nesses resíduos vêm sendo incentivadas e testadas.

3.2 A OBTENÇÃO DA LAMA VERMELHA E OS RESÍDUOS INDUSTRIAIS

A alumina é obtida industrialmente através do processo Bayer, que utiliza como matéria-prima a bauxita. A bauxita é um material heterogêneo composto principalmente por um ou mais minerais de hidróxido de alumínio, tal como gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$) e diásporo ($\text{AlO}(\text{OH})$) em adição a várias combinações de sílica, alumínio-silicato, óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de titânio (TiO_2) e outras impurezas tais como carbonatos e sulfitos em traços (DJURIC, MIHAJLOVIC e ZIVKOVIC, 2010).

O processo Bayer é o processo industrial através do qual a bauxita é quimicamente refinada para produzir alumina. Esse processo é constituído, de maneira sintética, por quatro etapas principais: digestão, clarificação, precipitação e calcinação. Durante a etapa de digestão os hidróxidos de alumínio (gibbsite, boehmita e diásporo) sofrem ataque cáustico, formando aluminato de sódio (NaAl(OH)_4), o qual após a etapa de clarificação retorna à forma de hidróxido de alumínio na etapa de precipitação, ocorrida através da aplicação de pequenos cristais de alumina (processo conhecido no jargão industrial como semeadura), induzindo essa precipitação. Esse precipitado é então calcinado em forno rotativo e obtém a alumina pura (HIND, BHARGAVA e GROCOTT, 1999). Os elementos presentes na lama vermelha podem estar combinados entre 15 e 20 fases minerais diferentes (SAMAL *et al.*, 2013), sendo as mais típicas: hematita, diásporo, boehmita, gibbsite, calcita, rutilo, anatásio, quartzo, e fases de alumínio silicato e alumínio sódio silicato (SAMOUHOS *et al.*, 2013). Óxido de ferro e óxido de alumínio foram detectados por todos os autores, óxidos de silício, titânio, cálcio e sódio apareceram em quase todos os estudos. A lama vermelha pode conter ainda voláteis resultantes do processamento, como dioxina, cloreto de hidrogênio e gases de cloro (PASCUCCI *et al.*, 2012).

Apesar de esses compostos serem frequentes, a porcentagem e o restante da composição da lama vermelha variam bastante, ainda que no mesmo país, já que a composição deste resíduo depende da fonte e qualidade da bauxita e o método empregado para a obtenção de alumina (SILVA FILHO *et al.*, 2007; JANKOVIC *et al.*, 2013).

Segundo o *Environmental Protecyc Agency*, EPA (SILVA FILHO *et al.*, 2007), a lama vermelha não é considerada um resíduo perigoso, entretanto, pela norma ABNT NBR 10004, compostos com chumbo, cádmio, cromo e níquel podem conferir periculosidade dependendo de sua concentração. A norma também aponta que substâncias com $\text{pH} \geq 12,5$ são perigosas por serem bastante corrosivas. Em virtude do elevado teor de cálcio a lama vermelha pode ser relativamente tóxica (HIND *et al.*, 1999).

As propriedades da lama vermelha variam de maneira significativa de diferentes bauxitas e diferentes métodos de produção, porém, as propriedades básicas são o alto pH (variando de 10 a 12,5), distribuição extremamente fina de sólidos em suspensão com teor de 15 a 30% de sólidos. (CABLIK, 2007; HIND, BHARGAVA e GROCOTT, 1999; LIU e WU, 2012).

3.3 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS – POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (HIPS) RECICLADO

Dentre os principais polímeros presentes nos resíduos eletroeletrônicos tem-se a acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), poliestireno de alto impacto (HIPS), polipropileno (PP), estireno-acrilonitrila (SAN), poliestireno (PS), poliuretano (PU), poliamida (PA) e blendas de policarbonato (PC/ABS). A composição e/ou combinação destes polímeros nos equipamentos varia dependendo da aplicabilidade (BEIGBEDER *et al.*, 2013; BRENNAN, ISAAC e ARNOLD, 2002; MARTINHO *et al.*, 2012; SINGH *et al.*, 2016; WANG e XU, 2014).

Apesar dos polímeros não serem os componentes em maior quantidade nos resíduos eletroeletrônicos os valores chegam até 30% em massa dependendo da categoria dos equipamentos; e tais quantias não podem ser ignoradas, bem como pela qualidade dos polímeros com propriedades específicas utilizados nesses equipamentos (MARTINHO *et al.*, 2012; PEETERS *et al.*, 2014; TAURINO, POZZI e ZANASI, 2010).

Na composição dos equipamentos eletroeletrônicos, além dos metais e polímeros que são utilizados com frequência, estão presentes alguns metais pesados, como mercúrio e chumbo. Para se evitar incêndios, também são inseridos retardantes de chamas devido a passagem de corrente elétrica. Essas substâncias são constituídas, principalmente, por bromo e consideradas altamente tóxicas para o ser humano (MARTINHO *et al.*, 2012; PEETERS *et al.*, 2014). Por isso é necessário evitar os descartes em aterros, incineração ou reciclagens informais, para não causar riscos à saúde da população, enquanto novos compostos são desenvolvidos para substituí-las e prover as qualidades

necessárias aos polímeros utilizados em equipamentos eletroeletrônicos (BALDÉ *et al.*, 2014; BHUTTA, OMAR e YANG, 2011).

Valério (2014) caracterizou duas impressoras comerciais da época, detalhando-se os materiais e a massa de cada uma das peças e partes. A impressora multifuncional com *scanner* apresentou 251 peças, sendo quase 55% do material identificado como HIPS e 3% como ABS. A segunda impressora sem *scanner* apresentou uma quantidade um pouco inferior de peças, 210. Verificou-se que 54,5% da composição em massa do produto correspondem ao material HIPS e quase 5% equivalem ao ABS. Nos dois casos estudados, determinou-se, por meio de um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que o HIPS apresentou o maior percentual de impactos.

A matriz polimérica utilizada neste trabalho foi o poliestireno de alto impacto, HIPS, termoplástico amorfo com grande aplicação em componentes industriais, como peças internas e externas de aparelhos eletrônicos, guarda-chuvas, televisão, microcomputadores e toda a linha branca de eletrodomésticos (ROVERE; CORREA; GRASSI e DAL PIZZOL; 2008).

O HIPS é obtido a partir da adição de moléculas de polibutadieno (borracha) por enxerto em uma matriz polimérica contínua de poliestireno através de reações químicas e não simplesmente por mistura, como ocorre em blendas poliméricas (BORRELLY, 2002).

É classificado como um polímero termoplástico que apresenta temperatura de processamento relativamente baixa, além de ter suas propriedades facilmente modificadas a partir de alterações na sua morfologia e composição das fases estirênica e borracha (VIANNA *et al.*, 2004).

O elastômero incorporado ao poliestireno (PS) é responsável pela relaxação do material a nível molecular, a qual dissipa parte da energia em calor, tendo efeito sinérgico na absorção de impacto (COSTA, 2016).

O poliestireno (PS) à temperatura ambiente é um polímero vítreo e apresenta baixa absorção de energia sob impacto devido a ausência de mobilidade local de segmentos de cadeia, uma vez que a sua temperatura de transição vítrea (T_g) ocorre entre 90° C e 100°C. A T_g é a temperatura a partir da qual ocorrerem movimentos de segmentos de cadeia responsáveis pela dissipação de energia. A utilização de borracha no processo de polimerização do estireno leva à obtenção de uma mistura polimérica *in situ*, com domínios discretos de fase borrachosa dispersos em uma matriz contínua de PS. A incorporação de uma segunda fase elastomérica em uma matriz vítrea de um polímero tem como principal objetivo o aumento de sua tenacidade, ou seja, de sua resistência ao impacto. O HIPS quando comparado ao PS ou até mesmo as blendas de PS e borracha, possui propriedades mecânicas sob impacto superiores, devido a polimerização borracha-estireno. (GRASSI *et al.*, 2001).

O primeiro estudo documentado sobre a tenacificação do PS data de 1927, sendo uma patente de processo de produção de PS tenacificado a partir da polimerização de estireno em uma solução de borracha no próprio monômero. O processo não obteve sucesso comercial, uma vez que o produto formado era reticulado. Desenvolvimentos posteriores feitos pela empresa Dow Chemical Company, nos anos 40 e 50, resultaram em produtos comerciais de PS e copolímeros estireno-butadieno (SBR) obtidos em processo em emulsão, os quais passaram a ser chamados de Poliestireno de Alto Impacto (HIPS) (GRASSI *et al.*, 2001).

A partir de 1960, as borrachas do tipo SBR preferencialmente incorporadas ao PS passaram a ser substituídas por polibutadieno (PB), devido à obtenção de HIPS com propriedades mecânicas sob impacto superiores, especialmente pela ocorrência de uma maior graftização e entrecruzamento da borracha. O teor de borracha em resinas de HIPS comerciais obtidas em processo de polimerização em massa está limitado a 14% em peso devido à alta viscosidade do meio, sendo o conteúdo de borracha normalmente inferior a 10%.

As propriedades mecânicas do HIPS, principalmente a resistência ao impacto e alongamento máximo, são afetadas diretamente pela degradação do

polímero. Apesar do PS representar 85% da constituição do HIPS e ser suscetível à fotodegradação, os domínios de polibutadieno são considerados os iniciadores da degradação pela facilidade de quebra da ligação química. (JÚNIOR, JÚNIOR e HEMKEMEIER, 2014; NUNES *et al.*, 2016; PARRES e CRESPO, 2011). Existem dois aspectos interessantes no estudo da fotodegradação dos polímeros: (1) aumento da fotoestabilidade de materiais poliméricos e prolongamento do seu tempo de vida útil e (2) a aceleração do processo de degradação com o objetivo de reduzir a poluição causada por plásticos descartados no meio ambiente. Qualquer que seja a forma de degradação (reações químicas, térmicas, fotoquímicas ou mecânicas), o início está sempre relacionado ao rompimento de uma ligação química covalente.

Como já mencionado no Item 1, através da aprovação e regulamentação da Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o Brasil passa a ter um novo marco legal e novos desafios e oportunidades frente ao gerenciamento dos resíduos sólidos no âmbito nacional (BRASIL, 2010). A PNRS estabeleceu a implantação da logística reversa e de outros pontos relativos à reciclagem e reutilização de resíduos sólidos, considerando que alguns setores da economia foram definidos como críticos e servirão como modelo para os subsequentes (BRASIL, 2010).

Complementando a PNRS no âmbito da indústria eletrônica, foi publicado em janeiro de 2013, o edital de chamamento 02/2013 do Ministério do Meio Ambiente e postergado através do edital 01/2014, para a elaboração de acordo setorial para a implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

3.4 COMPÓSITOS

Os compósitos podem ser definidos como materiais constituídos por uma mistura de fases macrocomponentes compostas por materiais que, geralmente, são diferentes sob os pontos de vista de composição química e forma. O aglomerante do material é chamado de matriz, que tem por função envolver os

componentes, ou seja, compõe a forma do material. A matriz atua ainda como uma base que confere ductilidade e mantém a estrutura coesa e que, em resumo, contribui para que o conjunto se caracterize por boas condições de fabricação e a necessária flexibilidade. Os componentes inseridos na matriz atuam geralmente como substâncias de reforço ou enchimento da matriz, sendo as propriedades dos compósitos dependentes da natureza e das propriedades do reforço e da matriz (QUINHONES, 2007).

O objetivo da etapa de mistura no processamento dos compósitos é a distribuição de maneira homogênea garantindo a completa dispersão das cargas/reforços dentro da matriz. Existe uma ampla variedade de equipamentos de mistura que podem ser utilizados nesta etapa, tais como misturadores internos e as extrusoras de rosca simples ou dupla (MANO *et al.*, 2010).

A etapa de moldagem do material tem como função proporcionar a forma e dimensão final desejada, através de processos como moldagem por compressão, extrusão e injeção (MANO *et al.*, 2010). Sabidamente, as propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos podem ser afetadas pelo processamento e pela temperatura na qual ele foi realizado (MANO *et al.*, 2010).

Matrizes típicas são feitas de materiais poliméricos, metálicos e cerâmicos. As matrizes poliméricas são divididas em dois tipos principais: termofixos e termoplásticos (VASILIEV e MOROZOV, 2001).

Polímeros termofixos que são amplamente utilizados como matrizes para compósitos incluem poliéster, epóxi, poli-imida, e outras resinas curadas em temperaturas elevadas ou em temperatura ambiente. Depois de curada (polimerizada), uma matriz termofixa não pode ser remoldada, dissolvida ou fundida. Ao contrário das resinas termofixas, as resinas termoplásticas, tais como poliestireno, polipropileno, polietileno e outros, não requerem qualquer reação química de cura. Elas se fundem sob aquecimento e se convertem para um estado sólido sob resfriamento (VASILIEV e MOROZOV, 2001).

A obtenção de compósitos poliméricos a partir da incorporação de resíduos industriais visa solucionar pelo menos três situações: 1) o fato de que polímeros geralmente possuem as propriedades mecânicas inferiores às dos materiais de reforço; 2) o acondicionamento do resíduo, num produto durável, fazendo com que sua destinação final não seja o aterramento e 3) em alguns casos, em virtude do custo da matriz pode ter um valor agregado superior, a adição de resíduos como carga, pode baratear o custo do produto final.

Com relação à utilização do resíduo lama vermelha como agente de reforço em matrizes poliméricas, evidencia que a maior parte dos estudos encontrados na literatura está relacionada à utilização de termorrígidos na matriz, especialmente resina de poliéster insaturado. Entre os estudos com matrizes termoplásticas destaca-se o polipropileno (PP). Zhang *et al.* (2011) incorporaram lama vermelha em PP, observando progresso nas propriedades de flexão e piora nas de impacto conforme se aumentou o teor do resíduo.

Foi evidenciado que a adição de lama vermelha em resina termofixa de poliéster insaturado reduz as resistências à tração e à flexão e provoca um aumento significativo na densidade (CUNHA *et al.*, 2012). Porém, a redução de propriedades mecânicas pode ser contornada através da adição de fibras de reforço, geralmente em pequenas concentrações (5-10%), sendo que fibras naturais são bastantes investigadas devido ao apelo ambiental. Prabu *et al.* (2012a; 2012b) mostraram que compósitos de poliéster reforçado com fibra de sisal e de banana, com carga de lama vermelha, apresentaram resistências ao impacto e à flexão maiores do que sem lama vermelha. Costa (2016) e Oliveira *et al.* (2013) obtiveram bons resultados para o sisal e juta, bem como para a fibra de curauá, respectivamente, associados à lama vermelha em matriz de resina de poliéster insaturado. Jena e Satapathy (2011) observaram redução de propriedades mecânicas em compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra de vidro e lama vermelha, porém notaram uma melhora significativa da resistência à abrasão do material com o aumento dos teores de lama. Já quando a matriz foi a resina epóxi, Biswas and Satapathy (2010) observaram que a adição de lama vermelha neste polímero tende a aumentar a aderência das fibras, seja de bambu ou vidro. Já Dash *et al.* (2012) notaram a redução de resistência á

tração comparando compósito híbrido de fibras de juta e de vidro em matriz de resina epóxi, com e sem lama vermelha.

São pouquíssimos os estudos encontrados sobre resíduos de fabricação de pás eólicas como componentes de materiais compósitos e a maioria deles foram desenvolvidos na Unesp-Sorocaba, pois é interesse da comunidade local (industrial, científica e em geral) a resolução do problema. Como exemplos de estudos cita-se o de Oliveira (2017) que caracterizou o resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas e sua incorporação em argamassa de cimento Portland e Marques *et al.* (2011) que utilizou-se do resíduo industrial composto somente de resina epóxi em matriz de cimento Portland, visando a diminuição da densidade do cimento. Toubia (2011), visando facilitar uma possível adesão, estudou a incorporação dos resíduos de resina e fibra de vidro em matrizes da mesma resina epóxi, conseguindo aumento no módulo de elasticidade, porém com diminuição na resistência à tração. Estudo similar foi conduzido por Araújo *et al.* (2006) e Silva *et al.* (2012) com resíduos de poliéster/fibra de vidro em matriz de resina de poliéster insaturado. Por outro lado, somente a fibra de vidro como reforço em compósitos é tema de vários estudos.

Não foram encontrados estudos sobre materiais compósitos poliméricos tendo como matriz o HIPS (pós-consumo) e como reforço a lama vermelha ou resíduos contendo resina epóxi/fibra de vidro. Foi encontrado somente um estudo sobre compósitos poliméricos tendo como matriz o HIPS pós consumo, desenvolvido por Consul (2018), que avaliou a utilização de argilas em poliestireno de alto impacto reciclado de equipamentos eletroeletrônicos. Foram moldadas placas pelos métodos de compressão a quente, em prensa hidráulica, utilizando HIPS reciclado e adição de quatro tipos distintos de argilas bentonitas. Posteriormente os compósitos foram extrudados. Considerou-se que os resultados dos ensaios de mecânicos de flexão, tração e impacto das argilas sem tratamento afetou menos as propriedades do HIPS, enquanto as argilas organofilizadas tornaram os compósitos mais flexíveis, possivelmente pela maior interação da argila com a fase borrachosa de polibutadieno. Argilas organofílicas são argilas que contém moléculas orgânicas intercaladas entre as camadas

estruturais. As argilas mais utilizadas na preparação de argilas organofílicas são as bentonitas.

Outros estudos de compósitos à base de HIPS encontrados utilizaram o material virgem e como agentes de reforço uma gama interessante de materiais, como a farinha de madeira (VIANNA *et al.*, 2004), o bagaço de cana de açúcar (BENINI *et al.*, 2011; ELSAYED *et al.*, 2017), e fibras de palmeira (BACHTIAR *et al.*, 2011), açaí (CASTRO *et al.*, 2010) e coco (BENINI *et al.*, 2010; PEREIRA *et al.*, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS

4.1.1 Obtenção do resíduo da mineração

A lama vermelha foi coletada da lagoa de disposição em uma planta industrial de processamento de bauxita, localizada na cidade de Alumínio-SP. As amostras foram secas em estufa Nova Ética, no Núcleo de Automação e Tecnologias Limpas (NATEL), da UNESP de Sorocaba, a 50°C durante 72 horas. Tempo suficiente para secar as amostras em temperatura que não comprometa as características dos argilominerais presentes (NERY, 2013).

Utiliza-se, geralmente para secagem de amostras provenientes do processo de peneiramento, estufa regulada para uma temperatura relativamente baixa, da ordem dos 40 a 60°C (DIAS, 2004).

A Figura 1(a) mostra a lama assim como coletada na lagoa e a Figura 1(b) a lama após a secagem, sendo que nenhum outro tratamento químico ou térmico foi feito.

Figura 1 - (a) Lama ainda pastosa e (b) Lama vermelha após secagem



Fonte: Autor (2017)

4.1.2 Obtenção do resíduo eólico

As amostras dos resíduos industriais da fabricação de pás eólicas, na forma de pó, Figura 2, são provenientes do processo de acabamento (lixamento) das mesmas e foram coletadas em uma empresa fabricante localizada na cidade de Sorocaba – SP. As amostras não sofreram nenhum tipo de tratamento, nem a secagem foi considerada necessária.

Figura 2 - Fibra-resina na forma de pó, oriundo do processo lixamento de pás eólicas.



Fonte: Autor (2017)

4.1.3 Obtenção do resíduo de equipamento eletroeletrônico

O HIPS pós consumo de equipamentos eletroeletrônicos, foi fornecido pelo Sintronics. Para garantir o “aterro zero”, política da empresa, os profissionais da triagem identificam e separam os materiais das embalagens por tipo, para que toda parte receba o melhor destino e alimente alguma cadeia produtiva. Os equipamentos seguem para a desmontagem ou são armazenados para serem destruídos de acordo com o planejamento.

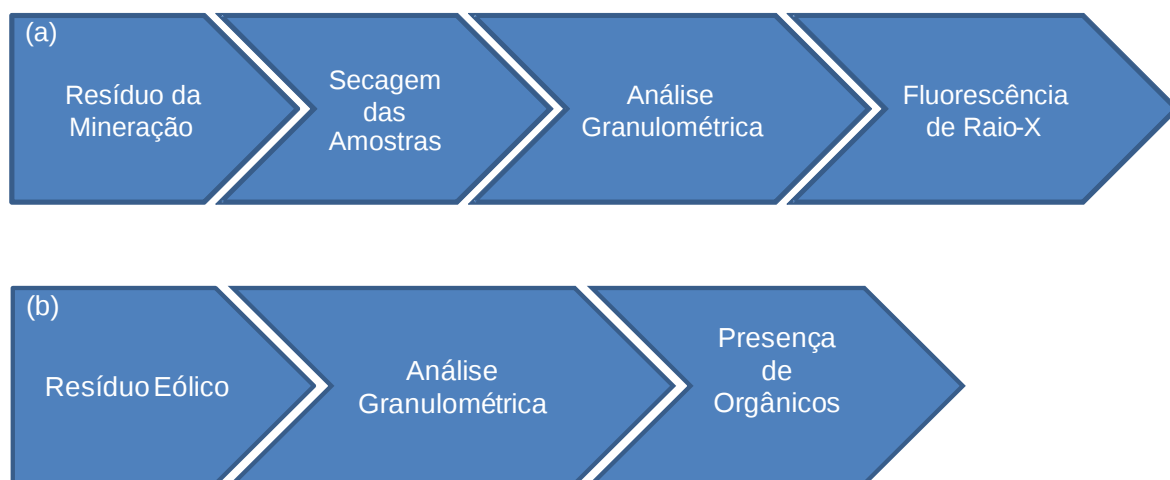
A desmontagem, em grande parte, é feita manualmente. Entre os materiais que são processados estão: hardware: impressoras, desktops, monitores, notebooks, celulares e servidores de qualquer porte; suprimentos de impressão e resíduos industriais: partes, peças e componentes de equipamentos eletrônicos de qualquer porte.

Após os plásticos serem separados por tipo, de acordo com sua composição e cor, serão triturados e posteriormente extrudados como um filamento e finalmente picados em grãos para que possam ser moldados em qualquer equipamento convencional de polímeros, como uma máquina de injeção de peças plásticas. Um dos principais plásticos obtidos pela empresa é o HIPS, utilizado na pesquisa desta dissertação de mestrado.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E EÓLICO

A caracterização da lama vermelha (chamado aqui de resíduos da mineração) e do lixamento de pás eólicas (chamado aqui de resíduo eólico) foi realizada conforme ilustrado nas Figuras 3 (a) e (b), respectivamente e serão detalhados nos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.

Figura 3 – Fluxogramas das etapas de caracterização (a) do resíduo da mineração e (b) do resíduo eólico



4.2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica consiste no peneiramento das amostras através de uma série de peneiras empilhadas em ordem decrescente de abertura das malhas das mesmas. Estas aberturas representarão o diâmetro das partículas.

Inicialmente na primeira peneira, sendo esta com abertura de 300 μm , depositou uma massa inicial conhecida (M_i). Sequencialmente o conjunto de peneiras (300 μm , 150 μm , 75 μm e o prato) foi agitado durante 5 minutos e posteriormente, realizada a pesagem do material retido em cada peneira e prato. Para o cálculo da porcentagem de retenção, dividiu-se o peso retido pelo peso original da amostra (NORMA ABNT NBR NM248 - 2003).

As análises granulométricas das amostras dos resíduos da lama vermelha e dos resíduos da fabricação de pás eólicas foram realizadas no Laboratório de Solos, da UNESP de Sorocaba.

4.2.2 Fluorescência de raios-X da lama vermelha (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra. Na espectrometria de fluorescência de raios-X uma fonte de radiação de elevada energia (radiação gama ou radiação X) provoca a excitação dos átomos da substância que se pretende analisar. Quando um átomo no estado fundamental fica sob a ação de uma fonte externa de energia (p.ex., raios-X), ele absorve esta energia, promovendo elétrons a níveis mais energéticos (BECKHOFF *et al.*, 2006).

Na natureza tudo tende a buscar o estado de estabilidade e, desta forma, o átomo excitado tende naturalmente a retornar ao seu estado fundamental, ocorrendo uma emissão de energia. Esta energia envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento químico, permitindo a sua identificação e correspondente quantificação (BECKHOFF *et al.*, 2006).

Os testes nas amostras de lama vermelha seguiram as granulometrias sugeridas no item 4.2.1. Os testes foram realizados no laboratório da Universidade Presbiteriana Mackenzie, utilizando o equipamento Fluorescência de Raios-X (30Kv-30mA), da marca Oxford Instruments.

4.2.3 Determinação do teor de fibra-resina (inorgânicos)

O ensaio de queima de orgânicos para verificação do teor de fibra em relação ao de resina foi realizado no laboratório do NATEL da UNESP-Sorocaba-SP. Esta técnica consiste no aquecimento de uma amostra a altas temperaturas, durante determinado período de tempo, visando à queima de componentes orgânicos e consequentemente obtenção dos inorgânicos. O ensaio seguiu a norma ASTM D 3171 – 2009 e foi utilizado um forno mufla, marca Quimis, modelo Q-318M24, para o aquecimento e uma balança de precisão marca Shimadzu, modelo AUX 220, para pesagem das amostras.

Nos testes foram utilizados três cadinhos de porcelana, lavados e posteriormente secados no forno de 500°C por 20 min, resfriados em dessecador e pré pesados (M_C). Adicionou 1 g da amostra do resíduo em cada cadinho, realizou-se a pesagem (M_R) e as mesmas foram levadas ao forno pré aquecido a 500°C, aumentou-se a temperatura para 565°C, permanecendo no forno por um período de 2 horas e 30 minutos. Posteriormente as amostras foram resfriadas no dessecador por um período de 20 min., seguido de pesagem (M_1 – 1ª Medição). Os cadinhos retornaram para o forno por mais um período de 1 hora, foram resfriados novamente no dessecador e pesados (M_2 - 2ª Medição), os cadinhos retornaram para o forno por um período de mais 40 min., onde ao término deste período foram resfriados e pesados (M_3 - 3ª Medição). No total, foram 250 minutos de forno (mufla).

O cálculo do teor de fibra (T_f) no fim do ensaio, ou seja, a parte inorgânica da amostra foi calculada pela equação abaixo:

$$T_f (\%) = \left[\frac{(M_3 - M_C)}{(M_R - M_C)} \right] \times 100$$

4.3 INCORPORAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para a incorporação, o HIPS reciclado na forma de grãos (ou *pellets*) foi processado juntamente com os respectivos resíduos industriais da mineração de alumínio e da fabricação de pás eólicas em uma extrusora dupla rosca marca AX Plásticos, modelo GF_VEDO 104, na temperatura máxima de 210° C.

Foram propostas as formulações expostas na Tabela 1. Além das incorporações individuais foram estudadas incorporações dos dois resíduos industriais em conjunto, em virtude da constatação em literatura de que a lama pode contribuir para compósitos reforçados com fibras (COSTA, 2016; PRABU *et al.*, 2012a; 2012b).

Tabela 1 - Proporções das Incorporações dos Resíduos Industriais em HIPS Reciclado (% de massa)

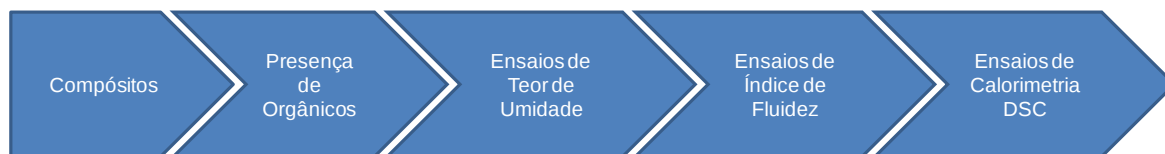
Incorporações	Proporções (% de massa)
HIPS com Lama Vermelha	95% HIPS - 5% Lama Vermelha
	90% HIPS - 10% Lama Vermelha
	85% HIPS - 15% Lama Vermelha
HIPS com Fibra Resina	95% HIPS - 5% Fibra Resina
	90% HIPS - 10% Fibra Resina
	85% HIPS - 15%Fibra Resina
HIPS com Lama Vermelha e Fibra Resina	95% HIPS - 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina
	90% HIPS - 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina
	85% HIPS - 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina

Fonte: Autor (2017)

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPOSITOS

A caracterização dos compósitos (*pellets* reciclados e os resíduos industriais) foi realizada conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma das etapas caracterização dos compósitos



4.4.1 Ensaios de Queima de Orgânicos

Os ensaios de queima de orgânicos dos compósitos com as cargas foram realizados conforme descrito no item 4.2.2. O objetivo deste ensaio foi verificar a real incorporação de cargas pelo polímero.

4.4.2 Ensaios de Teor de Umidade

Para os ensaios de teor de umidade foi utilizado equipamento Analisador de Umidade do fabricante Mettler Toledo, modelo HS 153, disponível no Laboratório do Centro de Inovação e Tecnologia - Sintronic, Sorocaba-SP. O método utilizado para calcular o teor de umidade, utiliza amostra com massa inicial de cerca de 10g, com temperatura de secagem de 100°C e critério de desligamento de 10 minutos, seguindo a norma ASTM D 570.

O analisador de umidade é feito de dois componentes, uma unidade da balança e uma unidade de aquecimento. Para medir o teor de umidade, a massa inicial da amostra é registrada; em seguida, um radiador de halogênio aquece e seca a amostra enquanto a balança integrada continuamente registra a massa da amostra. Quando a amostra já não perde massa, o instrumento é desligado e o teor de umidade é calculado. A perda total de massa é usada para calcular o teor de umidade.

4.4.3 Ensaios de Teor de Índice de Fluidez

O índice de fluidez tem sido amplamente utilizado na indústria para caracterizar propriedades de fluxo dos polímeros, devido à simplicidade e à

agilidade da técnica utilizada na sua determinação. O fato dos polímeros serem comumente classificados para as várias tecnologias de processamento de acordo com este índice é uma evidência da popularidade da técnica.

No ensaio de índice de fluidez um polímero fundido é forçado a passar por uma matriz capilar e é determinada a massa de material extrudado em função do tempo. Dessa forma é possível obter-se uma propriedade muito útil e bastante utilizada em controle de qualidade de polímeros. O índice de fluidez pode ser entendido como uma avaliação indireta da massa molar do polímero, pois quanto maior o índice de fluidez, menor é a viscosidade do polímero e conseqüentemente menor sua massa molar.

Para os ensaios de teor de índice de fluidez foi utilizado equipamento Plastômetro do fabricante Instron, modelo Ceast MF20, disponível no Laboratório do Centro de Inovação e Tecnologia - Sintronic, Sorocaba-SP. O índice de fluidez é expresso em g/10 min, conforme diretrizes da norma ASTM D 1238. A temperatura de teste foi fixada em 200 °C e a carga nominal foi de 5Kg. Foram realizadas 4 medidas em cada amostra.

4.4.4 Ensaios de Calorimetria Exploratória Diferencial

A Calorimetria Exploratória Diferencial, representada pela sigla DSC, do inglês do *Differential Scanning Calorimetry* mede diretamente a energia envolvida em eventos térmicos. O princípio de funcionamento do equipamento pressupõe que a amostra e a referências sejam mantidas sempre em condições isotérmicas. Assim, se a amostra sofre alteração de temperatura promovida por um evento endotérmico ou exotérmico forçado por um aquecimento ou resfriamento controlado, os termopares detectam a diferença de temperatura. Automaticamente o equipamento modifica a potência de entrada de um dos fornos (da amostra ou da referência), de modo a igualar prontamente a temperatura de ambos. A diferença entre o calor fornecido à amostra e à referência é registrada em função da temperatura ou do tempo (CANEVAROLO, 2003).

Os eventos térmicos que geram modificações em curvas DSC podem ser basicamente, transições de primeira e segunda ordem. As transições de primeira ordem apresentam variação de entalpia – endotérmica ou exotérmica – e dão origem a formação de picos. As transições de segunda ordem caracterizam pela variação de capacidade calorífica, porém sem variações de entalpia. Assim, estas transições não geram picos nas curvas DSC, apresentando-se como um deslocamento da linha de base em forma de S.

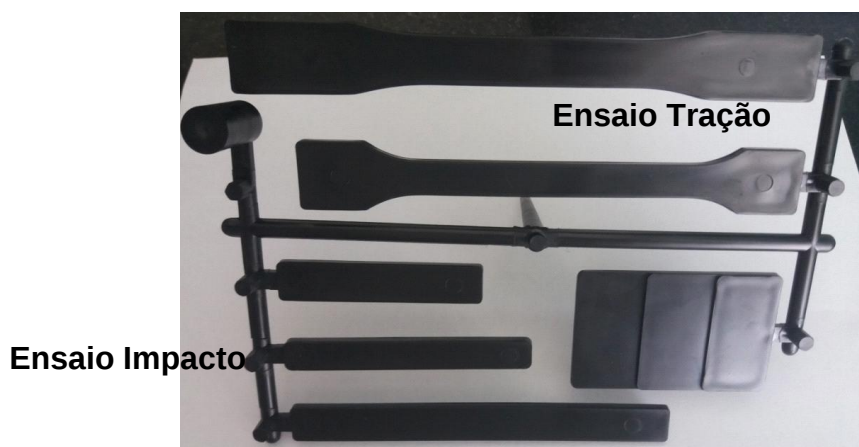
O ensaio de DSC foi realizado utilizando o Calorímetro Diferencial de Varredura, do fabricante Mettler Toledo, modelo DSC1 – Stare System, Gas Controller GC 200, disponível no Laboratório do Centro de Inovação e Tecnologia - Sinctronics, Sorocaba-SP, com temperatura inicial de 30 °C elevada até 320 °C em duplicata, com razão de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de 50 ml/min.

4.5 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA – INJEÇÃO

Os corpos de prova para os ensaios de tração e impacto foram moldados na máquina injetora de peças plásticas Tianjian modelo PL 860/260, com temperatura de 200 a 250°C, com pressão de injeção de 45 MPa e com tempo de injeção 2,5s, disponível na linha fabril – Sinctronics.

Os *pellets* de todas as incorporações e proporções, conforme Tabela 1, resultantes do processo de extrusão, foram injetados em molde que fornece a peça da Figura 5. O molde contém cavidades com dimensões específicas para ensaios mecânicos de tração e impacto (normas ASTM D638 e D256, respectivamente).

Figura 5 - Peça advinda da injetora com corpos de prova, tipo I, para ensaios mecânicos de tração e impacto.



Fonte: Autor (2017)

4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A caracterização dos corpos de prova foi realizada conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma da caracterização dos corpos de prova



4.6.1 Ensaios Mecânicos – Tração

Um dos ensaios mais utilizados é o ensaio de tração por ser relativamente simples e de fácil realização, além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto e a fabricação de peças e componentes (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

O ensaio de tração é empregado para a caracterização de algumas das principais propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos, como módulo de elasticidade, limite de resistência à tração e alongação na ruptura. No ensaio de tração uma amostra é deformada, geralmente até sua fratura, mediante uma

carga de tração gradativamente crescente que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo maior de um corpo de prova, que são preparados segundo as normas técnicas convencionais. O levantamento da curva de tensão de tração pela deformação sofrida pelo corpo constitui o resultado do teste de tração (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000; CALLISTER, 2007).

Para os ensaios de tração foi utilizado Máquina Universal de Ensaio Mecânicos do fabricante Instron, modelo 3366, equipada com uma célula de carga de 10 kN, de acordo com norma ASTM D 638–10, com velocidade de deslocamento de 50 mm/min., sob temperatura de 23°C e utilizando corpo-de-prova tipo I, disponível no Laboratório do Centro de Inovação e Tecnologia - Sintronics, Sorocaba-SP. Foi utilizada uma série de cinco corpos de prova para cada proporção.

4.6.2 Ensaio Mecânico – Impacto

Devido a sua natureza viscoelástica os materiais poliméricos apresentam um comportamento extremamente sensível a taxas de deformação. Os testes de impacto proporcionam solicitações mecânicas extremas para os materiais poliméricos, ou seja, estes materiais são submetidos a tensões elevadas num curto espaço de tempo. Visa medir a energia necessária para romper um corpo de prova injetado e entalhado sob condições padronizadas.

A resistência ao impacto de um material depende de uma série de fatores, dentre eles a temperatura de realização do ensaio, velocidade do impacto durante o teste, sensibilidade aos entalhes padronizados, força recebida pelo corpo de prova, geometria e condições de confecção do corpo de prova entre outros. Grande parte dos ensaios de impacto é realizada em corpos de prova com entalhe. O objetivo de se utilizar este tipo de corpo de prova é simular o processo de ruptura de um material que apresente defeito oriundo de sua constituição química ou de seu processo de fabricação (CANAVEROLO, 2010).

Para os ensaios de impacto, foi utilizado o corpo de prova (Figura 5), através do equipamento para Teste de Impacto tipo pêndulo Izod e Charpy do

fabricante Instron, modelo Ceast 9050 com martelo de 1J, disponível no Laboratório do Centro de Inovação e Tecnologia - Sinctronics, Sorocaba-SP.

Os ensaios de impacto seguiram os procedimentos da norma segundo a norma ASTM D256 e as amostras foram entalhadas em forma de V e aproximadamente 3,2 mm de profundidade. Os ensaios foram realizados numa série de cinco corpos de prova para cada proporção.

4.6.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS)

As amostras utilizadas são resultantes dos corpos de prova utilizados nos testes de tração e foram cortadas na Cortadora Metalográfica (CM 40), da marca Teclago, do Laboratório do NATEL da UNESP de Sorocaba.

A morfologia das amostras foi analisada por MEV e a composição elementar foi feita através da técnica de EDS. O estudo foi feito através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL JSM-6010LA), do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP de Sorocaba.

Para evitar o carregamento das amostras e perda da qualidade da imagem, estas foram recobertas por um filme fino de ouro e platina através do equipamento *Denton Vacuum Desk V*, do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP de Sorocaba e foram fixadas no suporte com o auxílio de uma fita de carbono.

As micrografias foram obtidas por elétrons secundários, sendo que regiões diferentes das amostras foram analisadas, com os aumentos de 40, 300, 950 e 5000 vezes. A análise elementar das amostras foi feita pelo mapeamento de regiões através de um Espectrômetro de Dispersão de Energia acoplado ao MEV, sendo o *spot size* de aproximadamente 4 nm de diâmetro. Além disso, as regiões distintas foram analisadas por pontos, cada uma com seis pontos por amostra.

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados dos ensaios mecânicos impacto e tração foram analisados estatisticamente pelo método de análise de variância - ANOVA (COSTA NETO, 2002), realizada através da ferramenta de análise de dados do MS Excel, que verifica as hipóteses de igualdade entre as médias dos resultados avaliados ou descarta a igualdade entre as médias, indicando que existe ao menos uma diferença entre os resultados.

Uma vez comprovada a hipótese que a estatística F é maior que $F_{\text{crítico}}$ realiza o teste de Tukey (COSTA NETO, 2002), onde se avalia a significância ($\alpha=0,05$) entre cada resultado pertencente ao grupo amostral, relatando quais são as diferenças representativas (técnicas diferentes) e não representativas.

Os cálculos relativos ao teste de Tukey foram realizados com o auxílio do software livre PAST, utilizado para análise de dados científicos, com funções de manipulação de dados, plotagem, estatística univariada e multivariada, análise ecológica, séries temporais e análises espaciais, morfometrias e estratigrafias.

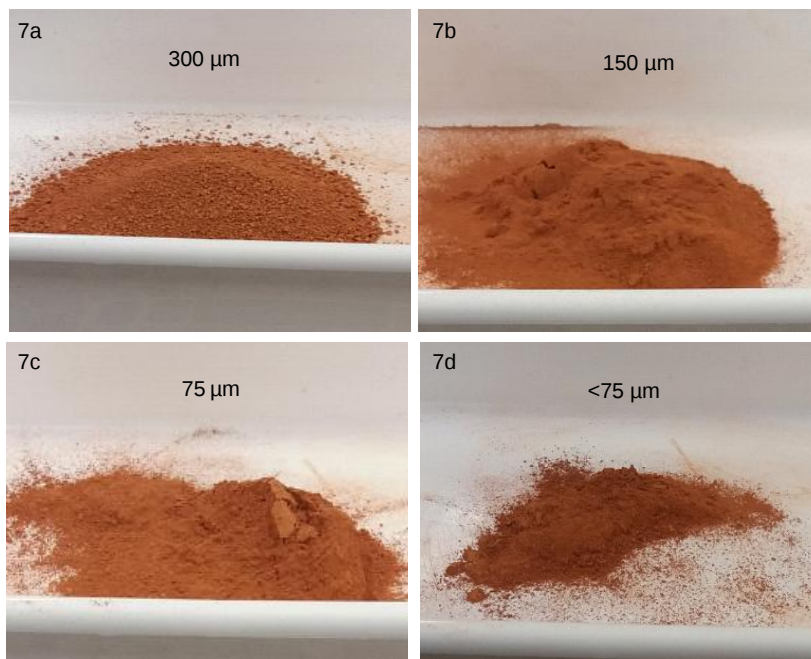
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E EÓLICO

5.1.1 Análise Granulométrica

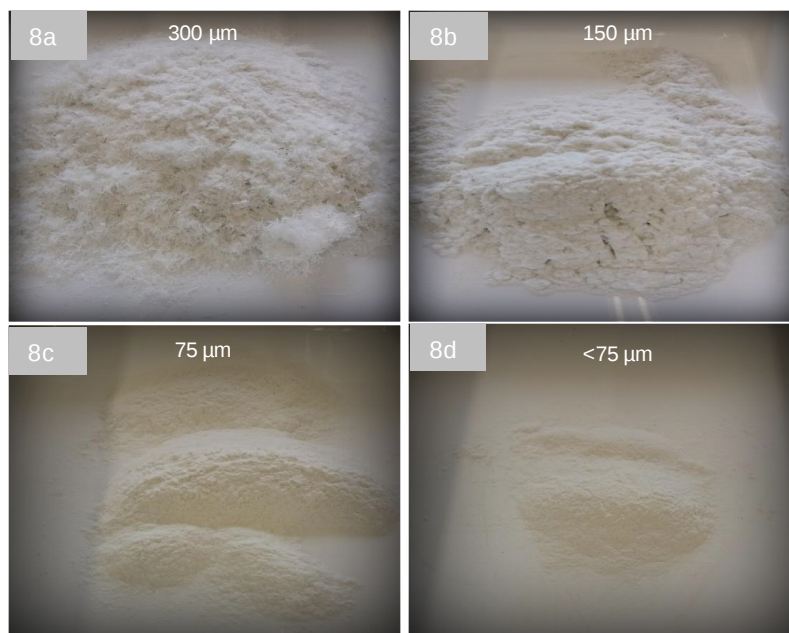
Fotografias das várias faixas granulométricas obtidas das análises granulométricas das amostras dos resíduos da lama vermelha e dos resíduos da fabricação de pás eólicas estão apresentadas nas Figuras 7 (a, b, c e d) e 8 (a, b, c e d), respectivamente.

Figura 7 – Fotografias das frações da análise granulométrica da lama vermelha, sendo a) maior que 300 μm , b) entre 150 e 300 μm , c) entre 150 e 75 μm e d) menor que 75 μm .



Fonte: Autor (2017)

Figura 8 - Fotografia das frações da análise granulométrica da Fibra-Resina, sendo a) maior que 300 μm , b) entre 150 e 300 μm , c) entre 150 e 75 μm e d) menor que 75 μm .



Fonte: Autor (2017)

Os resultados das distribuições granulométricas, em termos de massa retida em cada peneira, estão expostos nas Tabelas 2 para as amostras de lama vermelha e na Tabela 3 para as amostras de fibra de vidro/resina epóxi.

Tabela 2 - Análise granulométrica da amostra de lama vermelha

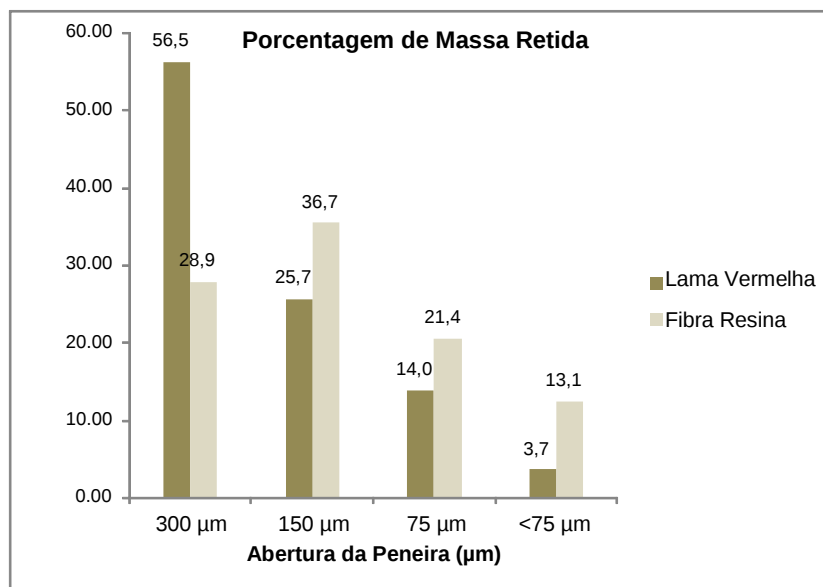
Aberturas (μm)	Massa Retida na Peneira (%)
300	56,5
150	25,7
75	14,0
prato	3,7

Tabela 3 - Análise granulométrica da amostra de fibra de vidro/resina epóxi

Aberturas (μm)	Massa Retida na Peneira (%)
300	28,9
150	36,7
75	21,4
prato	13,1

A Figura 9 apresenta o comparativo entre as porcentagens de massas retidas nas granulometrias das amostras da lama vermelha, fibra de vidro e resina epóxi.

Figura 9 - Comparativo porcentagem massa retida em cada peneira da análise granulométrica (lama e fibra de vidro/resina epóxi)



Fonte: Autor (2017)

A granulometria escolhida para ser a utilizada para a incorporação dos resíduos da mineração (lama vermelha) foi a que se mostrou igual ou superior a 300 µm, principalmente pelo fato de ser a proporção com mais de 50% de presença, como se observa na Figura 9. Ainda, os resíduos da lama vermelha nas granulometrias inferiores a 300 µm ao passarem pela dupla rosca num teste inicial exploratório (observação do comportamento das partículas) se depositaram na parte inferior, não se misturando uniformemente com os *pellets* do HIPS pós-consumo.

Para os resíduos provenientes da fabricação das pás eólicas optou-se pelas granulometrias inferiores a 150 µm, justamente as que apresentaram as menores (21,4% e 13,1%) proporções, conforme apresentado na Figura 9. Essa escolha se baseou em testes preliminares feitos com uma mistura manual de cada fração com cerca de 10g de *pellets* de HIPS que após repouso por alguns

minutos, considerou-se que as misturas com as granulometrias inferiores a 150 μm obtiveram misturas mais homogêneas.

5.1.2 Fluorescência de raios-X da lama vermelha (FRX)

A Tabela 4 apresenta os elementos presentes e as concentrações em cada elemento encontrado nas amostras de cada faixa granulométrica de lama vermelha.

Tabela 4 – Resultados do Ensaio de Fluorescência de raio-X da lama vermelha

Elemento	Concentração	Granulometria (μm)			
		300	150	75	< 75
Na₂O	massa (%)	10,30	10,21	8,63	8,65
MgO	massa (%)	1,02	1,08	1,01	0,99
Al₂O₃	massa (%)	29,11	29,58	30,03	30,66
SiO₂	massa (%)	22,83	22,58	20,09	18,96
P ₂ O ₅	massa (%)	0,86	0,72	0,79	0,75
SO ₃	massa (%)	0,33	0,30	0,33	0,30
Cl	massa (%)	0,16	0,15	0,12	0,11
K ₂ O	massa (%)	0,17	0,17	0,21	0,19
CaO	massa (%)	4,37	4,36	4,81	4,38
TiO₂	massa (%)	2,03	2,11	2,85	3,17
Cr ₂ O ₃	massa (%)	0,04	0,04	0,06	0,05
Mn ₂ O ₃	massa (%)	0,10	0,11	0,15	0,15
Fe₂O₃	massa (%)	28,79	28,73	30,89	31,60
ZnO	massa (%)	0,09	0,07	0,09	1,05
SrO	massa (%)	0,31	0,27	0,38	0,34

Fonte: (Autor, 2017)

Os elementos presentes na lama vermelha estudada estão de acordo com os encontrados por vários autores em diferentes países (Tabela 5).

Tabela 5 – Composição química da lama em diversos países

Referência	Local	Composição (%)														
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	ZrO ₂	V ₂ O ₅	ZnO
SAPUTRA <i>et al.</i> , 2012	Austrália	16,00	-	15,00	5,00	-	-	-	-	5,00	-	60,00	-	-	-	-
KUMAR <i>et al.</i> , 2013	Austrália	1,10	0,20	15,20	29,20	-	-	-	4,50	-	-	31,50	-	-	-	-
SMILJANIC <i>et al.</i> , 2010	Bósnia	7,76	-	18,33	12,37	-	-	-	3,01	4,70	-	44,35	-	-	-	-
COSTA <i>et al.</i> , 2010	Brasil	6,00	-	22,00	11,00	-	-	-	5,00	3,00	-	20,00	0,40	-	-	-
ANTUNES <i>et al.</i> , 2012	Brasil	8,01	0,04	22,87	19,19	-	-	-	2,17	2,98	-	27,04	0,16	-	-	-
RIBEIRO <i>et al.</i> , 2012	Brasil	7,35	-	19,87	14,34	-	-	1,87	4,61	2,66	-	19,85	0,21	-	-	-
MANFROI <i>et al.</i> , 2013	Brasil	10,80	-	30,35	16,62	0,40	0,06	2,84	4,12	3,98	0,03	27,50	0,58	1,60	0,50	0,02
SOUZA <i>et al.</i> , 2012	Brasil	7,90	0,40	22,80	19,20	0,40	-	0,80	2,20	3,00	-	27,40	0,20	-	-	-
TEIXEIRA <i>et al.</i> , 2014	Brasil	6,00	-	22,00	11,00	-	-	-	5,00	3,00	-	27,00	0,40	-	-	-
QIN <i>et al.</i> , 2011	China	3,23	0,72	18,49	8,35	-	-	0,20	18,05	6,18	-	31,26	-	-	-	-
HE <i>et al.</i> , 2012	China	14,50	-	23,97	26,36	-	-	-	2,58	2,48	-	30,11	-	-	-	-
GUO <i>et al.</i> , 2014	China	10,02	-	26,49	21,03	-	-	-	2,27	1,53	-	27,36	-	-	-	-
SNEFF <i>et al.</i> , 2014	Espanha	6,84	-	18,80	5,54	-	0,23	0,08	3,27	11,20	-	51,80	0,04	-	-	-
ZHANG, L. <i>et al.</i> , 2014	EUA	4,37	0,27	15,06	22,82	2,43		1,19	12,24	3,43	-	17,34	0,36	-	-	-
SAMOUHOS <i>et al.</i> , 2013	Grécia	2,14	0,31	14,63	7,37	-	-	0,07	12,03	6,05	0,28	43,19	-	1,12	0,16	-
KALKAN <i>et al.</i> , 2013	Turquia	9,40	0,33	20,20	17,29	-	-	-	5,30	4,00		35,04	-	-	-	-

Fonte: (Autor, 2018)

Confirma-se que a lama vermelha é constituída por uma mistura de óxidos, sendo Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂ e Na₂O componentes majoritários. Também está presente na lama estudada CaO em quantidade apreciável, assim como identificado por alguns autores.

Melo (2014), destaca que rochas como as graníticas, ácidas, eletronegativas e com maiores porcentagens de sílica (SiO₂), são hidrofílicas e apresentam maior afinidade com água.

Verifica-se que a granulometria da lama vermelha adotada para as incorporações (igual ou superior a 300 µm) apresentam concentração de 23% de SiO₂. Observa-se pela Tabela 4 também que o componente com maior

percentual, cerca de 30%, é a alumina (Al_2O_3), o que evidencia que o processo industrial para seu isolamento da bauxita ainda pode evoluir.

5.1.3 Determinação do teor de fibra resina (inorgânicos)

A Tabela 6 apresenta os resultados das três análises de teor de inorgânicos realizadas com o resíduo eólico em pó, que indicam uma média de 83,21% de inorgânicos, diretamente relacionados à fibra de vidro, presente no resíduo, ou seja, há menos de 17% de material polimérico no resíduo a ser incorporado.

Tabela 6 - Porcentagem de inorgânicos presentes no resíduo eólico em pó após queima

Amostra	Massa (g)						%		
	Cadinhos	Amostra	Cadinho + Amostra	1ª Medição	1ª Medição	1ª Medição	Teor de Fibra	Média	Desvio Padrão
1	76,5535	1,0102	77,5637	77,3969	77,3957	77,3940	83,2013	83,2067	0,0001
2	87,0714	1,0170	88,0884	87,9187	87,9180	87,9174	83,1858		
3	75,8089	1,0282	76,8371	76,6655	76,6651	76,6647	83,2328		

5.2 INCORPORAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Na incorporação em extrusora os *pellets* de HIPS reciclado envolveram tanto a lama quanto o resíduo fibra-resina e deram origem a filamentos (Figura 10a) que foram posteriormente picados novamente na forma de *pellets* (Figura 10b).

Figura 10 – (a) Filamento da proporção 90% HIPS e 10% fibra resina (% em gramas) e (b) *Pellets* de Poliestireno de alto impacto (HIPS) pós-consumo com carga



Fonte: Autor (2017)

Todas as incorporações dos HIPS que utilizaram lama vermelha absorveram água durante o processo de extrusão (Figura 11), o que motivou nova secagem das amostras em estufa, nas mesmas condições apresentadas no item 4.1.1: 50°C durante 72 horas.

Figura 11 – Fotografia de compósito com lama embalado mostrando a retenção de água.



Fonte: Autor (2017)

Em seu trabalho, Prabu *et al.*, (2012) investigaram o efeito da adição de carga de lama vermelha nas propriedades mecânicas da resina de poliéster. Descobriu-se que os compósitos tinham propriedades físico-mecânicas similares às da resina de poliéster, aumentando a concentração de lama vermelha, a resistência à tração diminuía rapidamente até 15% e depois lentamente com adição adicional (até 45%). Na flexão, não houve mudança significativa na resistência até 20% de adição de lama vermelha como esperado devido a uma efetiva adesão interfacial entre a lama vermelha e o poliéster. A redução na resistência à tração é de cerca de 43% para o compósito com 45% de lama vermelha em relação à resina pura, enquanto a queda na resistência à flexão foi de aproximadamente 34% para o mesmo compósito.

Costa (2016) constatou que para os compósitos de lama vermelha com fibras de juta, os resultados mostraram que há um decréscimo da resistência à tração dos compósitos de lama vermelha e fibras de juta, conforme aumenta-se a proporção de lama vermelha dentro da matriz. Em contrapartida, quanto à resistência ao impacto da matriz polimérica pura e dos compósitos de lama vermelha com fibras observa-se que os compósitos de lama vermelha em todas as proporções com fibras de sisal se sobressaíram em relação ao seu desempenho mecânico quando comparados com a matriz pura e as demais séries ensaiadas. Os compósitos de 10 % de lama vermelha com fibras de sisal e juta apresentaram resistência ao impacto superior a matriz pura.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

5.3.1 Ensaios de Queima de Orgânicos

A Tabela 7 apresenta os resultados do teste de determinação do teor de inorgânicos realizados com o HIPS pós consumo sem incorporações e com as incorporações dos resíduos de lama vermelha e fibra-resina. As porcentagens dos teores de inorgânicos detalhadas estão no Apêndice A.

Tabela 7 - Resultados relativos ao teor de inorgânicos nas amostras com e sem as incorporações teóricas de lama vermelha (5, 10 e 15%) e fibra-resina (5, 10 e 15%)

Amostra	% Teórico						
	HIPS pós consumo (0 %)	Teor de Lama Vermelha (5%)	Teor de Lama Vermelha (10%)	Teor de Lama Vermelha (15%)	Teor de Fibra Resina (5%)	Teor de Fibra Resina (10%)	Teor de Fibra Resina (15%)
1	0,0790	4,2637	8,4656	13,9175	3,4085	8,5329	10,9834
2	0,0598	4,3672	8,9389	14,1160	3,5355	8,0962	12,0892
3	0,0199	4,1421	9,1601	14,4940	3,7748	8,0650	11,6315
Média (%)	0,0529	4,2577	8,8548	14,1759	3,5730	8,2313	11,5681
Desvio Padrão	0,0001	0,0011	0,0035	0,0029	0,0018	0,0026	0,0055

Observa-se pela Tabela 7 que as incorporações de lama vermelha e fibra-resina em poliestireno de alto impacto pós-consumo (HIPS) podem ser consideradas satisfatórias, pois chegaram próximas aos valores determinados. Mesmo quando se trata de fibra-resina, que possui cerca 17% de resina (item 5.1.3, Tabela 6), ou seja, fração queimável. Dessa forma, o percentual teórico de inorgânicos pode ser corrigido para 4,17%, 9,61% e 13,51%, o que aproxima ainda mais os resultados teóricos das incorporações reais. Os resultados das incorporações da lama, um pouco distante no percentual teórico de 10%, provavelmente são reflexos das dificuldades intrínsecas de incorporação já relatadas em 5.2, bem menores no caso dos resíduos eólicos.

5.3.2 Ensaios de Teor de Umidade

Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos ensaios de teor de umidade para o HIPS pós-consumo (sem carga) e para as incorporações com os resíduos da mineração e da fabricação das pás eólicas.

Tabela 8 - Resultados relativos ao teor de umidade do poliestireno de alto impacto sem incorporação e com incorporação de lama vermelha, fibra-resina e dos dois resíduos.

Incorporação	Teor de Umidade (%)
HIPS pós-consumo	0,05
HIPS com 5% Lama Vermelha	0,18
HIPS com 10% Lama Vermelha	0,32
HIPS com 15% Lama Vermelha	0,41
HIPS com 5% Fibra Resina	0,08
HIPS com 10% Fibra Resina	0,09
HIPS com 15% Fibra Resina	0,09
HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	0,10
HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	0,17
HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina	0,20

Em virtude das características hidrofílicas da lama vermelha (MELO, 2014), que geraram o comportamento relatado em 5.2 (Figura 12), observa-se aumento

do teor de umidade dos compósitos produzidos com esse resíduo (com ou sem fibra-resina) em relação ao HIPS pós consumo, bem como o maior teor de umidade quanto maior o percentual de lama incorporado. Por exemplo, para as incorporações do HIPS com 15% de lama vermelha o aumento foi muito significativo, em 8 vezes o teor de umidade do HIPS pós consumo sem incorporação. No caso das incorporações somente com fibra-resina observam-se valores muito próximos do HIPS sem incorporação.

5.3.3 Ensaios de Teor de Índice de Fluidez

Na Tabela 9 são apresentados os resultados dos ensaios do teor de índice de fluidez para o HIPS pós-consumo (sem carga) e para as incorporações com os resíduos da mineração e da fabricação das pás eólicas.

Tabela 9 - Resultados relativos ao índice de fluidez do poliestireno de alto impacto sem incorporação e com incorporação de lama vermelha, fibra-resina e dos dois resíduos.

Incorporação	Índice de fluidez em volume MVR (g/10min)
HIPS pós-consumo	8,6
HIPS com 5% Lama Vermelha	7,6
HIPS com 10% Lama Vermelha	7,6
HIPS com 15% Lama Vermelha	7,6
HIPS com 5% Fibra Resina	8,2
HIPS com 10% Fibra Resina	7,8
HIPS com 15% Fibra Resina	6,3
HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	8,3
HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	7,5
HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina	6,4

Observa-se pela Tabela 9 que os resultados de fluidez para os compósitos incorporados somente com lama foram iguais (7,6 g/10min). Ou seja, independente da quantidade de lama (mínimo 5% e máximo 15%) o prejuízo em termos de fluxo do polímero fundido é o mesmo. Já para as incorporações que

contém somente fibra-resina observa-se que com as proporções com maior quantidade de resíduo (15%), existe aumento da viscosidade, chegando a índices ainda mais baixos (6,3 g/10 min) que os reportados para a lama (7,6 g/10 min). Outro comportamento interessante que depreende-se da Tabela 9 é que quando a incorporação envolveu lama e fibra-resina, observam-se praticamente os mesmos valores que as incorporações somente com fibra-resina, sugerindo novamente que o efeito deletério nas propriedades de fluxo causado pelos resíduos eólicos são superiores aos dos resíduos de mineração de bauxita.

Entretanto, a faixa obtida dos índices, independente da incorporação, variou 6,3 a 8,3 g/10 min., o que atende as especificações do HIPS pós-consumo 4-10 g/10 min. (SINCTRONICS, 2017).

5.3.4 Ensaios de Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC

Os resultados das análises térmicas de calorimetria exploratória diferencial do HIPS reciclado com os resíduos da mineração, da fabricação da pá eólica e em conjunto ambos os resíduos, em forma de gráficos são apresentados nas Figuras 12, 13 e 14. No apêndice B, em único gráfico estão apresentados os resultados dos resíduos da mineração (lama vermelha), resíduos da fabricação das pás eólicas e os dois resíduos em conjunto.

Figura 12 - Gráfico das análises térmicas de calorimetria exploratória diferencial do HIPS reciclado com o resíduo da mineração (lama vermelha)

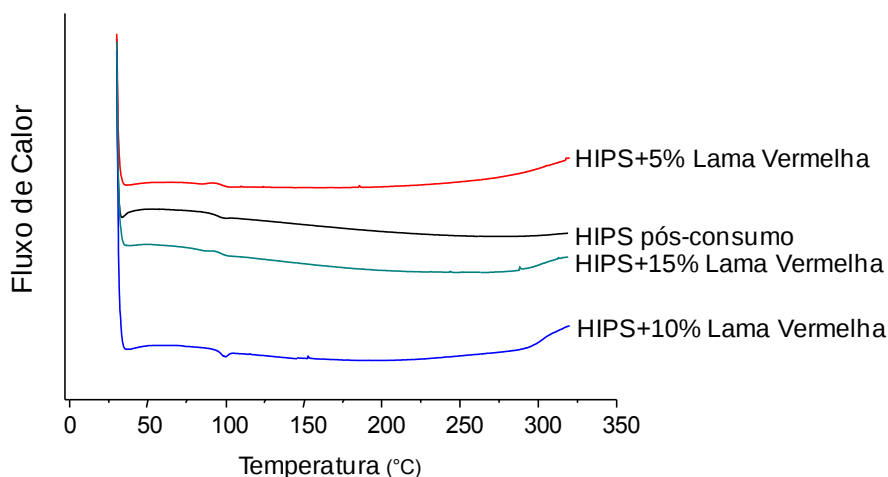


Figura 13 - Gráfico das análises térmicas de calorimetria exploratória diferencial do HIPS reciclado com o resíduo da fabricação da pá eólica (fibra-resina).

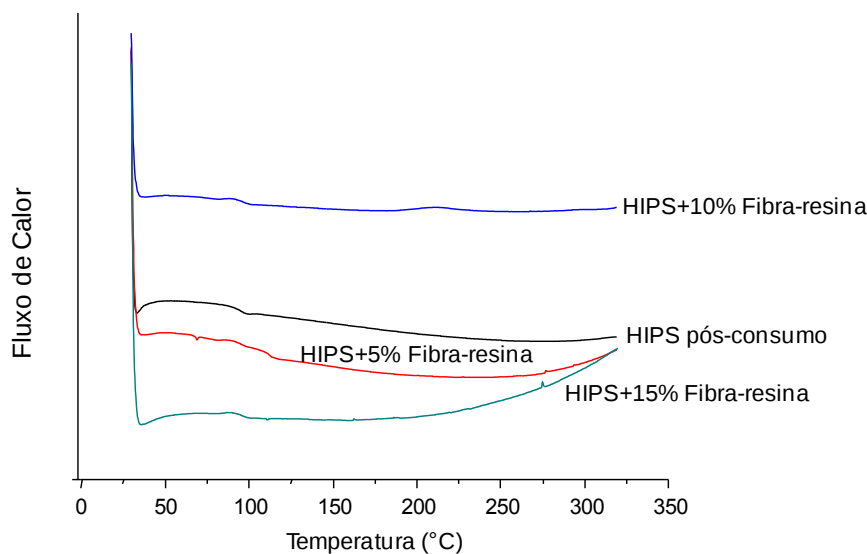
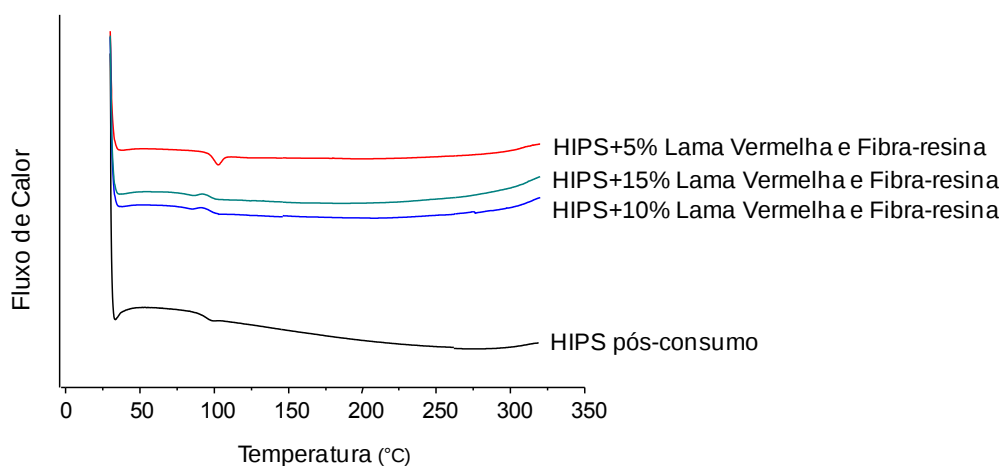


Figura 14 - Gráfico das análises térmicas de calorimetria exploratória diferencial do HIPS reciclado com os resíduos em conjunto da mineração da lama vermelha e da fabricação da pá eólica (fibra-resina).



A temperatura de transição vítrea T_g , correspondente à da fase estireno, foi observada em todas as amostras, conforme demonstrado na Tabela 10.

A adição dos resíduos (fibra de vidro/-resina de epóxi e lama vermelha) interferiu na movimentação das cadeias poliméricas, porém a tendência esperada de restrição de movimentos e aumento da T_g não foi totalmente observada, o que deve ter razão na baixa adesão entre o HIPS e os resíduos, como constatado no item 5.4.3 (MEV).

Tabela 10 - Temperatura de transição vítrea T_g

Incorporação	T_g (°C)
HIPS pós consumo	100,40
HIPS com 5% Lama Vermelha	85,03
HIPS com 10% Lama Vermelha	100,02
HIPS com 15% Lama Vermelha	88,53
HIPS com 5% Fibra Resina	82,05
HIPS com 10% Fibra Resina	82,20
HIPS com 15% Fibra Resina	80,40
HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	102,62
HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	85,18
HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina	86,35

5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

5.4.1 Ensaios Mecânicos – Tração

Os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova para o HIPS pós-consumo (sem carga) estão representados na Figura 15. Observa-se um formato típico de uma curva tensão x deformação de um termoplástico, com fases elástica e plástica bem definidas. Durante o ensaio de tração todos os corpos de prova foram rompidos e separados em duas partes, conforme Figuras 16. Devido ao fato de apresentarem o mesmo formato, os gráficos dos demais corpos de prova com os resíduos da mineração e da fabricação das pás eólicas estão no Apêndice C.

Figura 15 - Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS pós-consumo (sem carga)

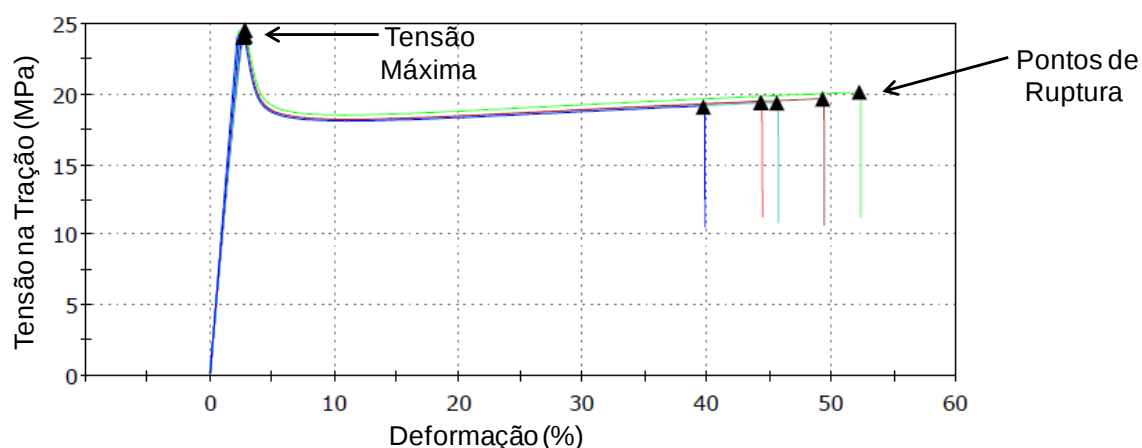


Figura 16 - (a) Fotografia dos corpos de prova rompidos do HIPS com 5% Lama Vermelha; (b) Fotografia dos corpos de prova rompidos do HIPS com 5% Lama Vermelha e (c) Fotografia dos corpos de prova rompidos do HIPS com 5% Lama Vermelha



A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos de resistência a tração do HIPS sem incorporação e dos compósitos HIPS+lama vermelha, HIPS+fibra-resina e HIPS+lama vermelha/fibra-resina.

Tabela 11 - Resistência à tração na máxima do HIPS reciclado e dos compósitos tendo lama vermelha e fibra-resina incorporados.

Incorporação	HIPS pós consumo	HIPS com 5% Lama Vermelha	HIPS com 10% Lama Vermelha	HIPS com 15% Lama Vermelha	HIPS com 5% Fibra Resina	HIPS com 10% Fibra Resina	HIPS com 15% Fibra Resina	HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina
Resistência a Tração (MPa)	19,40	19,10	18,40	18,90	19,60	19,60	19,80	18,30	18,80	19,30
	19,60	19,60	18,80	18,80	19,60	20,30	20,50	18,20	18,60	19,40
	20,10	19,80	18,90	18,80	19,70	19,50	20,20	18,10	18,70	19,10
	19,40	19,70	17,90	18,70	19,40	19,40	19,90	18,50	18,60	19,70
	19,10	19,90	18,20	18,70	19,50	19,40	20,50	18,20	18,70	19,40
Somatória	97,60	98,10	92,20	93,90	97,80	98,20	100,90	91,30	93,40	96,90
Média	19,52	19,62	18,44	18,78	19,56	19,64	20,18	18,26	18,68	19,38
Desvio Padrão	0,37	0,31	0,42	0,08	0,11	0,38	0,33	0,15	0,08	0,22
Variância	0,14	0,10	0,17	0,01	0,01	0,14	0,11	0,02	0,01	0,05

A análise de variância dos testes de tração, apresentada na Tabela 12, mostra que o valor de F é superior ao $F_{\text{crítico}}$, indicando que existe ao menos um

valor que tem diferença representativa nas amostras analisadas, conforme Tabela 13.

Tabela 12 - Análise de Variância (ANOVA) - Resistência à tração do HIPS reciclado e dos compósitos

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	17,51	9	1,9458	25,80637	5,77E-14	2,124029
Dentro dos grupos	3,016	40	0,0754			
Total	20,5282	49				

A Tabela 13 mostra os resultados do teste de Tukey, para a resistência a tração do HIPS reciclado em comparação aos compósitos com adição dos resíduos eólicos e da mineração. O comparativo entre compósitos estão no Apêndice D.

Tabela 13 - Teste de Tukey - Resistência à tração do HIPS reciclado e dos compósitos

	HIPS com 5% Lama Vermelha	HIPS com 10% Lama Vermelha	HIPS com 15% Lama Vermelha	HIPS com 5% Fibra Resina	HIPS com 10% Fibra Resina	HIPS com 15% Fibra Resina	HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina
HIPS pós consumo	não representativo	representativo	representativo	não representativo	não representativo	representativo	representativo	representativo	não representativo

Pode se observar que para o HIPS com adição somente do resíduo da mineração (lama vermelha), a incorporação com 5% de resíduo industrial apresentou valor similar ao HIPS reciclado, por outro lado as incorporações com 10% e 15% apresentaram redução na resistência à tração. Já para as incorporações com fibra resina exclusivamente, ocorreu um aumento em média de 4% na resistência na incorporação de 15%. As incorporações com 5% e 10% de fibra resina apresentaram valores similares ao HIPS pós-consumo. As incorporações com os resíduos da lama vermelha e fibra resina, em conjunto, apresentaram reduções na resistência tração nas incorporações com 2,5% e 5% dos resíduos. As incorporações com 7,5% de fibra resina e lama vermelha apresentaram valores similares ao HIPS pós-consumo. Dessa forma, pela Tabela 13 pode-se afirmar que os resultados de resistência à tração do HIPS pós consumo sem incorporação são estaticamente similares aos resultados do

HIPS+5% de lama, HIPS+ 5% de fibra-resina, HIPS + 10% de fibra-resina e HIPS + 7,5% de lama e 7,5% de fibra-resina.

Zhang *et al.* (2011) obtiveram aumento da resistência a tração em compósitos de polipropileno usando lama vermelha nas frações mássicas de 0% a 15%, mas em frações mássicas acima de 20% a resistência a tração reduziu significativamente. Atribuem esse comportamento a formação de maior número de agregados da partícula de lama vermelha, contribuindo para o aparecimento de regiões com concentração de tensões, que reduzem a resistência a tração.

Foi evidenciado que a adição de lama vermelha em resina termofixa de poliéster insaturado reduz as resistências à tração e à flexão, provocando um aumento significativo na densidade (CUNHA *et.al*, 2012). O mesmo foi observado para compósito de poliéster insaturado reforçado com fibra de vidro (PRFV), porém com aumento significativo não só dá densidade, mas também da resistência à abrasão (JENA e SATAPATHY, 2011). Essa mesma redução de resistência á tração foi observada comparando compósito híbrido de fibras de juta e de vidro em matriz de resina epóxi, com e sem lama vermelha. (DASH, THATOI e SARANGAI, 2010).

Um trabalho mostrou que compósitos de poliéster reforçado com fibra natural, neste caso fibra de sisal, com carga de lama vermelha (45%), apresentaram resistências ao impacto e à flexão maiores do que sem lama vermelha. (PRABU *et.al.*, 2012).

A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos de deformação no ponto de ruptura.

Tabela 14 - Deformação no ponto de ruptura do HIPS reciclado e dos compósitos

Incorporação	HIPS pós consumo	HIPS com 5% Lama Vermelha	HIPS com 10% Lama Vermelha	HIPS com 15% Lama Vermelha	HIPS com 5% Fibra Resina	HIPS com 10% Fibra Resina	HIPS com 15% Fibra Resina	HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina
Deformação no Ponto de Ruptura (%)	44,27	18,30	7,06	11,17	30,03	24,94	12,15	20,20	12,98	10,82
	49,21	27,36	3,47	13,41	28,36	8,13	9,53	10,04	16,27	7,59
	52,15	28,62	5,81	8,96	29,92	15,22	10,04	10,88	10,35	10,42
	45,54	26,59	7,73	10,70	24,02	17,41	11,24	24,19	13,51	6,36
	39,65	32,88	12,85	14,63	27,52	18,36	6,99	22,69	11,99	6,93
Somatória	230,83	133,75	36,92	58,87	139,84	84,06	49,96	88,00	65,10	42,12
Média	46,17	26,75	7,38	11,77	27,97	16,81	9,99	17,60	13,02	8,42
Desvio Padrão	4,78	5,31	3,46	2,25	2,45	6,06	1,97	6,68	2,18	2,06
Variância	22,87	28,20	11,99	5,07	6,00	36,69	3,86	44,59	4,75	4,23

A análise de variância da deformação no ponto de ruptura apresentada na Tabela 15 mostra que o valor de F é superior ao $F_{\text{crítico}}$, indicando que existe ao menos um valor que tem diferença representativa nas amostras analisadas.

Tabela 15 - Análise de Variância (ANOVA) – Deformação no ponto de ruptura do HIPS reciclado e dos compósitos

ANOVA						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6497,358	9	721,9287	42,90987	9,02E-18	2,124029
Dentro dos grupos	672,9721	40	16,8243			
Total	7170,33	49				

A Tabela 16 mostra os resultados do teste de Tukey, para a deformação no ponto de ruptura do HIPS reciclado em comparação aos compósitos com adição dos resíduos eólicos e da mineração. O comparativo entre compósitos estão no Apêndice D.

Tabela 16 - Teste de Tukey - Deformação no ponto de ruptura do HIPS reciclado e dos compósitos

	HIPS com 5% Lama Vermelha	HIPS com 10% Lama Vermelha	HIPS com 15% Lama Vermelha	HIPS com 5% Fibra Resina	HIPS com 10% Fibra Resina	HIPS com 15% Fibra Resina	HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina
HIPS pós consumo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo

Observa-se pela Tabela 14 que todos os compósitos, seja com adição de lama vermelha ou fibra-resina, separados ou conjuntamente, apresentaram redução na deformação no ponto de ruptura. A maior redução, em média 84%,

ocorreu na incorporação com 10% de lama vermelha. Já pela Tabela 16 confirma-se que esses resultados são estatisticamente diferentes. Ou seja, a adição dos resíduos escolhidos diminuiu a deformação na ruptura em relação ao polímero puro.

A Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos do módulo de elasticidade.

Tabela 17 - Módulo de Elasticidade do HIPS reciclado e dos compósitos

Incorporação	HIPS pós consumo	HIPS com 5% Lama Vermelha	HIPS com 10% Lama Vermelha	HIPS com 15% Lama Vermelha	HIPS com 5% Fibras Resina	HIPS com 10% Fibras Resina	HIPS com 15% Fibras Resina	HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibras Resina	HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibras Resina	HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibras Resina
Módulo Elasticidade (MPa)	1060	1060	1200	1300	1180	1330	1450	1130	1240	1310
	1070	1110	1180	1290	1170	1340	1490	1110	1220	1330
	1070	1170	1220	1280	1170	1340	1460	1120	1230	1280
	1080	1100	1150	1280	1160	1340	1410	1120	1240	1300
	1110	1160	1210	1290	1150	1300	1410	1130	1240	1300
Somatória	5390	5600	5960	6440	5830	6650	7220	5610	6170	6520
Média	1078	1120	1192	1288	1166	1330	1444	1122	1234	1304
Desvio Padrão	16,00	44,10	26,80	5,77	8,66	16,90	33,10	7,55	9,67	15,60
Variância	370	2050	770	70	130	300	1180	70	80	330

A análise de variância do módulo de elasticidade, apresentada na Tabela 18, mostra que o valor de F é superior ao $F_{\text{crítico}}$, indicando que existe ao menos um valor que tem diferença representativa nas amostras analisadas, conforme Tabela 16.

Tabela 18 - Análise de Variância (ANOVA) – Módulo de Elasticidade do HIPS reciclado e dos compósitos

ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	
Entre grupos	585058	9	65006,44	121,5074	3,54E-26	2,124029	
Dentro dos grupos	21400	40	535				
Total	606458	49					

A Tabela 19 mostra os resultados do teste de Tukey, para módulo de elasticidade do HIPS reciclado em comparação aos compósitos com adição dos

resíduos eólicos e da mineração. O comparativo entre compósitos estão no Apêndice E.

Tabela 19 - Teste de Tukey - Módulo de Elasticidade do HIPS reciclado e dos compósitos

	HIPS com 5% Lama Vermelha	HIPS com 10% Lama Vermelha	HIPS com 15% Lama Vermelha	HIPS com 5% Fibra Resina	HIPS com 10% Fibra Resina	HIPS com 15% Fibra Resina	HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina
HIPS pós consumo	não representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	não representativo	representativo	representativo

Pode se observar pelas Tabelas 17 e 19 que para o HIPS com adição somente do resíduo da mineração (lama vermelha), a incorporação com 5% de resíduo industrial apresentou valor estatisticamente similar no módulo elasticidade, por outro lado as incorporações com 10% e 15% apresentaram aumento nos valores. O aumento da concentração de lama vermelha aumenta o módulo de elasticidade pela contribuição da rigidez das partículas de lama vermelha. Comportamento semelhante ocorreu com as incorporações exclusivamente com fibra-resina, pois o módulo de elasticidade de todas as formulações foi superior ao registrado para o HIPS sem incorporação. Acréscimo em média de 8% para HIPS + 5% de fibra-resina; 23% para HIPS + 10% de fibra-resina e 34% para HIPS + 15% de fibra-resina, o maior registro no ensaio Pode-se afirmar ainda que quanto maior a porcentagem do resíduo incorporado, maior o módulo de elasticidade. A fibra de vidro é, sabidamente, um excelente reforço para polímeros.

As incorporações com ambos os resíduos industriais apresentaram valores similares nas incorporações com HIPS + 2,5% de lama e 2,5% de fibra-resina, já nas incorporações com HIPS + 5% de lama e 5% de fibra-resina 5% e + 7,5% de lama e 7,5% de fibra-resina apresentaram aumento na elasticidade, aumento máximo médio de 21%.

5.4.2 Ensaios Mecânicos – Impacto

Na Tabela 20 são apresentados os resultados dos ensaios de impacto para o HIPS pós-consumo (sem carga) e para as incorporações com os resíduos da mineração e da fabricação das pás eólicas.

Tabela 20 - Resultados relativos ao ensaio mecânico de resistência ao impacto

Incorporação	HIPS pós consumo	HIPS com 5% Lama Vermelha	HIPS com 10% Lama Vermelha	HIPS com 15% Lama Vermelha	HIPS com 5% Fibra Resina	HIPS com 10% Fibra Resina	HIPS com 15% Fibra Resina	HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina
Resistência ao Impacto (J/m)	85,66	61,22	45,84	40,03	47,25	45,47	40,19	62,41	44,63	46,03
	85,66	57,22	44,50	42,81	47,81	44,94	42,22	72,34	47,94	42,75
	85,66	60,31	50,41	44,38	49,28	47,75	42,28	66,34	45,97	43,84
	85,66	59,09	45,59	41,63	49,97	47,88	41,56	61,97	45,72	41,84
	85,66	59,94	57,56	42,69	52,16	42,81	46,44	61,63	47,44	43,00
Somatória	428,30	297,78	243,90	211,54	246,47	228,85	212,69	324,69	231,70	217,46
Média	85,66	59,56	48,78	42,31	49,29	45,77	42,54	64,94	46,34	43,49
Desvio Padrão	0,00	1,51	5,41	1,61	1,94	2,12	2,34	4,55	1,34	1,59
Variância	0,00	2,29	29,22	2,59	3,76	4,48	5,47	20,72	1,80	2,52

A análise de variância do ensaio mecânico, resistência ao impacto, apresentada na Tabela 21, mostra que o valor de F é superior ao $F_{\text{crítico}}$, indicando que existe ao menos um valor que tem diferença representativa nas amostras analisadas, conforme Tabela 22.

Tabela 21 - Análise de Variância (ANOVA) – Resistência ao Impacto do HIPS reciclado e dos compósitos

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	8471,715	9	941,3017	129,2078	1,09E-26	2,124029
Dentro dos grupos	291,4072	40	7,285179			
Total	8763,122	49				

A Tabela 22 mostra os resultados do teste de Tukey, para o módulo de elasticidade do HIPS reciclado em comparação aos compósitos com adição dos resíduos eólicos e da mineração, observa-se que todos os resultados podem ser considerados estatisticamente distintos entre si. O comparativo entre compósitos estão no Apêndice E.

Tabela 22 - Teste de Tukey – Resistência ao Impacto do HIPS reciclado e dos compósitos

Incorporação	HIPS com 5% Lama Vermelha	HIPS com 10% Lama Vermelha	HIPS com 15% Lama Vermelha	HIPS com 5% Fibra Resina	HIPS com 10% Fibra Resina	HIPS com 15% Fibra Resina	HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina
HIPS pós consumo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo	representativo

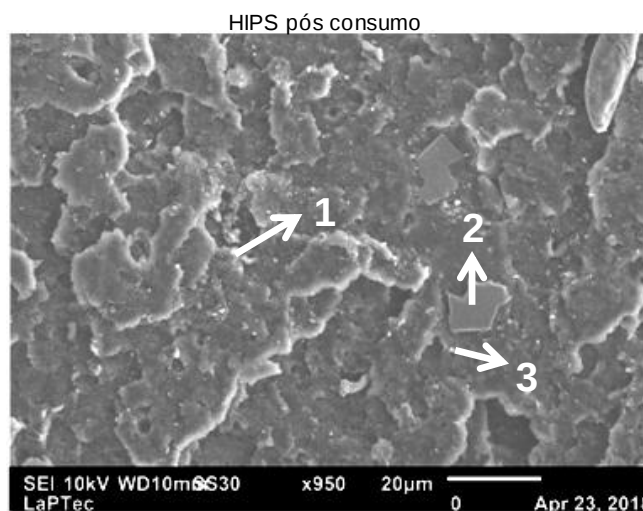
Observa-se que em todos os compósitos, a adição dos resíduos industriais, independente de ser lama vermelha ou fibra resina, ocasionou redução na resistência ao impacto em todas as formulações. Os maiores decréscimos ocorreram nas incorporações do HIPS com 15% de lama vermelha e 15% de fibra resina, alcançando valores em média 51% menores. Durante o processo de extrusão e a formação dos filamentos foi possível notar que para a incorporação com 15% de lama o filamento se tornou bastante quebradiço em comparação às demais incorporações.

Verifica-se nos corpos de prova após os ensaios de impacto, a presença de vazios comprometendo a resistência de impacto.

5.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS)

A Figura 17 mostra imagem para o HIPS reciclado em uma ampliação de 950 vezes.

Figura 17 – Micrografia do HIPS pós-consumo a uma ampliação de 950 vezes



Fonte: O Autor (2018)

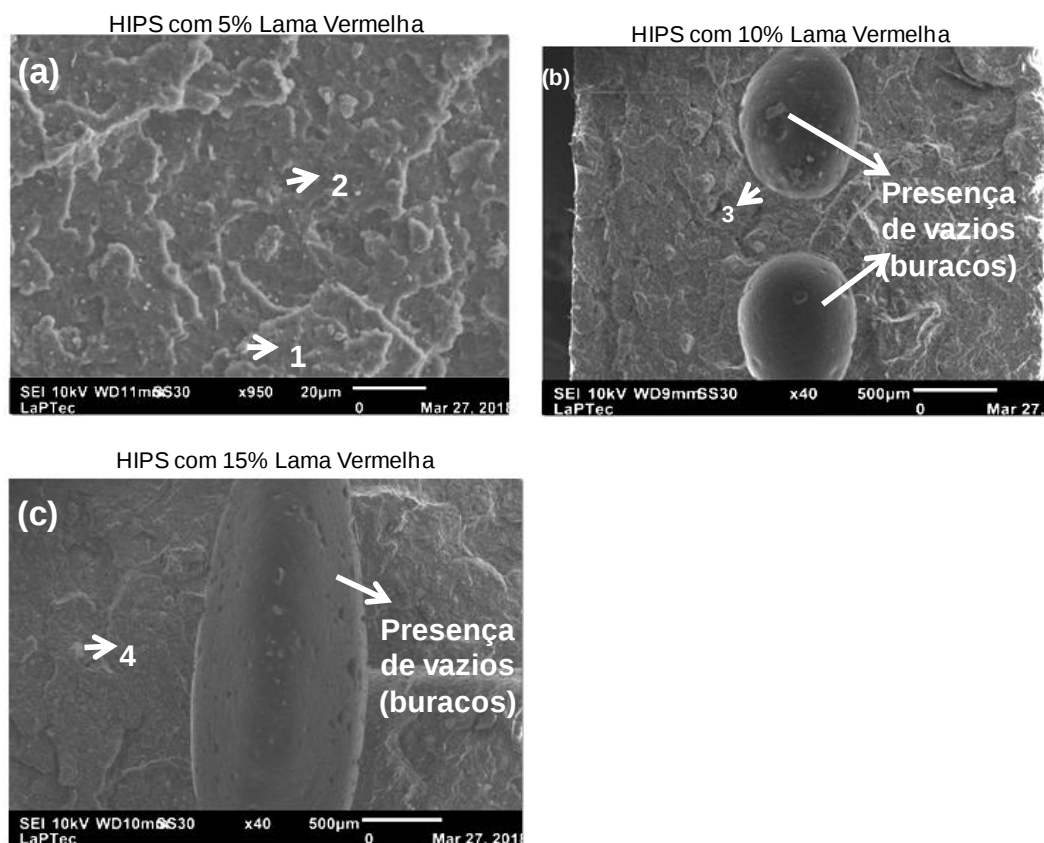
A Tabela 23 apresenta a composição dos elementos (%) obtida por EDS referente à micrografia da Figura 17 do HIPS reciclado.

Tabela 23 - Composição (%) átomos - Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS – HIPS reciclado

Incorporação	Figura	Pontos	Elementos (%)							
			C	Al	O	Ca	Ti	Fe	Mg	Si
HIPS pós consumo	17	1	93		5					2
HIPS pós consumo	17	2	100							
HIPS pós consumo	17	3	97	1	2					

A Figura 18 mostra a micrografia das incorporações exclusivamente com lama vermelha e a Tabela 24 apresenta a presença de elementos detectados na fluorescência de raio-X, item 5.1.2, Tabela 4, como alumínio (Al), ferro (Fe), silício (Si), titânio (Ti), entre outros.

Figura 18 - (a) Micrografia do HIPS com 5% Lama Vermelha a uma ampliação de 950 vezes; (b) Micrografia do HIPS com 10% Lama Vermelha a uma ampliação de 40 vezes e (c) Micrografia do HIPS com 15% Lama Vermelha a uma ampliação de 40 vezes



Fonte: O Autor (2018)

A Tabela 24 apresenta a composição dos elementos (%) referentes as micrografias das Figuras 18(a, b e c) do HIPS reciclado com carga de lama vermelha.

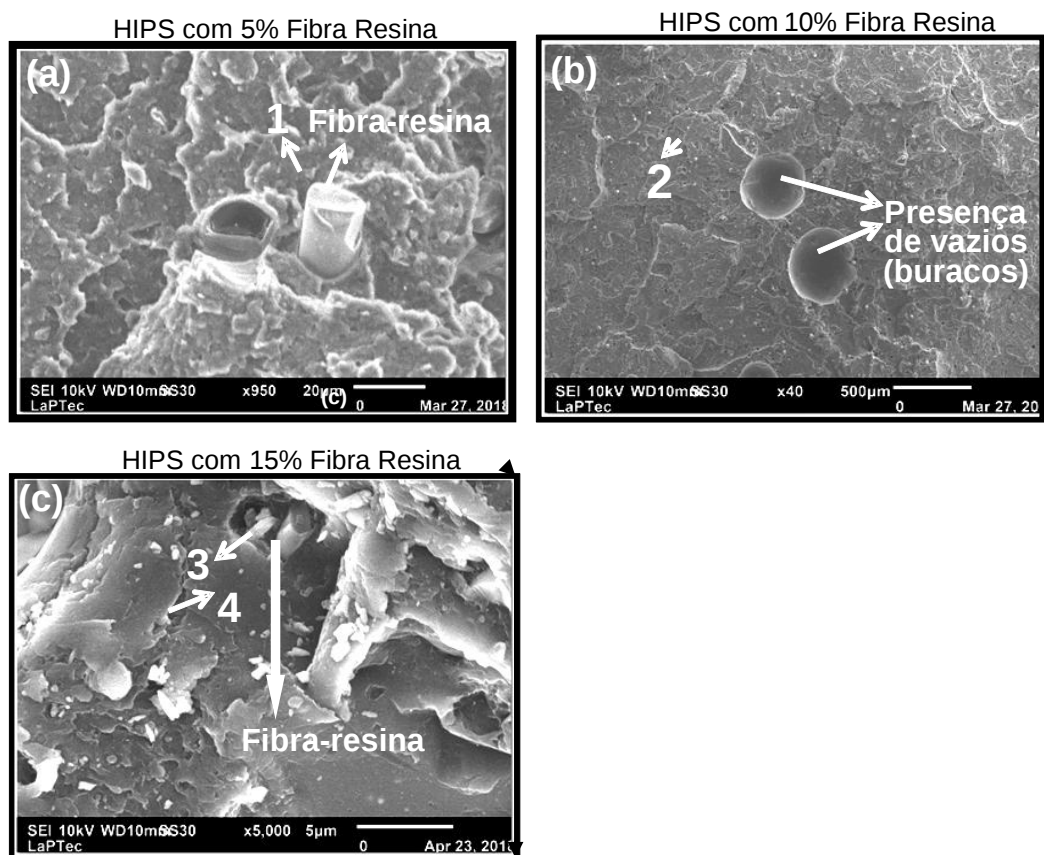
Tabela 24 - Composição (%) átomos - Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS – HIPS reciclado com carga de lama vermelha

Incorporação com Lama Vermelha	Figura	Pontos	Elementos (%)							
			C	Al	O	Ca	Ti	Fe	Mg	Si
HIPS com 5% Lama Vermelha	18a	1	72		3	4	9	18		
HIPS com 5% Lama Vermelha	18a	2	98	1					1	
HIPS com 10% Lama Vermelha	18b	3	51	1	27	8	12			1
HIPS com 15% Lama Vermelha	18c	4	88	1	11					1

Nos pontos internos dos vazios, existem somente os átomos de Carbono.

As Figuras 19 (a, b e c) mostram as micrografias das incorporações exclusivamente com fibra resina e a Tabela 25 constata a presença de alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si), confirmando que a fibra é do tipo S-glass., conforme relatado por MAY (1988).

Figura 19 – (a) Micrografia do HIPS com 5% Fibra Resina a uma ampliação de 950 vezes; (b) Micrografia do HIPS com 10% Fibra-Resina a uma ampliação de 40 vezes e (c) Micrografia do HIPS com 15% Fibra Resina a uma ampliação de 5000 vezes.



Fonte: O Autor (2018)

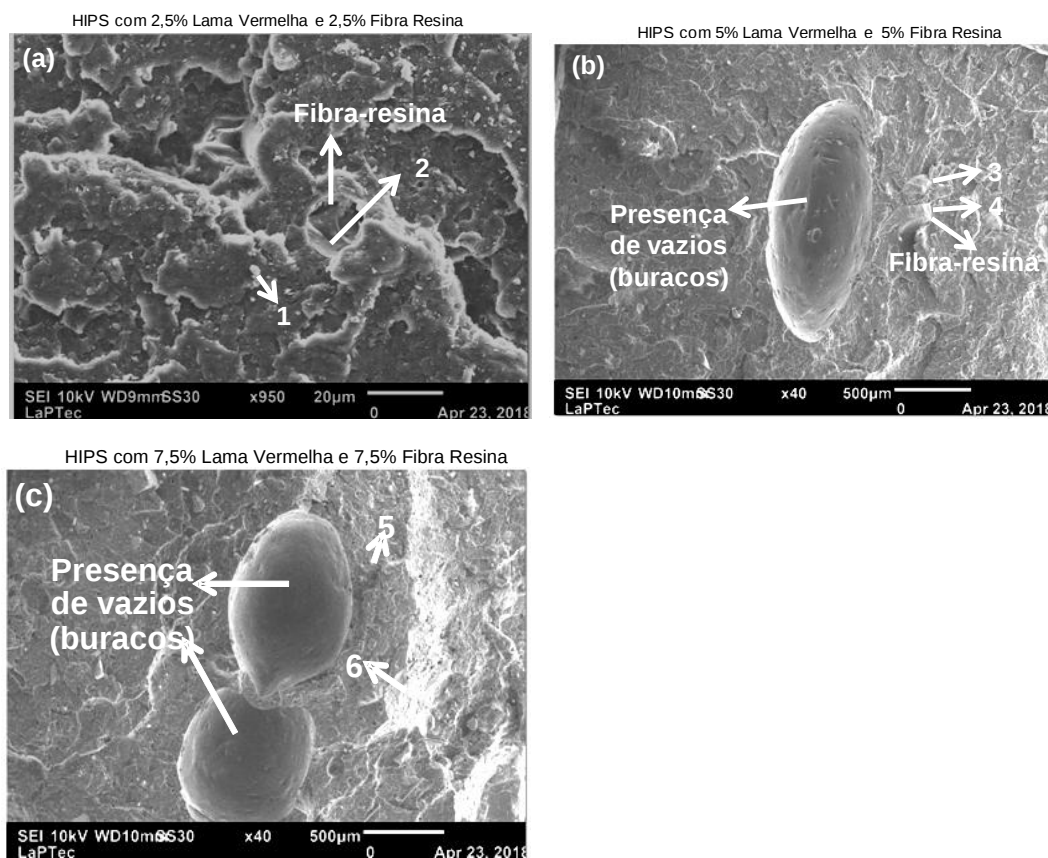
Tabela 25 - Composição (%) átomos - Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS – HIPS reciclado com carga de fibra resina

Incorporação com Fibra Resina	Figura	Pontos	Elementos (%)							
			C	Al	O	Ca	Ti	Fe	Mg	Si
HIPS com 5% Fibra Resina	19a	1	88	1	9	1	1			
HIPS com 10% Fibra Resina	19b	2	95	1	3	1				
HIPS com 15% Fibra Resina	19c	3	17	7	56	10			1	22
HIPS com 15% Fibra Resina	19c	4	88	1	11					1

Nos pontos internos dos vazios e na matriz dos compósitos existem praticamente somente átomos de carbono, relativos ao HIPS e à resina epóxi.

A Tabela 26 apresenta a composição dos elementos (%) referente a micrografia das Figuras 20 (a, b e c) do HIPS reciclado com cargas de lama vermelha e fibra resina.

Figura 20 - (a) Micrografia do HIPS com 2,5% Lama Vermelha e Fibra Resina a uma ampliação de 950; (b) Micrografia do HIPS com 5% Lama Vermelha e Fibra Resina a uma ampliação de 40 vezes e (c) Micrografia do HIPS com 7,5% Lama Vermelha e Fibra Resina a uma ampliação de 40 vezes.



Fonte: O Autor (2018)

Tabela 26 - Composição (%) átomos - Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS – HIPS reciclado com cargas de lama vermelha e fibra resina

Incorporação com Lama Vermelha + Fibra Resina	Figura	Pontos	Elementos (%)							
			C	Al	O	Ca	Ti	Fe	Mg	Si
HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	20a	1	23	1	59		5	12		
HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina	20a	2	96	1	3					
HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	20b	3	18		52		17	11		
HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina	20b	4	47	7	40	1		1		4
HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina	20c	5	90	1	9					
HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina	20c	6	89	1	10					

Nos pontos internos dos vazios, existem somente os átomos de Carbono.

Todas as imagens das micrografias, com exceção do HIPS pós consumo, ilustram que existem espaços vazios, ou seja, descontinuidades com relação a interface matriz-reforço, algumas Figuras (19a, 19c e 20a), revelam a falta de adesão na interface fibra de vidro/matriz (HIPS). Esses vazios podem influenciar nos resultados das propriedades mecânicas, trazendo desempenho inferior, em especial de propriedades relacionadas a impacto (item 5.4.2).

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi atingido, a incorporação de resíduos industriais em resíduo pós-consumo ocorreu com êxito. No caso, escolheu-se como resíduo pós-consumo o poliestireno de alto impacto HIPS de resíduos eletroeletrônicos e como resíduos industriais os resíduos de fabricação de pás eólicas e os de mineração de bauxita (lama vermelha).

Os resultados sugeriram que a incorporação dos resíduos afetam propriedades internas (por exemplo, T_g), de processo (índice de fluidez) e finais (tração e impacto). A formulação HIPS + 5% de lama mostrou resultados similares ao do HIPS puro para módulo de elasticidade e resistência à tração, embora a deformação no ponto de ruptura e resistência ao impacto tenham piorado, o que pode ter sido causado por descontinuidades na interface matriz-reforço. Essa formulação mostrou uma temperatura de transição vítrea T_g de 85 °C, um índice de fluidez dentro da faixa aceitável para o HIPS e teve uma incorporação considerada boa, observada por análise granulometria, item 5.1.1.

Foi possível concluir também que as incorporações de HIPS com 15% de fibra-resina superaram as propriedades mecânicas do HIPS reciclado sem carga quanto à resistência a tração e elasticidade. Ou seja, para aplicações em que se exija mais rigidez que o HIPS, essa formulação é mais adequada, apesar de sua menor resistência ao impacto e deformação no ponto de ruptura.

Em relação as amostras de lama vermelha através da fluorescência de raio-X verifica-se a concentração de sílica e portanto são hidrofílicas, o que ocasionou o aumento do índice de umidade. Para as incorporações do HIPS com 15% de lama vermelha (em gramas), o aumento foi extremamente significativo (8 vezes), em comparação ao HIPS pós-consumo (sem carga).

Para as incorporações contendo somente lama vermelha o prejuízo em termos de fluxo do polímero é o mesmo em todas as proporções (5%, 10% e 15%).

Os ensaios mecânicos de deformação no ponto de ruptura e de impacto apresentaram redução em todas as proporções (5%, 10% e 15%) e formulações propostas, ou seja, em ambos os resíduos industriais (lama vermelha e fibra de vidro/resina epóxi).

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao desenvolver esse projeto de pesquisa, outros possíveis estudos são propostos para melhorar a incorporação dos compósitos e suas propriedades internas, de processos e finais.

- Obtenção dos corpos de prova via moldagem por compressão.
- Preparo dos compósitos via moldagem por extrusão e por compressão, utilizando concentrações mássicas superiores a 15% dos resíduos da mineração (lama vermelha) e da fabricação das pás eólicas (fibra-resina).
- Preparo de compósitos usando acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), outro importante resíduo eletroeletrônico.
- Preparo de compósitos com resíduos menos rígidos, não necessariamente de resíduos eletroeletrônicos.
- Verificar as propriedades retardantes de chama.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABHILASH, P.C.; SINHA, S.; SINHA, M. K.; PANDEY, B. D. Extraction of lanthanum and cerium from Indian red mud. **International Journal of Mineral Processing**. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D256-10 - 2018, **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D570-98 - 2018, **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D638 - 2014, **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D1238 - 2013, **Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer**.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3171 – 2008 - **Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials**.

ARAÚJO, E.M.; ARAÚJO, K.D.; PEREIRA, O.D.; RIBEIRO, P.C.; MELO, T.J.A. Fiberglass Wastes/Polyester Resin Composites: Mechanical Properties and Water Sorption. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 16, nº 4, p. 332-335, 2006.

ARUMUNGA PRABU, V.; KALIRASU, S.; UTHAYAKUMAR, M.; MANIKANDAN, V. Processing and characterization of red mud filled sisal fibre reinforced polymer composite. **International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)**, 2012.

ARUMUNGA PRABU, V.; KALIRASU, S.; UTHAYAKUMAR, M.; MANIKANDAN, V. Investigation of the mechanical properties on red mud filled polyester banana composites using grey relational technique. **Materials Physics and Mechanics**, vol. 14, nº. 1, p.57-63, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM248** – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. 2006.

BACHTIAR, D.; MOHD, S.S.; EDISYAM, Z.; KHALINA, A.; KHAIRYL ZAMAN, H.J. Effects of Alkaline Treatment and Compatibilizing Agent on Tensile Properties of Sugar Palm Fibre Reinforced High Impact Polystyrene Composites. **BioResources**, v.6, n.4. p. 4815-4823, 2011.

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.

BALDÉ, C. P. *et al.* **The global e-waste monitor – 2014**. United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany. Disponível em: <<http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2018.

BARROS, A. S. **Estudo do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de pás eólicas**. Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos – SP, 2010.

BECKHOFF, B.; KANNGIEßER, B.; LANGHOOF, N.; WEDELL, R.; WOLFF, H. **Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis**. 1 ed. Berlin-London: Springer, 2006.

BEIGBEDER, J. *et al.* Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorted by high resolution near infrared devices. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 78, p. 105–114, set. 2013.

BENINI, K.C.C.; MULINARI, D.R.; VOORWALD, H.J.C.; CIOFFI, M.O.H. Chemical Modification Effecto on the Mechanical Properties of HIPS/Coconut Fiber Composites. **BioResources**, v. 5, n. 2, p. 1143-1155, 2010.

BENINI, K.C.C.C.; VOORWALD, H.J.C.; CIOFFI, M.O.H. Mechanical properties of HIPS/sugarcane bagasse fiber composites after accelerated weathering. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 3246–3251, 2011.

BHUTTA, M. K. S.; OMAR, A.; YANG, X. Electronic Waste: A Growing Concern in Today's Environment. **Economics Research International**, 2011.

BISWAS, S.; SATAPATHY. A Comparative Study on Erosion Characteristics of Red Mud Filled Bamboo-Epoxy and Glass-Epoxy Composites. **Journal of Materials and Design**, v. 31, n. 4, p. 1752-1767, 2010.

BORRELLY, D. F. **Estudo comparativo da degradação de poliestireno e de poliestireno de alto impacto por envelhecimentos natural e artificial**. Tese de Mestrado, USP, São Paulo – SP, 2002.

BRAHMS, T.; KÜHNE, U.; ALBERS, H.; GREINER, S. Feasibility Study for the Recycling of Composite Material (MaVeFa). **DEWEK Proceedings**, 2007.

BRASIL. **Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)** Brasília - DF, 2010.

BRENNAN, L. B.; ISAAC, D. H.; ARNOLD, J. C. Recycling of acrylonitrile–butadiene–styrene and high-impact polystyrene from waste computer equipment. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 86, nº 3, p. 572–578, 17 out. 2012.

CABLIK, V. Characterization and applications of red mud from bauxite processing. **Gospodarka Surowcami Mineralnymi**, vol. 23, n.4, 2007.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais** - uma introdução. 1th edição: LTC, 2002.

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

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros**, 3^a edição. São Paulo: Artliber Editora, 2010. 261 p.

CANEVAROLO, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**, 1^a edição. São Paulo: Artliber Editora, 2003.

CASTRO, C.D.P.C; DIAS, C.G.B.T.; FARIA, J.A.F. Production and Evaluation of recycled Polymers from Açaí Fibers. **Materials Research**, v. 13, n.2, p. 159-163, 2010.

COOLING, D. J., HAY, P. S. GUILFOYLE, L., 2002 apud SILVA FILHO, E. B. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. Revista Matéria. v. 12, nº 2, p. 322 – 338. 2007.

CONSTANTINO, V. R. L. *et al.* **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. Química. Nova, v. 25, nº. 3, p. 490-498, 2002.

CONSUL, Thiago Bueno. **Avaliação da utilização das argilas em poliestireno de alto impacto reciclado de equipamentos eletroeletrônicos (REEE)**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos Sorocaba, São Paulo, 2018.

COSTA, Deibson Silva. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. 2016. 228 f. Dissertação (Doutorado) – Curso em Engenharia de Recursos Naturais, Universidade de Federal do Pará, Belém, 2016.

COSTA, D.S. *et.al.* **Aproveitamento da lama vermelha e fibras vegetais (sisal e juta) em compósitos poliméricos** Congresso Brasileiro de Cerâmica. Águas de Lindoia, São Paulo, 2016.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. Editora Edgard Blucher Ltda., 2002.

CUNHA, E.J.S. **Desgomagem de feixes de fibras de curauá (*Ananas erectifolius* S.): Influencia das variáveis de processo na solubilidade do material péctico e nas propriedades mecânicas**. 1998, 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Pará, Belém.

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 isophthalix polyester. **International Comitee for the Study of Bauxite Alumina Aluminium – ICSOBA** (2012).

DE RESENDE, E. C. de *et al.* Synergistic co-processing of Red Mud waste from the Bayer process and a crude untreated waste stream from bio-diesel production. **Green Chem**, n. 15,p.496-510, 2013.

DASH, A.K.; THATOI, D.N.; SARANGI, M.K. Analysis of the mechanical characteristics of red mud filled hybridized composites. **Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering (FAME)**, p. 8-11, 2010.

DIAS, J.A. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos**.Universidade do Algarve. Faro. Portugal, 2004.

DJURIC, I.; MIHAJLOVIC, I; ZIVKOVIC, Z. Kinetic modeling of different bauxite types in Bayer leaching process. **Canadian Metallurgical Quarterly**, vol. 49, nº 3, p. 209-218, 2010.

EHRIG, R.J. **Plastics recycling**. Nova Iorque: Hnser Publishers, 1992.

ELSAYED, E., EL-SAYED, N.S.; NAGIEBB, Z.; ISMAEL, A. Characterization of Plastic Composite Based on HIPS Loaded with Bagasse. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 60, n. 6, p. 1101-1110, 2017.

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

GARCIA, A.; SPIM, J.; SANTOS, C. A. Ensaio dos materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247 p

GAY D., HOA S. V., TSAI S. W. Composite Materials: Design and Applications. Springer, 2003.

GELENCSE, A. *et al.* The red mud accident in Ajka (Hungary): Characterization and potential health effects of fugitive dust. **Environmental Science & Technology**, Veszprém, v. 45, p.1608-1615, 2011.

GONÇALVES, V. O. *et al.* **Iosipescu shear resistance in composites of carbon and glass fiber with epoxy resin**. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 1, n. 1, p. 49-53, 2011.

GRASSI, V.G.; Forte, M.M.C. e DAL PIZZOL, M.F.. **Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de Alto Impacto**. Polímeros: Ciência e Tecnologia. 2001, vol.11, nº 3. ISSN 1678-5169.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCCOTT, S.C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces**. p. 359–374. 1999.

JANKOVIC, B. et al. Thermal characterization and kinetic analysis of non-thermal decomposition process of Bauxite red mud: Estimation of density distribution function of the apparent activation energy. **International Journal of Mineral Processing**. p. 46-59.2013.

JENA, H.; SATAPHATY, A.K. Fabrication mechanical characterization and wear response of hybrid composites filed with red mud: an alumina plant waste. **Proceedings of International Conference on Advances in Mechanical Engineering**, 2011.

JÚNIOR, J. S.; JÚNIOR, N. B.; HEMKEMEIER, M. Aspectos ambientais da substituição de componentes em fibra de vidro por componentes e ABS (acrilonitrila butadieno estireno) em uma indústria de produção de carrocerias de ônibus. **Ciência & Engenharia**, v. 23, nº. 2, p. 33–38, 2014.

LA MANTIA, F.P. (ed.) **Handbook of plastics recycling**. Shawbury: Rapra Technology, 2002.

LIU, D.; WU, C. Stockpiling and comprehensive utilization of red research progress. **Materials**, vol. 5, nº 7, p. 1232-1246, 2012.

LIU, Y.; LIN, C.; WU, Y., 2007 apud LIU, Y.; NAIDU, R.; MING, H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. **Geoderma**. v. 163, p. 1–12. 2011.

LIU, Y.; NAIDU, R.; MING, H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. **Geoderma**. V. 163, p. 1–12. 2011.

MACÊDO, A. N. *et al.* **Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira**. Revista Materia, v. 16, n. 2, 2011.

MALLICK P.K. **Fiber-Reinforced Composites**: Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition (Dekker Mechanical Engineering), CRC Press, 2007.

MANO, E.B.; PACHECO, E.B.A.V. e BONELLI, C.M.C. **Meio ambiente, poluição e reciclagem**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MANO, E.B.; *et al.* Polyolefin composites with curaua fibres: Effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions. **Composites Science and Technology**, v. 70, p. 29-35, 2010.

MANRICH, S.; FRATTINI, G. e ROSALINI, A.C. **Identificação de plásticos: uma ferramenta para a reciclagem**. São Carlos: Ed. da UFSCar, 1997.

MARQUES, M.A.; BINI, M.V.; ANTUNES, M.L.P. Análise Através de Imagens de Raios X da Incorporação de Resíduos de Pás Eólicas em Cimento Portland. In: **55º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Anais, p. 2642-2652. Porto de Galinhas-PE, 2011.

MARTINHO, G. *et al.* Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1213–1217, 1 jun. 2012.

MAY, C. A. **Epoxy resins**. Marcel Dekker, Inc., 1988.

MELO, J. V. S. D. Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos. Tese de doutorado. Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 414. 2014.

NERY, Kellen Dias. **Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa**. 2013. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Curso em Geotécnica e Transportes; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NUNES, M. A. B. S. *et al.* Reprocessability of high impact polystyrene/clay nanocomposites in extrusion. **Polymer Degradation and Stability**, v. 125, p. 87–96, mar. 2016.

OLIVEIRA, F. H.; HELFER, A.L.; AMICO, S. C. Mechanical behavior of unidirectional curaua fiber and glass fiber composites. **Macromolecules Symposia**. Vol. 319, p. 83-89, 2012.

OLIVEIRA, M. JR. A. **Efeito da Adição de Lama Vermelha como carga nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster insaturado reforçando com fibra natural de curauá (*Ananas erectifolius*)**. 2013. 54f. Dissertação (Mestrado) – Curso em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

OLIVEIRA, M. JR. A.; CUNHA, E.J.S.; SOUZA, J.A.S.; NEGRÃO, E.M. Influence of the red mud content in mechanical properties of natural fiber-reinforced polymer composites. **Characterization of Minerals, Metals and Materials TMS** (The Minerals, Metals and Materials) 2013.

OLIVEIRA, Paulo Silas. **Caracterização do resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas e sua incorporação em argamassa de cimento Portland**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Curso em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2017.

PASCUCCI, S. *et al.* Using imaging spectroscopy to map red mud dust waste: The Podgorica Aluminum Complex case study. **Remote Sensing of Environment**. v. 123, p. 139–154. 2012.

PARRES, F.; CRESPO, J. E. Degradation of High-Impact Polystyrene with Processing and Its Recovery via the Addition of Styrene-Butadiene Rubber and Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene Block Copolymer. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 121, n. 1, p. 574–581, 5 jul. 2011.

PEREIRA, G.B.; PEREIRA, G.C., BENINI, K.C.C.C.; BANDEIRA, C.F. e MONTORO, S.R. Caracterização de Compósitos de Poliestireno de Alto Impacto

(HIPS) Reforçados com Fibras de Coco Verde para Eventual Aplicação na Indústria Automobilística. **Cadernos UNIFOA**, v. 12, n. 34, 2017.

PEREIRA, J. C. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. UFSC, 99 p., 2000.

PEETERS, J. R. *et al.* Closed loop recycling of plastics containing Flame Retardants. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 84, p. 35–43, mar. 2014.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**. p. 33-45. 2011.

PRABU, V.A.; KALIRASU, S.; UTHAYAKUMAR, M.; MANIKANDAN, V. Processing and characterization of red mud filled sisal fiber reinforced polymer composite. **International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)**, 2012.

PRABU, V.A.; KALIRASU, S.; UTHAYAKUMAR, M.; MANIKANDAN, V. Investigation of the mechanical properties on red mud filled polyester banana composites using grey relational technique. **Materials Physics and Mechanics**, vol. 14, n. 1, p.57-63, 2012.

PREFEITURA DE SOROCABA. Portal da Prefeitura. Disponível em HTTP: [//www.sorocaba.sp.gov.br/](http://www.sorocaba.sp.gov.br/). Acesso em 29 mai. 2016.

QUINHONES, Rogério. **Fabricação e qualificação de placas compostas de serragem e plástico reciclável**. 2007. 47 f. Dissertação (Mestrado) – Curso em Recursos Florestais, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

RADER, C.P; BALDWIN, S.L.; SADLER, G.D. e STOCKEL, R.F. (Ed.) **Plastics, Rubber and Paper Recycling: A Pragmatic Approach**. American Chemical Society, Washington, 1995.

RATH, Swagat S. *et al.* Statistical Modeling Studies of Iron Recovery from Red Mud Using Thermal Plasma. **Plasma Science and Technology**. p. 459-464. 2013.

RED MUD PROJECT. **Red Mud**. 2016. Disponível em: <<http://redmud.org/>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

ROVERE, J.; CORREA, C.A.; GRASSI, V.G e DAL PIZZOL, M.F.. **Caracterização morfológica do poliestireno de alto impacto (HIPS)**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 2008, vol.18, n.1, pp.12-19. ISSN 0104-1428.

SALES, Jorge Nascimento de. **Estudo do efeito da incorporação das argilas branca de cubati e closite NA nas propriedades do termoplástico acrilonitrila butadieno estireno submetido à radiação ionizante**. 2016. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2016.

SAMAL, S.; RAY, A. K.;, BANDOPADHYAY, A. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India — A review. **International Journal of Mineral Processing**. V. 118, p. 43–55. 2013.

SAMOUHOS, M. *et al.* Greek “red mud” residue: A study of microwave reductive roasting followed by magnetic separation for a metallic iron recovery process. **Journal of Hazardous Materials**. V. 254– 255, p. 193– 205. 2013.

SEADE - Portal de Estatísticas do Estado de São Paulo. Disponível em <https://www.seade.gov.br>. Acessado em 03 mar 2017.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Prentice Hall, 2008.

SILVA FILHO, E. B. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**. v. 12, n. 2, p. 322 – 338. 2007.

SILVA FILHO, E.B. *et al.* Estudo sobre a utilização da lama vermelha para a remoção de corantes em efluentes têxteis. **Química Nova**. p. 985-989. 2008.

SILVA FILHO, E.B.; ALVES, M.C.M; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, vol. 12, nº 2, p. 322-338, 2007.

SILVA, L.V.; ANGRIZANI, C.C.; SOUZA, J.R.; MEDEIROS, J.T.N. Use of polyester/glass-fiber residues as fillers for composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 124, n.1, 2012.

SINCTRONICS. Portal da empresa. Disponível em <http://www.sinctronics.com.br>. Acesso em 10 fev. 2017.

SINGH, N. *et al.* Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. **Composites Part B: Engineering**, 2016.

SOTTOVIA, Lívia. **Utilização de lama vermelha para oxidação eletrolítica assistida por plasma de liga de alumínio**. 2015. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2015.

SUSHIL, S., BATRA, V.S., 2008 apud LIU, Y.; NAIDU, R.; MING, H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. **Geoderma**. v. 163, p. 1–12. 2011.

TAMOTIA, S. K. Management of Red Mud. **Processing of Fines**. 2000.

TAURINO, R.; POZZI, P.; ZANASI, T. Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling. **Waste Management**, v. 30, n. 12, p. 2601–2607, dez. 2010.

TOUBIA, Carim Miguel. **Estudo sobre as possibilidades de recuperação de resíduos provenientes da fabricação de pás eólicas**. 2011. 151 f. Dissertação

(Mestrado) – Curso em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2011.

VASILIEV, V.; MOROZOV, E.; **Mechanics and Analysis of Composite Materials**. 8th edition, Elsevier Science, 2001, 424p.

VALÉRIO, Paula Rhunke. **Avaliação de Impactos Ambientais de Equipamentos Eletrônicos Através de Inventário dos Materiais Usados na Fabricação**. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2014.

VIANNA, W. L., CORREA, C. A., RAZZINO, C. A. **Efeitos do tipo de poliestireno de alto impacto nas propriedades de compósitos termoplásticos com farinha de resíduo de madeira**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 14, n. 5, p. 339-348, 2004.

VOTORANTIM METAIS. Portal da empresa. Disponível em <http://www.vmetais.com.br>. Acesso em 30 mai. 2016.

WANG, R.; XU, Z. Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. **Waste Management**, v. 34, n. 8, p. 1455–1469, ago. 2014.

WANG, Yunlong *et al.* Influence of treating frequency on microstructure and properties of Al₂O₃ coating on 304 stainless steel by cathodic plasma electrolytic deposition. **Applied Surface Science**. p. 8836-8840. 2009.

WIEBECK, H. e PIVA, A.M. **Reciclagem do Plástico**. São Paulo: Art Líber, 2005.

WOBLEN WINDPOWER INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Portal da empresa. Disponível em <http://www.wobben.com.br>. Acesso em 01 jun. 2016.

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. Portal da Associação. Disponível em <http://www.wwindea.org/home/index.php>. Acesso em 01 jun. 2016.

ZANIN, M. & MANCINI, S.D. **Resíduos Plásticos e Reciclagem: Aspectos Gerais e Tecnologia**. São Carlos: Editora da UFSCar, 2004.

ZHANG, Y.; QU, Y.; WU, S., 2001 apud LIU, Y.; NAIDU, R.; MING, H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. **Geoderma**. v. 163, p. 1–12. 2011

9 APÊNDICE

9.1 Apêndice A

Resultados das massas dos cadinhos e amostras do HIPS com os resíduos da lama vermelha e eólico, assim como os valores de massas obtidas em cada pesagem do material após o aquecimento em mufla.

Massas dos cadinhos, amostras e do HIPS com 5% lama vermelha em todas as pesagens.

Amostra	Massa (g)					
	Cadinhos	HIPS com 5% Lama Vermelha	Cadinho + Amostra	1ªMedição	2ªMedição	3ªMedição
1	75,5878	1,0038	76,5916	75,6314	75,6309	75,6306
2	71,7190	1,0052	72,7242	71,7634	71,7630	71,7629
3	75,8038	1,0019	76,8057	75,8462	75,8456	75,8453

Massas dos cadinhos, amostras e do HIPS com 10% lama vermelha em todas as pesagens.

Amostra	Massa (g)					
	Cadinhos	HIPS com 10% Lama Vermelha	Cadinho + Amostra	1ªMedição	2ªMedição	3ªMedição
1	84,4172	1,0206	85,4378	84,5066	84,5051	84,5036
2	75,5946	1,0046	76,5992	75,6868	75,6856	75,6844
3	75,8093	1,0120	76,8213	75,9056	75,9038	75,9020

Massas dos cadinhos, amostras e do HIPS com 15% lama vermelha em todas as pesagens.

Amostra	Massa (g)					
	Cadinhos	HIPS com 15% Lama Vermelha	Cadinho + Amostra	1ªMedição	2ªMedição	3ªMedição
1	77,3797	1,0167	78,3964	77,5212	77,5193	77,5174
2	92,7719	1,0045	93,7764	92,9137	92,9120	92,9103
3	71,7266	1,0308	72,7574	71,8760	71,8746	71,8732

Massas dos cadinhos, amostras e do HIPS com 5% fibra resina em todas as pesagens.

Amostra	Massa (g)					
	Cadinhos	HIPS com 5% Fibra Resina	Cadinho + Amostra	1ªMedição	2ªMedição	3ªMedição
1	87,0741	1,0239	88,0980	87,1118	87,1104	87,1090
2	76,5569	1,0239	77,5808	76,5965	76,5957	76,5931
3	77,5758	1,0358	78,6116	77,6177	77,6165	77,6149

Massas dos cadinhos, amostras e do HIPS com 10% fibra resina em todas as pesagens.

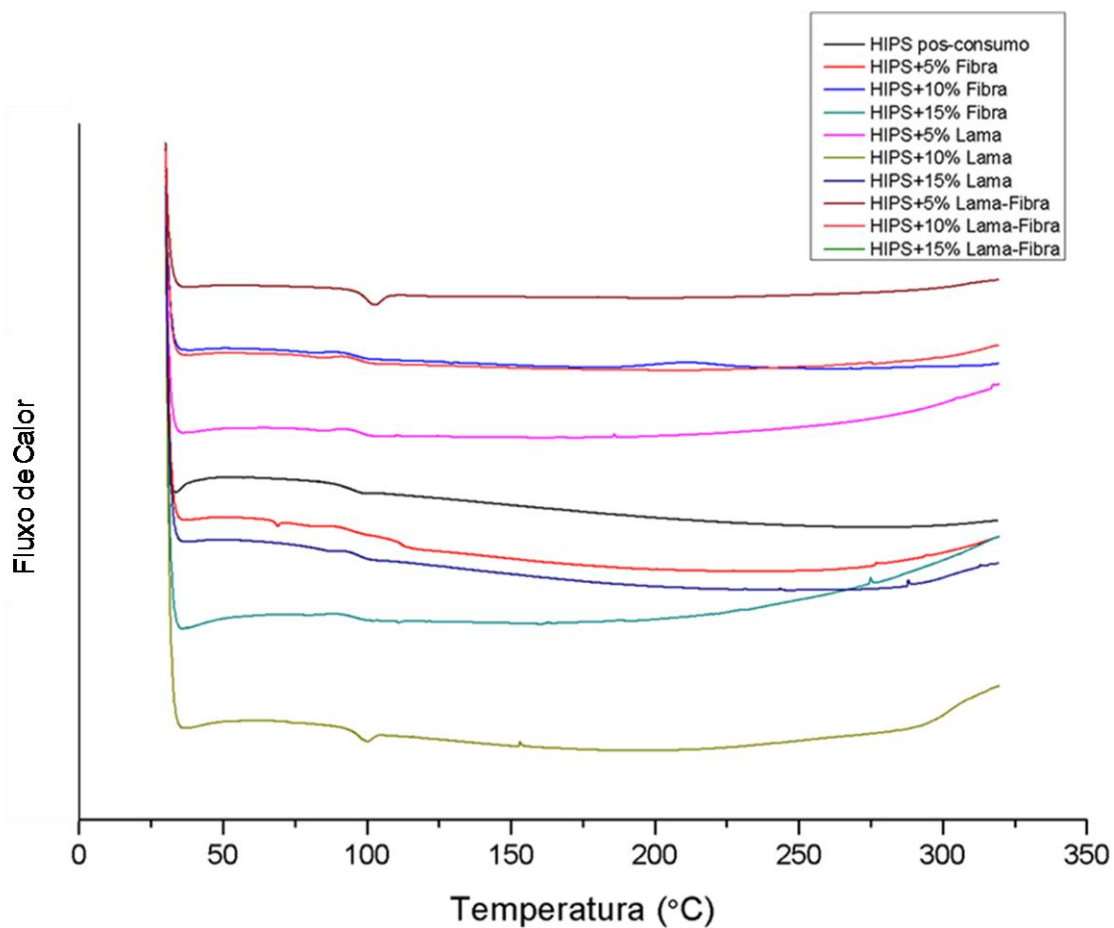
Amostra	Massa (g)					
	Cadinhos	HIPS com 10% Fibra Resina	Cadinho + Amostra	1ªMedição	2ªMedição	3ªMedição
1	84,4160	1,0313	85,4473	84,5051	84,5043	84,5040
2	75,5925	1,0017	76,5942	75,6744	75,6732	75,6736
3	71,7241	1,0527	72,7768	71,8108	71,8099	71,8090

Massas dos cadinhos, amostras e do HIPS com 15% fibra resina em todas as pesagens.

Amostra	Massa (g)					
	Cadinhos	HIPS com 15% Fibra Resina	Cadinho + Amostra	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição
1	75,8080	1,0097	76,8177	75,9202	75,9189	75,9182
2	77,3766	1,0133	78,3899	77,5000	77,4991	77,4980
3	92,7725	1,0377	93,8102	92,8946	92,8932	92,8926

9.2 Apêndice B

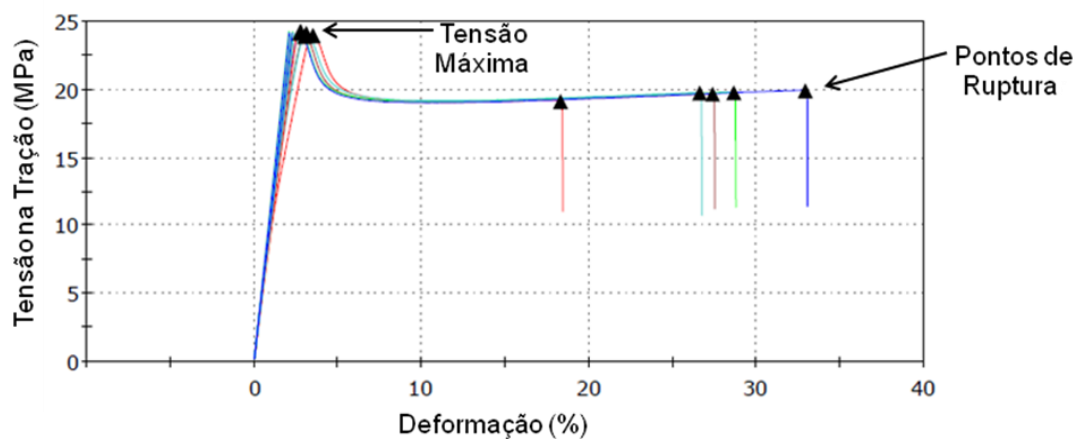
Gráfico das análises térmicas de calorimetria exploratória diferencial do HIPS reciclado (com e sem cargas).



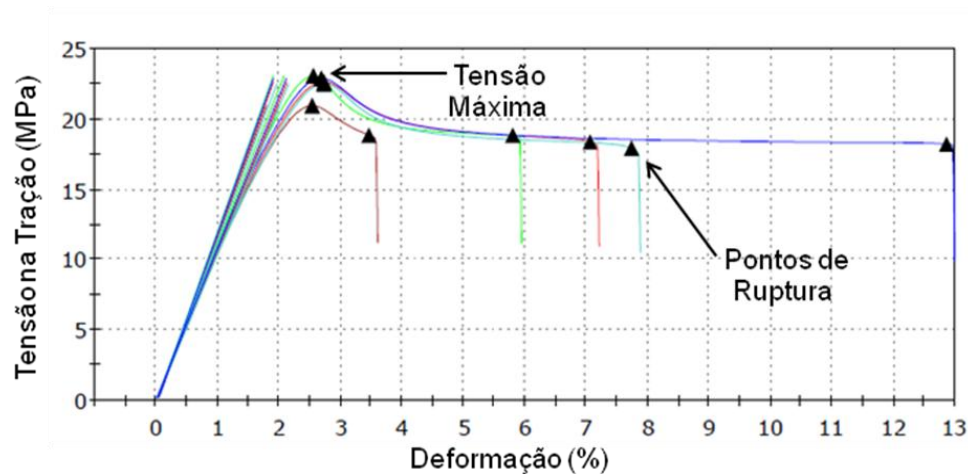
9.3 Apêndice C

Resultados dos ensaios de tração para as incorporações com os resíduos da mineração e da fabricação das pás eólicas.

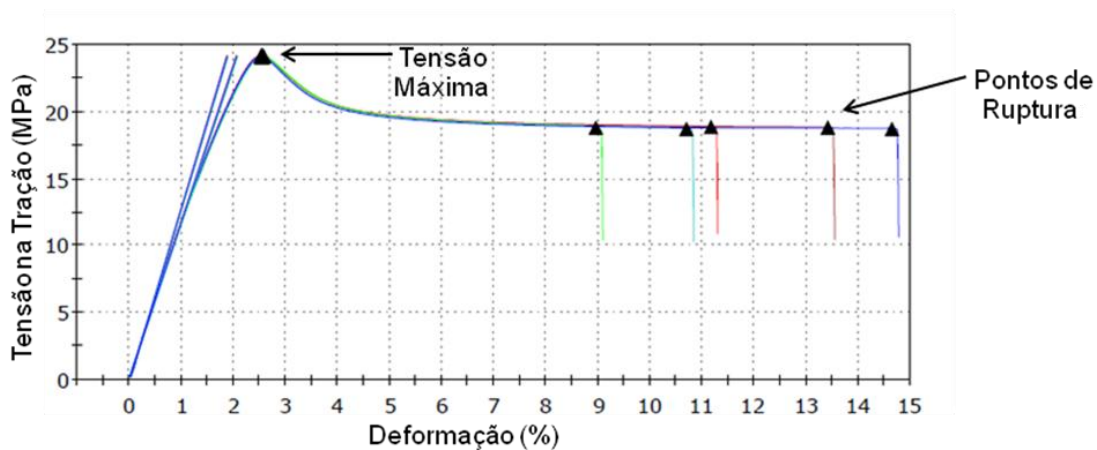
Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 5% Lama Vermelha



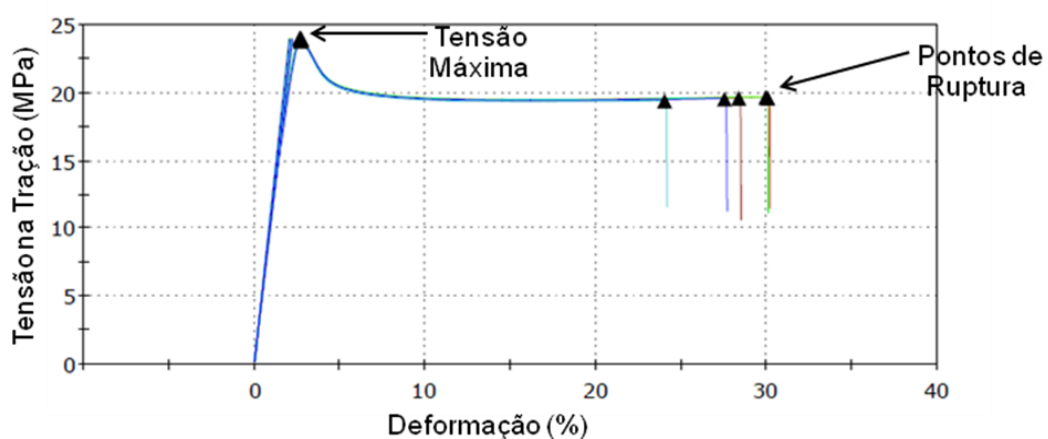
Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 10% Lama Vermelha



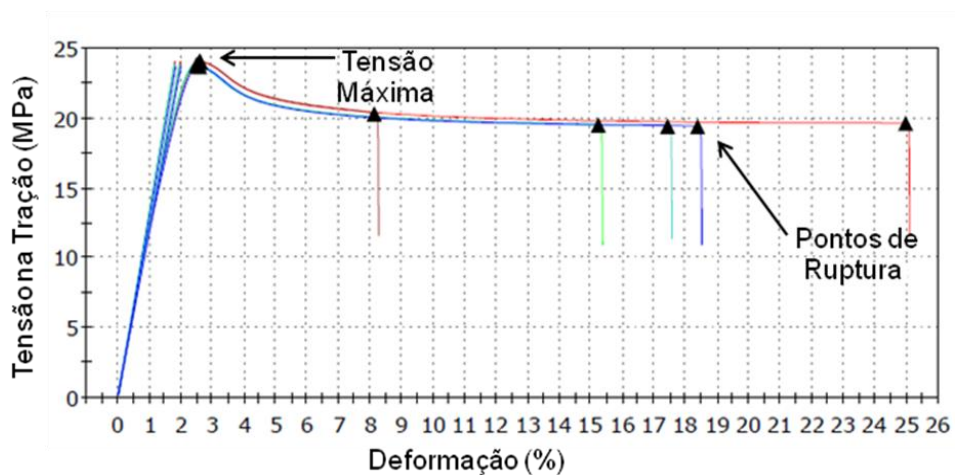
Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 15% Lama Vermelha



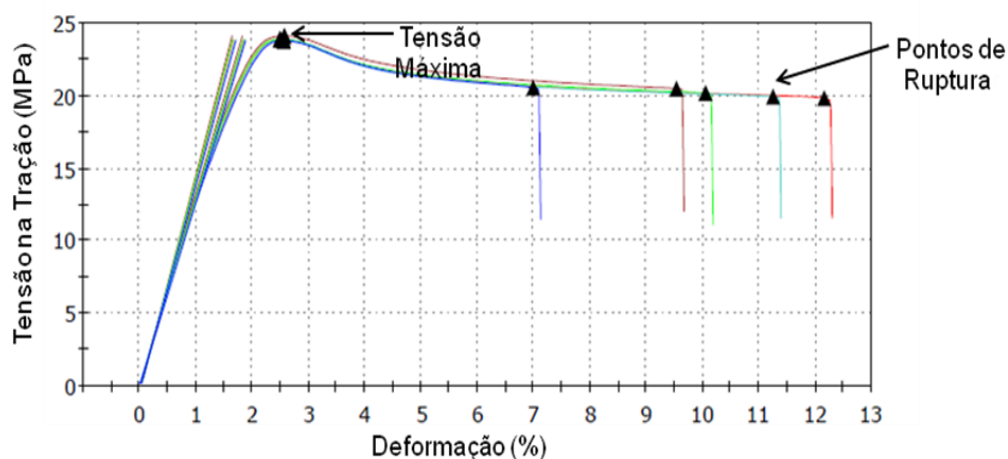
Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 5% Fibra Resina



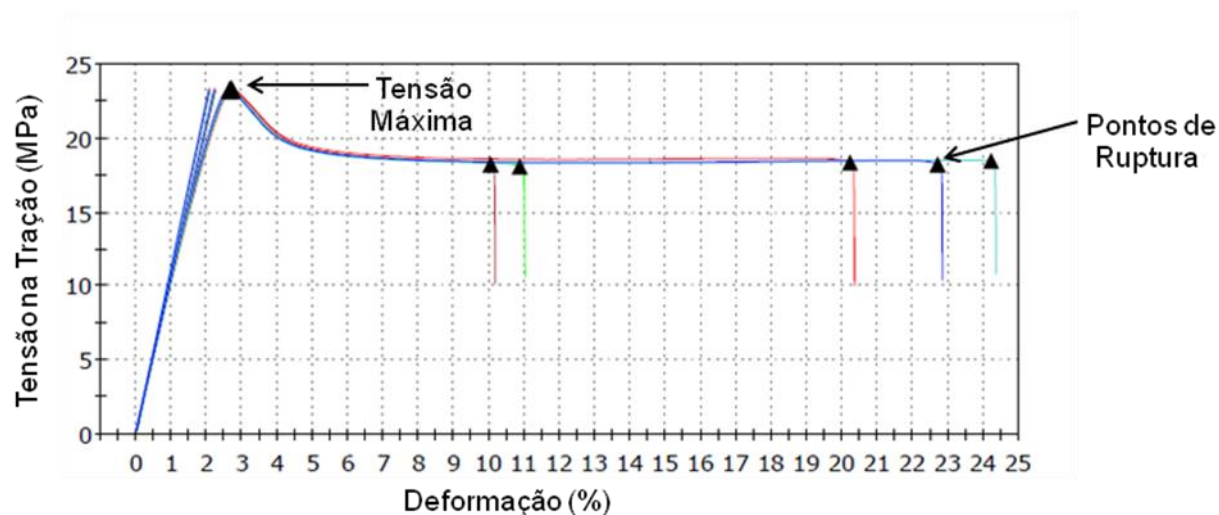
Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 10% Fibra-Resina



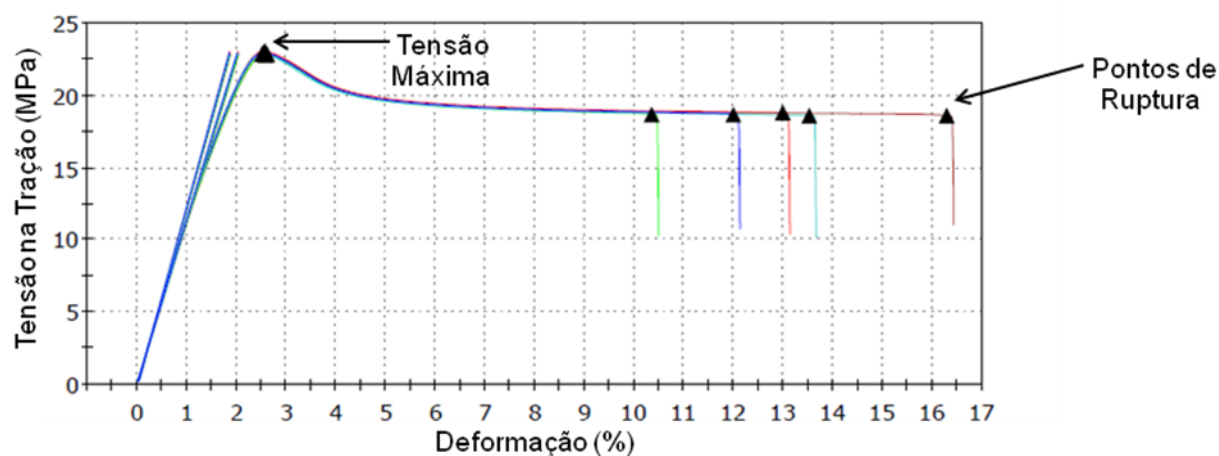
Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 15% Fibra Resina



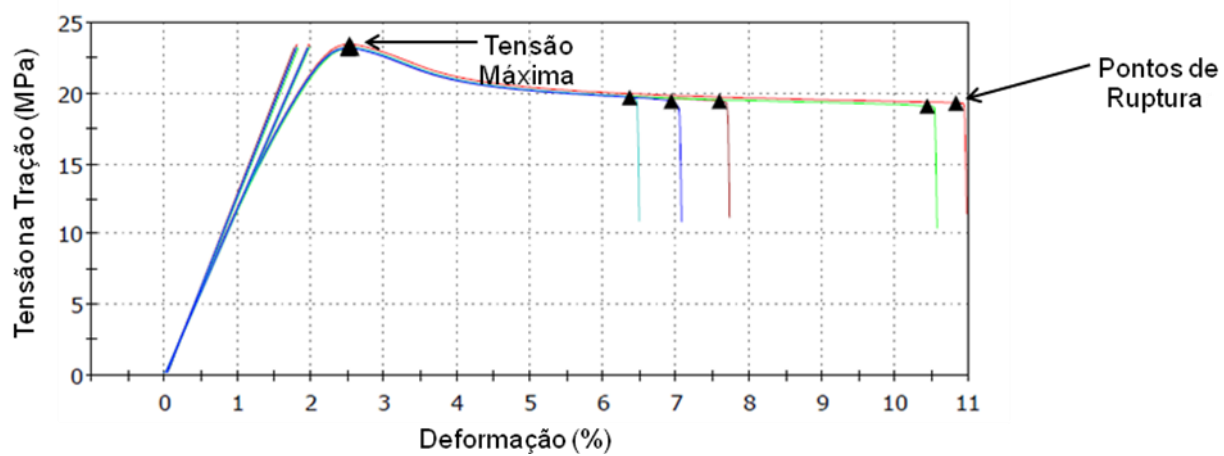
Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 2,5% Lama Vermelha e 2,5% Fibra Resina



Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 5% Lama Vermelha e 5% Fibra Resina



Resultado do ensaio de tração para a incorporação HIPS com 7,5% Lama Vermelha e 7,5% Fibra Resina



[illegible]

