

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PROCESSOS E TECNOLOGIAS**

**REAPROVEITAMENTO DA MADEIRA TRATADA COM ARSENIATO**  
**DE COBRE CROMATADO E ISOLADOR ELÉTRICO CERÂMICO**  
**PARA PRODUÇÃO DE COMPÓSITO POLIMÉRICO**

**Jhonattas Muniz de Souza**

Caxias do Sul, 2016

**Jhonattas Muniz de Souza**

**REAPROVEITAMENTO DA MADEIRA TRATADA COM ARSENIATO  
DE COBRE CROMATADO E ISOLADOR ELÉTRICO CERÂMICO  
PARA PRODUÇÃO DE COMPÓSITO POLIMÉRICO**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos, orientado por Prof. Dr. Ademir José Zattera e coorientado por Profa. Dra. Aline Dettmer.

Caxias do Sul, 2016.

S729r Souza, Jhonattas Muniz de

Reaproveitamento da madeira tratada com arseniato de cobre cromatado e isolador elétrico cerâmico para produção de compósito polimérico / Jhonattas Muniz de Souza. – 2016.

105 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2016.

Orientação: Ademir José Zattera.

Coorientação: Aline Dettmer.

1. resíduos sólidos. 2. resíduos perigosos. 3. reciclagem. 4. compósito polimérico. 5. sustentabilidade. I. Zattera, Ademir José, orient. II. Dettmer, Aline, coorient. III. Título.

**Jhonattas Muniz de Souza**

**REAPROVEITAMENTO DA MADEIRA TRATADA COM ARSENIATO  
DE COBRE CROMATADO E ISOLADOR ELÉTRICO CERÂMICO  
PARA PRODUÇÃO DE COMPÓSITO POLIMÉRICO**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos, orientado por Prof. Dr. Ademir José Zattera e coorientado por Profa. Dra. Aline Dettmer.

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24 DE JUNHO DE 2016.**

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ademir José Zattera

Coorientadora: \_\_\_\_\_

Profa. Dra. Aline Dettmer

Banca Examinadora:

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Ruth Marlene Campomanes Santana  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ UFGRS

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Rosmary Nichele Brandalise  
Universidade de Caxias do Sul/UCS

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Ana Maria Coulon Grisa  
Universidade de Caxias do Sul/UCS

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por permitir e me capacitar para a realização dessa etapa da minha vida.

Ao Prof. Dr. Ademir José Zattera e Profa. Dra. Aline Dettmer, pela orientação, amizade e dedicação no decorrer deste trabalho.

À minha Mãe Judite Muniz de Souza que sempre foi a maior incentivadora dos meus estudos, apoio incondicional na minha vida. Às minhas irmãs Débora e Priscila pelo companheirismo, auxílios e apoio às minhas escolhas além de sempre acreditar em mim.

A todos os professores do PGEPROTEC e UCS que contribuíram direta ou indiretamente para essa formação.

Aos meus amigos mestrandos (“parças” do PGEPROTEC) e doutorandos, pela parceria nos momentos de depressão, de motivação, descontração e pelas excelentes jantas.

Ao bolsista Gustavo Caberlon, pela parceria, auxílio em todas as etapas desse projeto e também pelos vários momentos de descontração.

Aos técnicos do LPol Jorge Gomes, Damiane Büdke e Aline Gheller pelo auxílio nas etapas de processamento e análise dos materiais.

Ao Ministério do Trabalho e Emprego - MTE e Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL, pelo financiamento da bolsa de mestrado.

E à Universidade de Caxias do Sul e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias – PGEPROTEC.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS .....	16
3.1.1 Resíduos de redes de distribuição de energia elétrica .....	17
3.2 COMPÓSITOS .....	24
3.2.1 Fase matriz de Polietileno .....	26
3.2.2 Fase dispersa em Compósitos .....	28
3.2.3 Agente de acoplamento .....	30
3.3 COMPÓSITOS DE MADEIRA PLÁSTICA COM MADEIRA TRATADA COM CCA E RIP .....	31
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
4.1 MATERIAIS .....	34
4.2 MÉTODOS .....	35
4.2.1 Preparação das matérias-primas .....	36
4.2.2 Planejamento experimental da formulação do compósito .....	37
4.2.3 Processo de Extrusão e Injeção dos compósitos .....	38
4.2.4 Fluxograma das etapas de processamento do compósito .....	38
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS .....	39
4.3.1 Teor de umidade .....	39
4.3.2 Análise granulométrica .....	39
4.3.3 Densidade aparente .....	39
4.3.4 Microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo .....	40
4.3.5 Análise termogravimétrica .....	40
4.3.6 Análise de infravermelho por transformada de Fourier .....	41
4.3.7 Análise de elementos químicos na madeira de poste tratado com CCA e no isolador elétrico cerâmico .....	41
4.4 CARACTERIZAÇÕES DO COMPÓSITO .....	41
4.4.1 Ensaios mecânicos de tração, e flexão e impacto .....	41
4.4.2 Microscopia eletrônica de varredura de emissão de campo .....	42
4.4.3 Análises térmicas .....	42

4.4.4	Análise de infravermelho por transformada de Fourier .....	43
4.4.5	Ensaio físicos .....	43
4.4.6	Ensaio de Envelhecimento acelerado simulado em câmara com lâmpadas UV .....	45
4.4.7	Caracterização e avaliação conforme NBR 10.004/04 .....	46
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
5.1	PROPRIEDADES DA MATÉRIA-PRIMA .....	47
5.1.1	Teor de umidade .....	47
5.1.2	Análise Granulométrica .....	48
5.1.3	Densidade aparente dos reforços .....	49
5.1.4	Análise morfológica dos reforços .....	50
5.1.5	Análise termogravimétrica .....	51
5.1.6	Análise de infravermelho por transformada de Fourier .....	52
5.1.7	Análise química do pó de madeira do poste tratado com CCA e do pó de isolador elétrico cerâmico .....	55
5.2	FORMULAÇÃO DO COMPÓSITO .....	56
5.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS .....	59
5.4	ANÁLISE MORFOLÓGICA .....	64
5.5	PROPRIEDADES TÉRMICAS DO COMPÓSITO .....	70
5.5.1	Calorimetria diferencial de varredura .....	70
5.5.2	Análise termogravimétrica do compósito .....	72
5.5.3	Temperatura de deflexão térmica .....	74
5.5.4	Análise Termo Dinâmico-Mecânico .....	75
5.6	ANÁLISE DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER DO COMPÓSITO .....	78
5.7	PROPRIEDADES FÍSICAS .....	80
5.7.1	Teor de umidade e Densidade .....	80
5.7.2	Absorção de água .....	80
5.8	ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO .....	82
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade dos principais resíduos gerados em oito EAs, o custo total do resíduo e relação equivalente custo/unidade de resíduos (CPFL, 2014 e RGE, 2014).....	18
Tabela 2. Classificação dos isoladores cerâmicos quanto a composição de acordo com a IEC 60672-3/10 (IEC, 2010).....	23
Tabela 3. Parâmetros dos fatores utilizados para a realização dos ensaios .....	37
Tabela 4. Teor de umidade das matérias-primas .....	47
Tabela 5. Densidade das matérias-primas .....	50
Tabela 6. Resultados do ensaio da análise química para quantificar os elementos químicos (As, Cu e Cr) na amostra de madeira.....	55
Tabela 7. Composição química dos RIP por espectrometria por fluorescência de raios X (% mássica de óxidos).....	56
Tabela 8. Matriz de experimentos e variáveis respostas do planejamento fatorial $2^2$ .....	57
Tabela 9. Valores de cristalinidade, entalpia e temperatura de fusão para o PEAD e o compósito CP/20M/20RIP.....	71
Tabela 10. Valores da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), determinado pelo módulo de perda, do PEAD e Compósito antes e após 3024 h de envelhecimento .....	77
Tabela 11. Propriedades físicas do compósito.....	80
Tabela 12. Resultados da análise do extrato obtido no ensaio de lixiviação conforme ABNT NBR 10.005/04 e comparação ao limite máximo permitido segundo anexo F da NBR 10.004/04 .....	82
Tabela 13. Resultados da análise do extrato obtido no ensaio de solubilização conforme ABNT NBR 10.006/04 e comparação ao limite máximo permitido segundo anexo F da NBR 10.004/04 .....	83

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1. Input para o planejamento experimental da formulação ótima do compósito.....	38
Quadro 2. Bandas de absorção e suas atribuições dos espectros das matérias-primas.....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação da evolução da importância relativa dos diversos materiais e projeção até 2020 (Caetano, 2014).....	26
Figura 2. Representação da classificação dos compósitos (Callister Jr e Rethwish, 2010). ....	28
Figura 3. Ilustração da interação do PEagMA entre a fases do compósito com fibra natural (Araújo; Waldman; De Paoli, 2008, adaptado) .....	30
Figura 4. Postes de madeira tratado com CCA pós-uso nas estações avançadas.....	34
Figura 5. Resíduos de isoladores elétricos cerâmicos nas estações avançadas. ....	35
Figura 6. Metodologia utilizada para produção do compósito polimérico reforçado com resíduo de madeira tratada com CCA e pó de RIP .....	35
Figura 7. Processo de cominuição do poste de madeira.....	36
Figura 8. Processo de cominuição dos isoladores elétricos cerâmicos.....	36
Figura 9. Fluxograma do processamento para obtenção do material compósito de PEAD com pó de madeira de postes tratados com CCA e isoladores elétricos cerâmicos. ....	38
Figura 10. Distribuição granulométrica do resíduo de madeira tratada com CCA (a) e pó de RIP (b). ....	48
Figura 11. Micrografia do pó da madeira tratada com CCA, (a) com 110x, (b) 1.000x e (c) 4.000x de ampliação .....	50
Figura 12. Micrografia do pó de RIP, (a) 1.000x, (b) 4.000x e (c) 10.000x de ampliação .....	50
Figura 13. Curvas termogravimétricas (a) e DTG (b) do pó da madeira, pó de RIP e PEAD. ....	51
Figura 14. Espectros de FTIR do PEAD, PEADgMA, madeira tratada com CCA e RIP.....	52
Figura 15. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resistência à flexão.....	57
Figura 16. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a tração.....	58
Figura 17. Superfície de resposta para a variável resistência à tração .....	59
Figura 18. Resultados da resistência à flexão do PEAD e compósito CP/20M/20RIP antes e após o envelhecimento acelerado. ....	60
Figura 19. Módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de resistência à flexão antes e após o envelhecimento acelerado.....	61
Figura 20. Resultado da resistência à tração do PEAD e compósito CP/20M/20RIP antes e após o envelhecimento acelerado. ....	62
Figura 21. Módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de resistência à tração antes e após o envelhecimento acelerado.....	63
Figura 22. Resultado da resistência ao impacto antes e após o envelhecimento acelerado do PEAD e compósito. ....	64
Figura 23. Micrografia por MEV-FEG da fratura do compósito com (a) ampliação 150x , (b) e (c) ampliação 2.000x, (d) ampliação 4.000 x, (e) interface partícula de madeira/matriz com ampliação de 10.000x e (f) partícula de RIP/matriz com ampliação de 10.000x.....	66
Figura 24. Micrografia por MEV-FEG da superfície das amostras de PEAD e compósito antes e após 1008 h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV; ampliação de 150x e 1.000x. ....	68

Figura 25. Micrografia por MEV-FEG da superfície das amostras de PEAD e compósito com 1344, 2184 e 3024 h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV e ampliação de ampliação 150x e ampliação 1.000x.....	69
Figura 26. Fotografias da superfície do PEAD com 0, 336, 772, 1008, 1344, 2184 e 3024 h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV. ....	70
Figura 27. Fotografias da superfície do compósito CP/20M/20RIP com 0, 336, 772, 1008, 1344, 2184 e 3024 h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV.....	70
Figura 28. Análise termogravimétrica do compósito CP/20M/20RIP antes e após o envelhecimento acelerado em câmara UV. ....	72
Figura 29. Curvas termogravimétricas derivada do compósito CP/20M/20RIP antes e após o envelhecimento acelerado em câmara UV. ....	73
Figura 30. Temperatura de deflexão térmica das amostras de PEAD e compósito CP/20M/20RIP antes e após o ensaio de envelhecimento em câmara UV. ....	74
Figura 31. Módulo de armazenamento do PEAD e do compósito antes e após 3024 h no ensaio de em câmara de envelhecimento UV.....	75
Figura 32. Módulo de perda das amostras de PEAD e do compósito antes e após 3024 h no ensaio de em câmara de envelhecimento UV.....	77
Figura 33. Tan delta das amostras de PEAD e do compósito antes e após 3024 h no ensaio de em câmara de envelhecimento UV.....	78
Figura 34. Espectros no infravermelho da face do compósito após 0, 336, 772, 1008, 1344, 2184 e 3024 h de envelhecimento acelerado.....	79
Figura 35. Resultado da absorção de água para amostra de PEAD e compósito.....	81

## RESUMO

O reaproveitamento de materiais tem sido um tema de grande interesse devido à elevada quantidade de resíduos gerados nas mais diversas atividades. Resíduos de postes de madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA) e isoladores elétricos cerâmicos (RIP) são materiais passíveis de reutilização para a produção de madeira plástica. Tais resíduos são gerados principalmente a partir da manutenção de redes de distribuição de energia elétrica. Neste trabalho, foi avaliado o reaproveitamento destes resíduos como agentes de reforços em compósito com matriz de polietileno de alta densidade (PEAD). A madeira tratada foi moída em moinho de facas e os RIP foram moídos em um moinho de bolas. Para a obtenção dos corpos de prova, o PEAD, o agente de reforço e o PEAD graftizado com anidrido maleico (PEADgMA) como agente de acoplamento foram processados em uma extrusora duplarrosca e moldados por injeção. Foi realizado um planejamento experimental  $2^k$  para avaliar a influência dos fatores controláveis sobre as variáveis respostas (resistência à flexão e à tração) e assim, identificar a composição da formulação ótima para a obtenção do compósito. Após a identificação da formulação ótima, o planejamento experimental foi validado e foram avaliadas as propriedades mecânicas, morfológicas, térmicas, químicas, reológicas e físicas do compósito. Foram realizados ensaios de lixiviação segundo NBR 10.005/04 e solubilização segundo NBR 10.006/04, para classificar e propor possíveis aplicações para os compósitos obtidos. A adição de 20 % m/m de cada reforço à matriz proporcionou um aumento superior à 50 % na resistência à flexão e tração quando comparado ao PEAD puro. Através das micrografias foi possível identificar a interação entre as fases. As análises térmicas evidenciaram que a adição dos reforços promoveu a conservação das propriedades mecânicas do compósito num intervalo de temperatura superior ao do PEAD. As análises químicas permitiram identificar os grupos orgânicos inerentes a cada matéria-prima na composição do compósito e as alterações devido à degradação provocada pela exposição ao envelhecimento acelerado em câmara UV. A lixiviação apresentou concentrações de As, Cu, Cr e Pb inferiores aos limites permitidos pela legislação, mesmo após 3.024 h de ensaio de envelhecimento, classificando o resíduo do compósito como resíduo classe II – Não Perigoso. Devido à boa molhabilidade da matriz aos reforços, o compósito apresentou baixa absorção de água, baixa densidade e baixo teor umidade. O envelhecimento acelerado apresentou pequenas variações das propriedades do compósito, ao contrário do PEAD, que apresentou fortes reduções em todas as suas propriedades. Dessa forma, produzir compósitos torna-se uma alternativa de reaproveitamento desses resíduos, com destaque para aplicações no setor elétrico, na construção civil e arquitetura, entre outros setores, além de fomentar a gestão de resíduos e reduzir o impacto ambiental.

**Palavras-chave:** resíduos sólidos, resíduos perigosos, arseniato de cobre cromatado (CCA), reciclagem, compósito polimérico.

## ABSTRACT

The reuse of materials is a topic of great interest due to the high amount of waste generated in various activities. Waste of treated wooden poles with chromated copper arsenate (CCA) and ceramic electrical insulators (RIP) are materials that could be re-used to manufacturing plastic timber. Such wastes are mainly generated from the maintenance of electricity distribution networks. In this work was studied the possibility of reusing this waste reinforcements agents for composites with high density polyethylene matrix (HDPE). The wood was ground in a knife mill and the RIP were ground in a ball mill. To obtain the specimens, HDPE, reinforcing agent and coupling agent were processed in a twin screen extruder and molded by injection. A  $2^k$  experimental design was developed to evaluate the influence of controllable factors on the response variables (flexural and tensile strength) and thus identify the optimal formulation composition to obtain the composite. After identifying the optimal formulation, the experimental design was validated and the mechanical, morphological, thermal, chemical, rheological and physical properties of the composite material were evaluated. In addition, leaching and solubilization tests were carried out to classify and evaluate possible applications for these composites. The addition of 20% of each strengthening in the matrix gave an increase up to 50% in the flexural and tensile strength compared to the pure HDPE. The micrographs corroborate with the results of mechanical properties, and it was possible to identify the interaction between the phases. The thermal analysis showed that the addition of reinforcements promoted the conservation of the mechanical properties of the composite in a higher temperature range than the HDPE. The chemical analyzes have identified the organic groups attached to each raw material in the composite composition and the changes due to degradation caused by exposure to accelerated aging in UV chamber. The leaching showed concentrations of As, Cu, Cr and Pb below the limits allowed by legislation, even after 3,024 hours of aging test, classifying the composite waste as non-dangerous, II-A class. Due to good matrix wettability to the reinforcements, the composite had low water absorption, low density and low moisture content. The accelerated aging showed small variations on the composite properties, unlike HDPE, which showed strong reductions in all its properties. Thus, to produce composites becomes an alternative to reuse these wastes, especially for applications in the energy sector, construction, architecture, and other industries, and promote waste management and reduce environmental impact.

**Keywords:** solid waste, hazardous waste, chromated copper arsenate (CCA), recycling, polymeric composites.

## 1 INTRODUÇÃO

Os postes de madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA) e os isoladores elétricos cerâmicos (RIP) após removidos das redes de distribuição de energia elétrica integram o grupo de resíduos que possibilita diversas formas de reaproveitamento. Esses resíduos são originados nas unidades de fabricação, na logística de distribuição, substituição de peças obsoletas, e a maioria provém da manutenção de redes de distribuição de energia elétrica (CAMPOS, 2011; CPFL, 2014; RGE; 2014).

No ano de 2014, no Brasil, foram geradas 78,6 milhões toneladas de resíduos sólidos, aproximadamente 379 kg/hab.ano e deste total 2,9 milhões toneladas são classificados como Classe I - Resíduos Perigosos. Numa concessionária de distribuição de energia elétrica, localizada na região nordeste do Rio Grande do Sul, os principais resíduos em 2014 foram, respectivamente, os materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos e lignocelulósicos. Dentre os quais, os cerâmicos somam um total de 16.678 unidades/ano e os lignocelulósicos 195mil<sup>3</sup>/ano. Em torno de 50% do material lignocelulósico é classificado como resíduo perigoso (ANUNCIAÇÃO, 2013; RGE; 2014).

Uma das alternativas de reaproveitamento desses materiais é incorporando-os como reforços em compósitos poliméricos, dessa forma deixam de ser resíduos, tornando-se matéria-prima para outros produtos. Essa ação resulta em fornecer a sociedade materiais compósitos com propriedades de aplicações práticas, além de alternativa aos compósitos com fibras sintéticas, e se enquadrar aos princípios e objetivos da Lei 12.305/10, que dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010; KU, *et al.*, 2011; KORONIS *et al.*, 2013; SANJAV *et al.*, 2015; SONG *et al.*, 2015; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

Os compósitos produzidos com fibras naturais estão cada vez mais em voga no mercado consumidor, principalmente para aplicações nas indústrias automotivas, na arquitetura e construção civil. Essa inserção direta no mercado está relacionada com as vantagens que apresentam em relação às fibras sintéticas, como baixa densidade, baixo custo, menor toxicidade, menor abrasão, ampla disponibilidade, redução do gasto energético e facilidade de início da degradação biológica (LA MANTIA; MORREALE, 2011; GURUNATHAN; MOHANTY; NAYAK, 2015; SANJAV *et al.*, 2015; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

A madeira de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) dos postes de redes de distribuição de energia elétrica apresenta excelentes propriedades mesmo após sua vida útil para várias aplicações. Integrantes do grupo de resíduos lignocelulósicos proporcionam aos compósitos poliméricos melhorias nas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional. Ainda devido ao uso de CCA na madeira para sua preservação, confere resistência à fungos, xilófagos e térmitas (FREITAS, 2002; VIDOR, 2011; ABRUZZI *et al.*, 2012; BORGES e MORESCHI, 2013).

Os RIP apresentam as características dos materiais cerâmicos, quando presentes em compósitos poliméricos, proporcionam aumento do módulo elástico, maior estabilidade térmica e dureza. Segundo Campos (2011) é gerado um passivo nacional anual de 25.000 t.

Neste trabalho, foram produzidos compósitos poliméricos com a incorporação de resíduos de madeira de postes tratados com CCA e do RIP na matriz de PEAD, utilizando PEADgMA como agente de acoplamento.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Reaproveitar resíduos de postes de madeira tratada com CCA e resíduos de isolador elétrico cerâmico moído, provenientes de redes de distribuição de energia elétrica, para desenvolvimento de compósito com PEAD.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Avaliar a influência da concentração de pó de madeira nas propriedades mecânicas do compósito;
- b) Avaliar a influência da concentração de pó de RIP nas propriedades mecânicas do compósito;
- c) Avaliar o efeito da incorporação de ambos os resíduos nas características físicas, térmicas, químicas, reológicas e morfológicas do compósito;
- d) Investigar a mudança nas propriedades do PEAD e do compósito após 3.024 h em irradiação ultravioleta (UVb);
- e) Propor classificação segundo NBR 10.004/04 do compósito desenvolvido, considerando-o um resíduo, em relação ao seu potencial de toxicidade.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos são decorrentes das diversas atividades, sejam industriais, representados por resíduos de processos e de operações de controle de poluição ou descontaminação, sejam domiciliares, como os orgânicos e recicláveis ou de atividades rurais, os resíduos agrossilvopastoris. Entre os resíduos industriais, há os perigosos, aproximadamente 40% do total de resíduos sólidos, necessitando de tratamento específico devido ao seu alto grau de impacto ambiental e à saúde (TOCCHETTO, 2009; IPEA, 2011).

Há 20 anos ou mais, políticas para o gerenciamento de resíduos têm sido discutidas em nível nacional e internacional. Por apresentar uma demanda ambiental complexa, houve a necessidade de envolvimento do governo, da sociedade civil de forma organizada e da iniciativa privada, para a apresentação de medidas de redução da degradação do meio ambiente causada pela atividade humana (FREIRE e LOPES, 2013; MOREIRA, 2013; MOHEE *et al.*, 2015).

Com o decreto da Lei 12.305/10, que trata da PNRS, em vigor desde agosto de 2010, emerge o conceito de responsabilidade compartilhada, na qual a sociedade como um todo passou a ser responsável pela gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos. Conforme o decreto, o cidadão é responsável não só pela disposição correta dos resíduos que gera, mas também é importante que repense e reveja o seu papel como consumidor. Por outro lado, o setor privado fica responsável pelo gerenciamento ambientalmente correto dos resíduos sólidos, pela sua reincorporação na cadeia produtiva e pelas inovações nos produtos que tragam benefícios socioambientais, sempre que possível. Os governos federal, estaduais e municipais são responsáveis por elaborar e implementar os planos de gestão de resíduos sólidos, assim como dos demais instrumentos previstos na PNRS (BRASIL, 2010; MOREIRA, 2013).

A PNRS norteou a área de gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil. Em seu Art. I, dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

Com isso surge uma nova denotação de resíduos e rejeito. Resíduos são materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultante de atividades humanas em sociedade que apresentam potencial de reaproveitamento ou reciclagem. Rejeitos são resíduos sólidos que,

depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010; VALLE, 2012).

A gestão eficiente dos resíduos sólidos pode agregar valor comercial a esses materiais, possibilitando que sejam utilizados como novas matérias-primas ou novos insumos, complementando o ciclo de vida dos produtos (BARBIERI, 2007; VALLE, 2012; MOHEE *et al.*, 2015; RONG *et al.*, 2015).

Dessa forma o gerenciamento de resíduos resulta em aspectos positivos no meio ambiente e econômico, pois além de reduzir a exploração dos recursos naturais, possibilita novos empreendimentos, cumprindo com os objetivos da PNRS e minimizando os impactos ambientais provocados pela disposição inadequada.

### 3.1.1 Resíduos de redes de distribuição de energia elétrica

A gestão de descarte de materiais de uma concessionária de distribuição de energia elétrica é um processo contínuo e crescente, devido ao aumento do volume gerado, à diversificação de itens, à diversidade tecnológica dos materiais envolvidos, e aos requisitos socioambientais impostos à empresa.

Os resíduos gerados nas empresas de distribuição de energia elétrica são provenientes da fabricação, logística e manutenção de redes e postes. Todos apresentam potencial econômico para reciclagem e os principais resíduos são agrupados em materiais metálicos, lignocelulósicos, cerâmicos e poliméricos (RGE, 2014).

A quantidade de resíduos gerados por uma concessionária de energia elétrica é apresentada na Tabela 1. As informações são referentes ao estudo de acompanhamento de resíduos nas Estações Avançadas (EA), no período de janeiro de 2011 a maio de 2012, sendo que 8 ETs receberam resíduos de uma empresa da região nordeste do Rio Grande do Sul. O material que apresentou maior valor econômico foi o metálico, seguido do material cerâmico e dos materiais poliméricos e lignocelulósicos.

**Tabela 1.** Quantidade dos principais resíduos gerados em oito EAs, o custo total do resíduo e relação equivalente custo/unidade de resíduos (CPFL, 2014 e RGE, 2014).

<b>Natureza do material</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor (R\$)</b>	<b>R\$/unidade</b>
Metálicos	2.974.515,55	4.613.699,78	1,55
Lignocelulósicos	141.286,75	519.074,57	3,67
Cerâmicos	436.681,87	961.065,80	2,20
Poliméricos	196.514,04	591.930,76	3,01
<b>Total</b>	<b>3.748.998,21</b>	<b>6.685.770,91</b>	<b>1,78</b>

Segundo os autores, são retiradas 35 t.mês<sup>-1</sup> de materiais provenientes de redes de distribuição de energia elétrica. No período deste estudo, foram recolhidas mais de 16.650 peças produzidas com madeira tratada (CPFL, 2012; RGE, 2014; JUNGES, 2015).

Os materiais metálicos são uma classe de resíduos que apresentam maior valor agregado e maior volume, e atualmente as empresas têm uma logística reversa desenvolvida. Tais materiais são partes de carcaças de transformadores, fios, dispositivos de fixação, ferragens de postes de concretos, cabos, entre outros.

Os resíduos poliméricos são destinados a centrais de reciclagem onde ocorre a segregação e comercialização dos mesmos. A maior parte desses materiais são embalagens de peças e equipamentos adquiridos pela empresa.

Os materiais cerâmicos podem ser direcionados para fábricas de cerâmicas como matéria-prima para novos produtos. Apesar de existir essa possibilidade de destinação, a logística é dificultada por causa das distâncias entre as unidades geradoras e as fábricas, logo esses materiais são dispostos em aterros industriais, como resíduo Classe IIB – não perigoso. A principal fonte desse resíduo é advinda dos isoladores elétricos cerâmicos que são substituídos nas manutenções das redes e também os resíduos de postes de concreto (XU *et al.*, 2015).

Na categoria lignocelulósicos, incluem-se os postes de madeira, cruzetas, carretéis, *pallets* e resíduos de podas de árvores. A madeira de postes e cruzetas é tratada quimicamente, sendo considerado um resíduo Classe I - perigoso pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Norma Brasileira – NBR 10.004/04, logo, o reaproveitamento adequado se torna fundamental (CPFL, 2014; RGE, 2014).

A madeira que não possui tratamento químico possui maior aplicação por não ter restrição quanto aos seus constituintes. Dessa forma encaminha-se para queima em caldeiras, indústrias de coprocessamento, moagem para confecção de painéis e móveis, uso em

estruturas de construção, arquitetura e design, dentre outros (BRIDGWATER, 2012; NAFAJI, 2013; GÜLTEKIN; ÇAYLI; ESEN, 2015).

### 3.1.1.1 Postes de madeira com preservantes à base de arseniato de cobre cromatado

A deterioração de postes de madeira foi a motivação para o desenvolvimento de técnicas para evitar ou retardar a degradação da madeira. Dessa forma, iniciaram-se as pesquisas para produzir um produto para este fim, denominado preservante químico de madeira em várias formulações (GERALDO, 2003; SHEBANI *et al.*, 2008; VIVIAN *et al.*, 2012).

A madeira tratada contribui para a diminuição do uso de florestas nativas, sendo uma opção de qualidade às madeiras de lei, tendo baixo consumo energético por tonelada de madeira e excelente relação peso *versus* resistência. Além disso, o cultivo do eucalipto contribui para um meio ambiente mais limpo, pois realiza a fotossíntese e consome toneladas de dióxido de carbono da atmosfera, além de fornecer oxigênio (VIVIAN *et al.*, 2012; VIDAL *et al.*, 2015).

Para o tratamento químico da madeira existem diversos processos e opções de preservantes, sendo a maioria deles óleos solúveis e hidrossolúveis. O hidrossolúvel é um dos mais empregados, consiste numa solução composta por vários sais e óxidos que possuem ação inseticida e pesticida. O CCA é um dos preservantes mais empregados no Brasil, Estados Unidos, Austrália. Os elementos em sua formulação estão presentes nas formas de óxidos e possuem concentrações variadas. A escolha do tipo de CCA é dependente da aplicação da madeira e segue a norma NBR 16.143/13. (HINGSTON *et al.*, 2001; SALES, 2003; MAYES, 2008; JANIN *et al.*, 2009; FERRARINI *et al.*, 2012; PAES *et al.*, 2012; VIVIAN *et al.*, 2012; VIDAL *et al.*, 2015).

Segundo o Anuário Estatístico da ABRAF (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas), 2012 existem, aproximadamente, 300 usinas para tratamento de preservação de madeira, distribuídas predominantemente nas regiões Sul e Sudeste. Tais indústrias possuem uma capacidade instalada de produção anual de 2,0 milhões de m<sup>3</sup> de madeira tratada, embora a produção anual do setor corresponda a 1,5 milhões de m<sup>3</sup>. Segundo Silva (2006) e Bertolini (2011), estima-se que no Brasil, anualmente, de 15 a 20% do volume produzido de madeira tratada com preservantes tornam-se resíduos.

O processo de tratamento consiste na inserção da madeira em uma autoclave, realizando a aplicação de vácuo a fim de esvaziar as células vegetais. Após o vácuo inunda-se

a câmara com uma solução de CCA. É aplicada uma alta pressão no interior da autoclave para que haja a impregnação da solução em todo volume da madeira, preenchendo o espaço vazio com o preservante. Para finalizar, reaplica-se o vácuo para remover o excesso de CCA e para expor a madeira ao ar, afim de secá-la e reduzir os riscos aos seres humanos (BAILEY, 2003; SALES, 2003; VIDOR, 2011; FERRARINI *et al.*, 2012; SCHNEID *et al.*, 2013).

Após o tratamento, a durabilidade da madeira pode ser de até 25 anos, antes de iniciar o processo de decomposição. Por este lado, esse processo mostra-se como uma alternativa viável, mas quando considera a questão de saúde pública e meio ambiente, ainda há questionamentos (VIDOR, 2011; GRESS *et al.*, 2014). Os componentes da solução de CCA possuem elevada toxicidade, e há restrições referentes ao processo de lixiviação e volatilização que a madeira tratada pode sofrer, gerando riscos de contaminação do homem e da natureza. Além dos riscos ambientais e ocupacionais durante o processo de produção (SILVA, 2008; FERRARINI *et al.*, 2012).

Dispor os resíduos de madeira tratada com CCA, gerados após sua vida útil, tornou-se um grande desafio. No Brasil a NBR 10.004/04 classifica este resíduo como Classe I – Perigosos (JANIN *et al.*, 2011; VIDOR, 2011; FERRARINI *et al.*, 2012).

Segundo Ferrarini (2012), em 2004, países como a Suécia e Dinamarca proibiram o uso de madeira tratada com CCA em aplicações para usos domiciliares. Segundo Moreschi (2003), nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA), declarou em 2003 que as indústrias decidiram, voluntariamente, não mais empregar madeira tratada com CCA para objetos de uso residencial, devido ao alto risco de contato com os seres humanos, não havendo restrições quanto ao emprego do produto para fins rurais e industriais. Na Alemanha, o arsênio foi substituído pelo boro, pois apresenta baixa toxicidade, embora ofereça riscos após o tratamento, pois pode lixiviar da madeira em contato com a umidade (CARRER, 2013). Na Austrália, a partir de 2005, o uso do CCA tornou-se mais restrito, impondo um sistema de autorização para regular a produção e limitar o uso (MAYES, 2008).

O Brasil é um dos países que mais utilizam madeira tratada com CCA (BERTOLINI *et al.*, 2012; FERRARINI *et al.*, 2012), e apesar disso não existem muitos estudos sobre a classificação e o impacto dos resíduos gerados no final da vida útil (FERRARINI *et al.*, 2016). As indústrias que geram resíduos de madeira tratada com CCA, devem encaminhar os mesmos para aterros industriais, porém, parte destes resíduos (constituídos principalmente por postes, moirões, *decks*) ainda são descartados de forma inadequada, sem rastreabilidade. As empresas que tratam madeiras com preservantes orientam para que a madeira tratada não seja queimada em churrasqueiras, lareiras, fornos de comida ou aquecedores residenciais. Quando

queimada, a madeira tratada pode desprender produtos tóxicos na fumaça e nas cinzas. Apesar dessas orientações há relatos de mal-estar, internações e óbitos de pessoas após exposição à fumaça da queima dessa madeira (SOLO-GABRIELE e TOWNSEND, 1999; SILVA, 2006; SIMÕES, 2008; CRQ 13ª Região, 2012; CARRER, 2013; OHGAMI *et al.*, 2015).

Existem alguns estudos que utilizaram resíduos de madeira contaminada com CCA, os quais propuseram como forma de tratamento a recuperação dos metais por processos de extração química, biológica e da eletrólise, além dos processos termoquímicos, como a pirólise e gaseificação (DUBEVA; TOWNSEND; SOLO-GABRIELE, 2008; JANIN *et al.*, 2011; BRIDGWATER, 2012; KINATA *et al.*, 2012; KARTAL *et al.*, 2014; JUNGES, 2015).

Kamdem *et al.* (2004) estudaram a viabilidade de incorporar farinha de madeira de pinho vermelho, tratada com CCA, retirado de serviço depois de 21 anos de utilização e madeira de pinho virgem com PEAD virgem e reciclado na proporção de 50/50 em massa. Os materiais foram misturados manualmente e moldados por compressão, e avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos. A amostra que continha farinha de madeira tratada exibiu resistência à flexão superior a de farinha de pinho virgem e as amostras apresentaram aumento no coeficiente térmico, atribuindo à presença do cromo e arsênio na superfície da madeira tratada com CCA. A resistência à degradação biológica aumentou devido às propriedades fungicidas dos elementos químicos presentes na amostra. O tratamento de CCA na superfície da madeira tornou-a mais hidrofóbica, reduzindo a incompatibilidade entre a madeira e termoplástico, possibilitando uma melhor adesão entre partículas tratadas e a matriz polimérica.

Zimmermann & Zattera (2013) avaliaram o potencial de reciclagem de resíduos gerados nas redes de distribuição de energia, postes de madeira tratada com CCA e isoladores cerâmicos. Os postes de madeira com CCA foram cortados, triturados e descontaminados com lixiviação ácida usando  $\text{H}_2\text{SO}_4$  nas concentrações de 0,2 e 0,4 mol.L<sup>-1</sup>, em triplicata, a 70 °C e os isoladores de cerâmica foram fragmentados. Os resíduos foram misturados com PEAD (30% em massa de resíduos), processados em uma extrusora duplarrosca e moldados por injeção. Foram avaliadas as propriedades mecânicas, físicas, térmica e morfológica dos compósitos. A amostra da madeira que foi lixiviada com solução de 0,2 mol.L<sup>-1</sup>  $\text{H}_2\text{SO}_4$  apresentou os melhores resultados, devido à remoção do preservante da superfície da madeira. Para resistência à flexão e tração houve um aumento de, aproximadamente, 100% e 40%, respectivamente, quando comparado ao polímero puro. O isolador elétrico cerâmico proporcionou ao compósito maior estabilidade térmica e maior resistência ao impacto.

Bertolini *et al.* (2014) desenvolveu painéis de partículas, avaliando o efeito da adição de resíduos de *Pinus* sp. tratado com CCA, em associação com material da mesma espécie sem preservantes, além de alterações no teor de adesivo poliuretano à base de mamona. A adição da madeira tratada com CCA contribuiu na redução da taxa de absorção de água no compósito, obtendo uma espessura estável em 2h, conforme norma ASTM D 570/98, sendo a redução atribuída a hidrofobicidade da madeira tratada e boa adesão na interface. A tensão de ruptura e o módulo de elasticidade na flexão não sofreram influência com variações do tipo de partículas de madeira utilizadas nos painéis.

Dessa forma, a utilização da madeira tratada com CCA em compósitos termoplásticos é uma alternativa a ser considerada, proporcionando uma aplicação mais nobre e tecnológica, além de reduzir o impacto ambiental.

### 3.1.1.2 Isoladores Elétricos Cerâmicos

Os isoladores são componentes utilizados na estrutura de linhas de transmissão cuja função é sustentar os cabos elétricos aéreos e funcionar como isolante elétrico entre os cabos das torres de sustentação. Podem ser fabricados com diferentes materiais: porcelana, vidro e compósito (polimérico), sendo a maior parte produzida em porcelana é obtida em diversos formatos e dimensões (SILVA, 2009; QUEIRÓS, 2013; PORTELLA *et al.*, 2015).

Os isoladores de porcelanas são constituídos de material cerâmico, produzido a frio e submetido a um extenso processo de secagem a altas temperaturas. Esses isoladores são materiais extremamente rígidos, apresentando alta resistência a compressão, resistência à ataques químicos, elevado ponto de fusão e elevada fragilidade. A porcelana para fins elétricos é composta da mistura de vários minerais para formação de uma pasta, dentre os quais se destacam o quartzo, feldspato, argila e caulim. Cada um destes componentes tem sua influência predominante em aspectos térmicos, dielétricos e térmicos (CAMPOS, 2011; QUEIRÓS, 2013).

O quartzo influencia o comportamento térmico, o feldspato age sobre o comportamento dielétrico do volume de porcelana com o acréscimo do módulo elástico, e a argila proporciona um aumento da resistência a solicitações de compressão em função da quantidade percentual presente na composição da massa (QUEIRÓS, 2013).

Segundo a *International Electrotechnical Commission* (IEC), norma IEC 60672-3/10, os isoladores são classificados em três classes, de acordo com a sua composição principal

(quartzo, alumina e alto teor de alumina) e resistência mecânica, denominados C110, C120, e C130, conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Classificação dos isoladores cerâmicos quanto a composição de acordo com a IEC 60672-3/10 (IEC, 2010).

Óxidos	Massa (%)		
	C110	C120	C130
SiO <sub>2</sub>	60 a 62	50 a 52	35 a 40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33 a 35	44 a 47	57 a 62
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	3 a 4,5	3 a 5	3 a 4,5

Por apresentar excelentes propriedades mecânicas e pela composição química os isoladores cerâmicos possuem expectativa de vida útil de 60 a 90 anos (NERI *et al.*, 2005). Apesar desse longo período, a substituição de isoladores cerâmicos ocorre em média a cada dez anos, por causa do desgaste e devido à dificuldade em substituir a parte metálica interna do corpo cerâmico, gerando um passivo de grande volume logo a geração de isoladores cerâmicos usados é muito alta (CAMPOS, 2011).

A legislação brasileira designa que os produtores são os responsáveis por recolher as peças substituídas. Desse montante, segundo Campos (2011), apenas 3% do total de 25 mil toneladas por ano são recicladas na produção de novos isoladores. O interesse maior é na reciclagem de metais presentes nos isoladores. Dessa forma, após sua vida útil, são encaminhados para aterros por serem classificados como resíduos inertes pertencendo à classe II – B, segundo NBR 10.004/04 (GOMES *et al.*, 2012). A partir da lei 12.305/10, que institui a PNRS, a destinação desses resíduos é alterada e a prática de encaminhar para aterros industriais passa a não ser mais aceitável, motivando os produtores que busquem alternativas para destinação adequada, reutilizando ou reciclando (VIEIRA *et al.*, 2006; XU *et al.*, 2015).

Estudos para a reciclagem e reúso destes materiais estão sendo realizadas por diversos autores. Senthamarai e Devadas Manoharam (2005) estudaram a substituição da brita, um agregado graúdo convencional, por resíduos de porcelana moídos com dimensão de 20 mm, em concreto convencional. Os testes de compressão, tração, resistência à flexão e o módulo de elasticidade do concreto com resíduos de cerâmica, foram inferiores ao convencional. Entretanto, mesmo com essa redução, os autores recomendam que esses resíduos sejam utilizados como alternativa para substituição aos agregados comuns e inferem que esse tipo de concreto é passível de ser empregado na construção civil.

Lintz *et al.* (2008) adicionaram isoladores elétricos moídos em concreto, nos teores de 10 a 50% em massa, substituindo os agregados graúdos. Os autores avaliaram as propriedades

mecânicas e a capacidade de absorção de água. A porcelana apresentou baixo teor de absorção de água, gerando um menor consumo de água para produção de concreto. A resistência mecânica do concreto obtida permitiu aplicações em concretos sem fins estruturais.

Xu *et al.* (2015) utilizaram os isoladores elétricos cerâmicos como matéria-prima de baixo custo para a preparação de agregados de cerâmica porosa a fim de aproveitar os componentes  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e fornecer um produto custo competitivo. Avaliaram o efeito da temperatura de sinterização e a concentração de isoladores elétricos nas propriedades dos agregados, tais como densidade e porosidade aparente, porosidade total e resistência ao esmagamento frio foram investigados. Dessa forma o agregado produzido apresentou um aumento de densidade e força de esmagamento frio e a porosidade aparente e porosidade total diminuíram.

Jang e So (2015) estudaram o efeito da incorporação de diferentes granulometrias e concentração de resíduos de isoladores elétricos em argamassa de cimento. Os resultados indicaram que a utilização do pó do isolador em uma mistura de argamassa de cimento foi eficaz no aumento da resistência à compressão, trabalhabilidade e na redução da expansão da reação de sílica alcalino. Observaram o aumento da quantidade de hidratos de silicato de cálcio por reação pozolânica gerada.

### 3.2 COMPÓSITOS

Segundo Callister Jr e Rethwisch (2010), um compósito pode ser descrito como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que os constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades. Ainda segundo o autor, os compósitos compreendem uma nova classe de materiais, diferente das classes dos polímeros, metais e cerâmicos.

Jones (1999) define que são dois ou mais materiais combinados em escala macroscópica formando um terceiro material. Schwartz (1984) considera como um sistema composto de materiais resultante de uma mistura ou combinação de dois ou mais macro constituintes diferentes em forma e/ou composição e que são essencialmente insolúveis entre si. Hollaway (1994) diz que é a combinação de dois ou mais materiais em escala macroscópica para formar um material útil, frequentemente, exibindo características que nenhum dos componentes exibe independentemente.

A composição dos materiais compósitos é definida em dois componentes principais, a fase matriz, que é contínua e presente em maior quantidade, têm função de transferir as

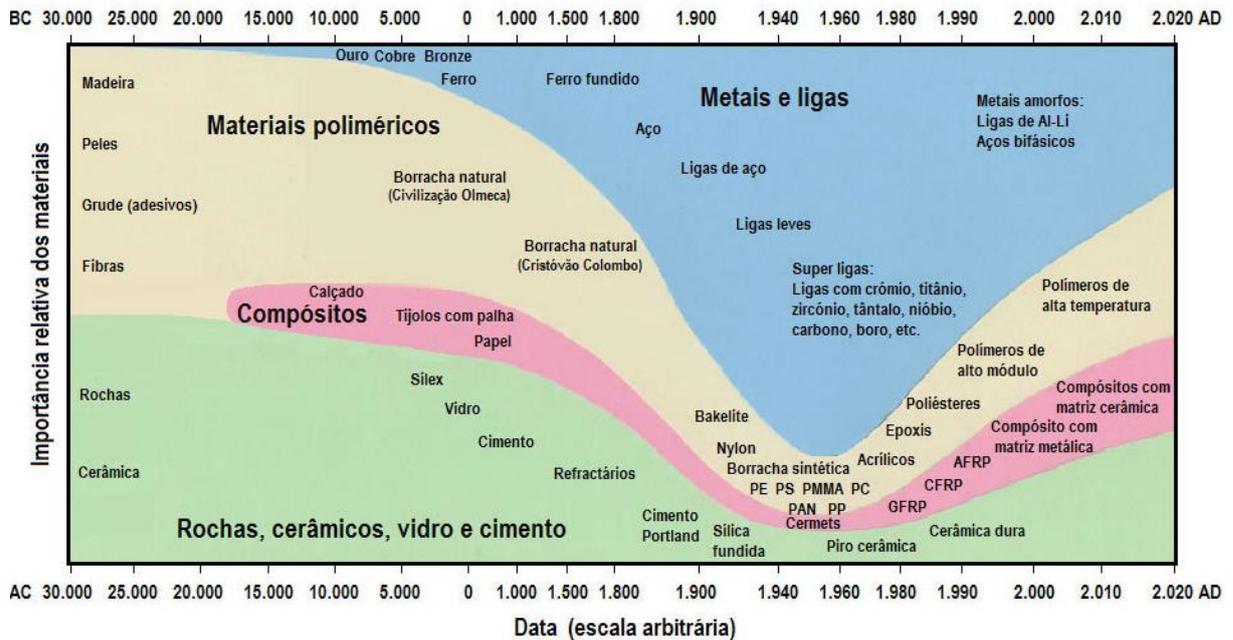
tensões e proteger a área superficial, e o outro componente é a fase dispersa ou reforço, distribuído na matriz e, geralmente, mais rígido e mais resistente que a matriz (LEVYNETO e PARDINI, 2006; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010; SPINACÉ *et al.*, 2011).

O uso de materiais compósitos está presente desde o início das civilizações, como nas casas, que na era egípcia eram feitas de barro e palhas e tijolos (LEVYNETO e PARDINI, 2006; VENTURA, 2009). Outros exemplos de compósitos são a madeira e as fibras lignocelulósicas, pois as fibras celulósicas estão intimamente associadas às hemiceluloses para reforçar a matriz amorfa de lignina (BARBOSA JÚNIOR, *et al.*, 2010; SPINACÉ *et al.*, 2011; JUNGES, 2015).

O princípio de ação combinada permite que melhores propriedades sejam criadas da interação de dois ou mais materiais distintos. Compósitos podem ser formados por uma matriz polimérica, metálica ou cerâmica, e o mesmo vale para reforços, que podem estar na forma de dispersão de partículas, fibras e laminados; ainda que existam pelo menos duas subdivisões para cada uma delas. A combinação de propriedades da matriz e do reforço confere aos compósitos melhores propriedades mecânicas, distintas dos materiais de origem (HANDBOOK, 1996; PADILHA, 1997; LEVYNETO e PARDINI, 2006).

Materiais compósitos têm sido desenvolvidos em substituição ao aço, concreto e madeira, tradicionalmente utilizados nas indústrias. Esses compósitos têm como base, em sua maioria, polímeros e utilizam cargas sintéticas ou naturais, como reforço ou enchimento, podendo ser aplicados em segmentos da indústria automotiva, da construção civil, mobílias para escritórios e material para construção de *decks*, dentre outros (VALENTE *et al.*, 2011; DITTENBER e RAO, 2012).

Na Figura 1, é apresentada a evolução dos materiais, destacando os principais materiais dentro de cada grupo e a projeção até 2020. É possível observar a tendência de desenvolvimento de novos materiais e também o crescimento da classe de materiais compósitos em relação aos demais logo após a Revolução Industrial.



**Figura 1.** Representação da evolução da importância relativa dos diversos materiais e projeção até 2020 (Caetano, 2014).

Essa ampla aplicação é devida as inúmeras possibilidades de combinações proporcionando propriedades vantajosas destes materiais, tais como baixa densidade, boas propriedades mecânicas, facilidade de moldagem e elevada resistência à corrosão (JAWAID e KHALIL, 2011; SOBCZAK *et al.*, 2012; ASHORI *et al.* 2013).

### 3.2.1 Fase matriz de Polietileno

A fase matriz de um compósito é contínua e circunda a outra fase além de conferir estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os materiais reforços e mantendo-os em suas posições relativas. Atua como o meio de transferência da energia quando tensão externa é solicitada e serve também como barreira prevenindo a propagação de trincas e protege as superfícies dos reforços contra ação abrasiva e reações químicas do ambiente.

O polietileno (PE) é um polímero termoplástico, produzido inicialmente na década de 1930 por meio da polimerização de adição do etileno sob alta pressão, obtendo-se um polímero com muitas ramificações e moderada massa molar, denominado posteriormente de polietileno de baixa densidade (PEBD) (FINKLER, 2005; SANTOS, 2005). Com o avanço da tecnologia foi possível desenvolver novas rotas de obtenção, com catalisadores de óxidos metálicos e outros metais de transição, sendo o último processo conhecido como Ziegler-Natta. Esses processos possibilitaram a produção de PE com estrutura linear em condições a

baixa pressão e temperatura (BNDES, 1996; COUTINHO, 2003; FINKLER, 2005; SANTOS, 2005).

O polietileno é um dos polímeros mais empregados no mercado nacional devido ao seu baixo custo, disponibilidade e boa processabilidade (BNDES, 1996; COUTINHO, 2003; SANTOS, 2005; TORRES; D'ALMEIDA; HABAS, 2011; NETO *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2014). Essas propriedades estão relacionadas as características físicas e químicas do polímero tais como alta inércia química, baixa condutividade elétrica e flexibilidade. Dependendo da relação entre as fases amorfa e cristalina, outras propriedades são elencadas. Quando o grau de cristalinidade é maior, por exemplo, são altamente insolúveis e relativamente duros e rígidos, além de serem aplicados em diversas formas como revestimento, fibras, elastômeros e plástico (COUTINHO, 2003; NETO *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2014, RESTREPO-FLÓREZA *et al.*, 2014).

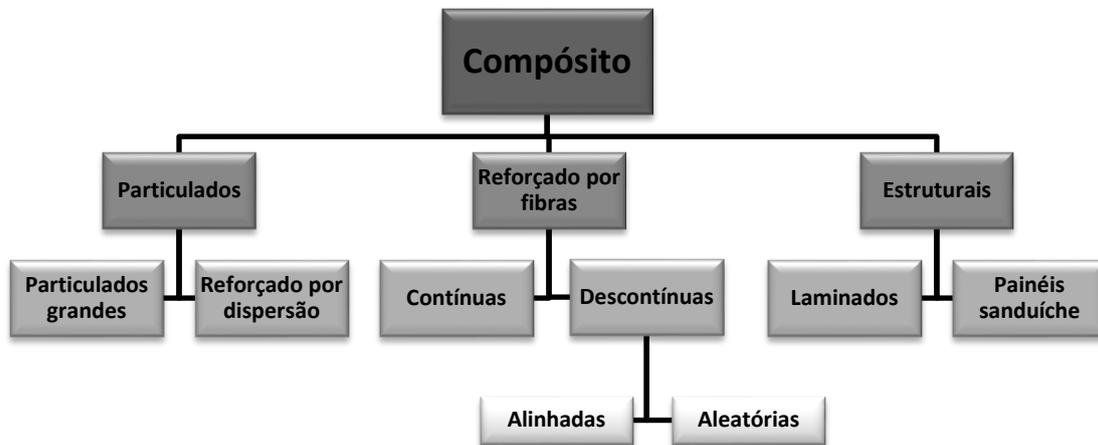
O PEAD é um polímero linear, com alto grau de cristalinidade, superior a 90%, obtido por polimerização por coordenação. Sua linearidade está associada à quantidade de ramificações por átomo de carbono, menos que uma ramificação a cada 200 átomos de carbono da cadeia principal. Por apresentar maior grau de cristalinidade, apresenta alta rigidez, maior resistência à tração, aumento na temperatura de fusão e menor espaço intermolecular, resultando numa maior massa específica (0,95-0,97 g.cm<sup>-3</sup>). A região do polímero que apresenta maior reatividade são as ligações com carbono-hidrogênio terciário (COUTINHO, 2003; NETO *et al.*, 2009).

As propriedades mecânicas do PEAD estão relacionadas diretamente com a massa molar e as ramificações. Com o aumento das ramificações, a cristalinidade e o módulo elástico do polímero diminuem, e aumenta absorção ao impacto. Outro fator que contribui para o incremento das propriedades mecânicas é a orientação das cadeias, pois esta não só aumenta o empacotamento das cadeias, como também aumenta a rigidez do polímero (COUTINHO, 2003).

Diante das inúmeras características do PEAD, este polímero pode ser moldado por extrusão, injeção e sopro. A escolha do tipo de processamento está relacionada com a aplicação do produto final. Suas principais aplicações são brinquedos, artigos domésticos, filamentos de alta resistência, tanques, tambores, embalagens para indústria de cosméticos, alimentos, sanitização, revestimentos para tubulações metálicas, dutos para saneamento e distribuição de gás, perfis extrudados, acessórios na construção civil, indústria automobilística, moveleira, entre outros (COUTINHO, 2003; TORRES; D'ALMEIDA; HABAS, 2011; NETO *et al.*, 2009; RESTREPO-FLÓREZA *et al.*, 2014).

### 3.2.2 Fase dispersa em Compósitos

A fase dispersa é constituída pelo material de reforço, que confere grande parte das características dos compósitos. As propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (SZELUGA, 2015). A geometria está relacionada à forma e tamanho, distribuição e orientação das partículas. Diante dessas possibilidades, os materiais compósitos podem ser agrupados em particulados, reforçados com fibras e estruturais. A Figura 2 apresenta o fluxograma da classificação dos compósitos (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010; MULINARI *et al.*, 2011).



**Figura 2.** Representação da classificação dos compósitos (Callister Jr e Rethwish, 2010).

As classificações dos compósitos permitem em cada área no mínimo duas subclassificações. Nos particulados considerados grandes, com dimensões acima de  $1\mu\text{m}$ , os reforços conseguem absorver somente parte da energia recebida pela matriz e restringem seu movimento, tornando o compósito mais rígido e a interação entre partícula-matriz não ocorre em nível atômico ou molecular. Nos reforçados por dispersão, o diâmetro das partículas encontra-se entre  $0,01$  e  $0,1\mu\text{m}$ , logo a interação partícula-matriz ocorre em um nível atômico. O movimento das discordâncias é dificultado, restringindo a deformação e assim, a tensão de escoamento e o limite de resistência à tração aumenta (LEVYNETO e PARDINI, 2006; FALUDI *et al.*, 2014; TISSERAT *et al.* (2014)).

Os compósitos com partículas grandes modificam ou melhoram as propriedades do material, pois podem substituir parte do volume da matriz. Um exemplo clássico desses compósitos é o concreto, cuja matriz é constituída de cimento e a areia e o cascalho representam os reforços particulados. Para aumentar o efeito de reforço, os particulados

tendem a ter geometria uniforme, ou seja, são isodimensionais e igualmente distribuídos em toda a matriz. Outro fator que influencia é o tamanho da partícula, pois quanto maior o tamanho da partícula, mais regiões ricas em matriz podem existir. Por outro lado, diminuir o tamanho da partícula aumenta a área superficial de contato com a interface, que por meio dessa interface maiores tensões são transferidas e tendem a obter melhores propriedades. O teor de particulados tende a aumentar as propriedades mecânicas do compósito, embora exista um limite para isso de acordo com as propriedades dos materiais (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010; VENTURA, 2009; FURLAN *et al.*, 2012; FALUDI *et al.*, 2014).

Os compósitos reforçados com fibras são os mais encontrados e apresentam como principal vantagem alta resistência mecânica, aliada à baixa densidade da matriz. De forma geral, tem alta resistência mecânica específica, módulo de elasticidade específico elevado, baixa densidade relativa, por exemplo. A resistência mecânica do compósito depende do quanto a carga é transferida para a fibra por meio da interface fibra-matriz. (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010; MULINARI, 2011; SZELUGA, 2015).

Compósitos reforçados com fibras requerem uma adesão moderada entre matriz e fibra. Alta adesão entre as duas fases confere boa resistência mecânica pela transferência eficiente de carga da matriz para as fibras, porém o material torna-se frágil. Baixa adesão resulta em baixa resistência mecânica, mas a energia absorvida na fratura aumenta por dissipação de energia durante o processo de descolamento da fibra – *fiber pullout*. Quando o processo de fabricação proporciona mudanças na orientação das fibras, surge a anisotropia das propriedades (VENTURA, 2009; MULINARI *et al.*, 2011).

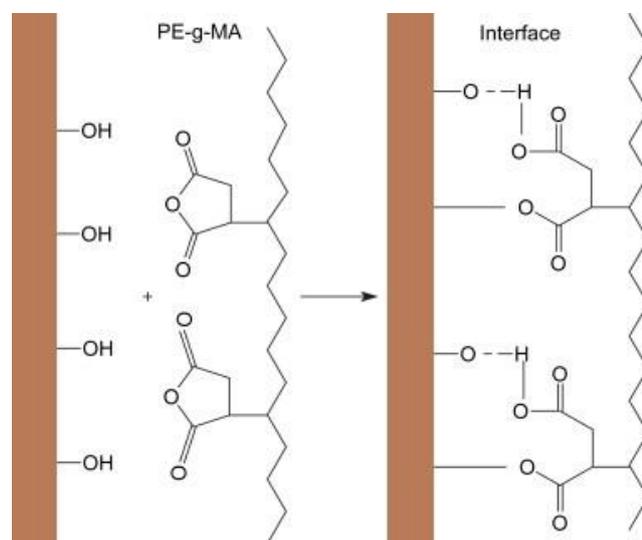
Os compósitos estruturais compreendem os laminados e painéis em sanduíche. Os laminados são folhas ou painéis bidimensionais empilhados e cimentados e, com uma direção preferencial de alta resistência. Esses compósitos são desenvolvidos para melhorar a resistência à corrosão e com baixos custos, aliando alta resistência e baixa densidade. Os painéis possuem duas folhas externas mais resistentes separadas por materiais menos densos e menos rígidos (ASKELAND e PHULÉ, 2004).

Outra classe de compósitos são os híbridos, os quais são constituídos de mais de um tipo de material reforçante numa única matriz. O objetivo principal é de combinar diferentes materiais para produzir um único com propriedades superiores às dos componentes unitários. Dessa forma, compósitos com finalidades ópticas, estruturais, elétricas, químicas, térmicas e outras são facilmente encontrados em sistemas híbridos (ASHBY e RÉCHET, 2003; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010; SZELUGA *et al.*, 2015).

### 3.2.3 Agente de acoplamento

No estudo de compósitos, visa-se obter melhorias na interação na interface fibra/matriz dos materiais mediante tratamentos térmicos e químicos na superfície dos reforços, e também na matriz pelo uso de agentes de acoplamentos. Quando se trata de fibras naturais, essa incompatibilidade é mais acentuada e afeta diretamente as propriedades mecânicas e térmicas. A incompatibilidade provoca baixa ou ausência de adesão do reforço na matriz, deste modo, tende a formar agregados durante o processamento, reduz a transferência de tensões da matriz para o reforço e baixa resistência à umidade (ARAÚJO; WALDMAN; DE PAOLI, 2008; LA MANTIA; MORREALE, 2011; KAKOU *et al.*, 2014; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

A modificação de polímeros com grupos funcionais hidroxila, como o anidrido maleico, o ácido esteárico ou glicidil metacrilato contribui para melhorar a aderência entre os componentes. Uma representação do efeito do agente de acoplamento, polietileno graftizado com anidrido maleico sobre a superfície de uma fibra natural está na Figura 3.



**Figura 3.** Ilustração da interação do PEgMA entre a fases do compósito com fibra natural (Araújo; Waldman; De Paoli, 2008, adaptado)

Um dos agentes de acoplamento mais empregado em PEAD é o anidrido maleico. A interação entre os grupos anidrido do agente de acoplamento e grupos hidroxilas das fibras naturais promovem um aumento da resistência à tração e flexão em compósitos poliméricos com matrizes termoplásticas. O uso de PEgMA em compósitos têm sido estudados por diversos autores e obtiveram acréscimo das propriedades mecânicas. A quantidade empregada varia das características de cada fibra natural e o volume de reforço, sendo frequentemente o

emprego de 1 a 5% sob a massa total. Geralmente, os reforços particulados em PEAD promovem uma maior cristalinidade, devido à nucleação dos cristais em comparação ao PEAD puro e não modificado. Essa forte interação resulta também numa interação entre os processos de degradação dos componentes envolvidos, pois a degradação de um material acelera a degradação do outro (ARAÚJO; WALDMAN; DE PAOLI, 2008; ALBINANTE; PACHECO; VISCONTE, 2013; ASHORI *et al.*, 2013; TAZI *et al.*, 2014).

### 3.3 COMPÓSITOS DE MADEIRA PLÁSTICA COM MADEIRA TRATADA COM CCA E RIP

A escassez de matérias-primas e fontes energéticas faz com que sejam adotadas estratégias inovadoras para uso eficiente desses recursos. Nos últimos anos é possível observar um crescente desenvolvimento de produtos denominados “verdes” no mercado, referidos como eco-inovações. Além dos benefícios ambientais e redução de custos, essa atitude pode funcionar como estratégia de diferenciação, possibilitando uma vantagem competitiva (JANSSON, 2011; CRABB *et al.*, 2013; GLEIM *et al.*, 2013; LIN *et al.*, 2013; MEDEIROS *et al.*, 2014; OSBURG *et al.*, 2015).

Compósitos de madeira plástica, a expressão original do inglês, *wood plastics composites* (WPC) são um grupo de materiais que consiste, principalmente, de madeira, polímeros termoplásticos e, em menor quantidade aditivos. O emprego de partículas de madeira como fase dispersa em polímeros vem sendo estudado por diversos autores. A madeira tem um grande potencial para a fabricação de WPC baseado nas propriedades mecânicas apresentadas. A ampla possibilidade de combinação de termoplásticos, tipos de madeira e outras cargas reforçantes possibilita desenvolver WPC com variadas formulações, de forma a atender casos particulares. Tanto a fase matriz como o reforço pode ter sua origem de materiais virgens ou resíduos de um processo (YAMAJI e BOUDELLE, 2004; BLEDZIK *et al.*, 2005; PAES *et al.*, 2011; POLETTO *et al.*, 2011; MISSAGIA, 2013; NAFAJI, 2013; NAFAJI e ENGLUD, 2013; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

Produzir WPC denota inúmeras vantagens, dentre elas, obter um material que possui baixo custo, ampla disponibilidade de matéria-prima, processabilidade simples, biodegradabilidade e alternativa de substituição das fibras sintéticas tradicionais em muitas aplicações devido às propriedades mecânicas. Apesar das muitas vantagens, pesquisadores estudam soluções para minimizar a baixa estabilidade térmica, aumentar a resistência à degradação biológica e alta tendência em absorver a umidade. O objetivo de desenvolver

WPC é oferecer um produto que combine as melhores propriedades da madeira e do polímero (ASHORI, 2008; LOMELI-RAMIREZ *et al.*, 2009; JAWAID e KHALIL, 2011; SOBCZAK *et al.*, 2012; ALBINANTE; PACHECO; VISCONTE, 2013; ASHORI *et al.* 2013; KUMAR *et al.*, 2014).

Geralmente, na fabricação de WPC, os polímeros termoplásticos virgens são mais utilizados, sendo os mais relevantes o polietileno, polipropileno, poli (cloreto de vinila) e poliestireno. Os resíduos poliméricos e reciclados têm sido usados desde a década de 1990 e tiveram seu uso aumentado nos países em desenvolvimento nos últimos anos (NAFAJI, 2013; OSBURG *et al.*, 2015).

Em 2012, a quantidade de WPC produzida foi de aproximadamente 1,1 milhões t na América do Norte e 900.000 t na China. Na União Europeia (UE) 260.000 t de WPC foram produzidos, destes 67% para construção de *deckings* e 24% na indústria automobilística, seguido de tapume e cercas, aplicações técnicas, móveis e bens de consumo (CARUS *et al.*, 2014; TEUBER *et al.*, 2015). Na indústria automotiva esses materiais são aplicados para peças de acabamento, tais como painéis de portas, painel, forros e cabine, bem como isolamento termo-acústico (ASHORI, 2008). A estimativa de aumento na produção de WPC na União Europeia é de 10% ao ano, especialmente no setor moveleiro, peças técnicas e bens de consumo (CARUS *et al.*, 2014; TEUBER *et al.*, 2015; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

As metodologias utilizadas para o processo de produção de WPC são as mais variadas, sendo muito empregada a moldagem por compressão, na qual a mistura é obtida de forma manual ou através de reômetros de torques e homogeneizadores de alta rotação, e posteriormente prensadas. Outra técnica amplamente empregada é a moldagem por extrusão e injeção, e a combinação de ambas. A metodologia empregada influencia diretamente nas propriedades mecânicas e físicas do compósito. A literatura apresenta diversas pesquisas que utilizaram o processo de extrusão seguido da moldagem por injeção, e obtiveram aumento das propriedades mecânicas, físicas e alguns térmicas, quando comparadas a outras técnicas de processamento de WCP (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003; FINKLER, 2005; MIGNEAULT *et al.*, 2009; MATUANA, L. M; JIN, S; STARK, N. M., 2011; POLETTO *et al.*, 2011; CARUS *et al.*, 2014; TEUBER *et al.*, 2015; TURKU; KARKI, 2016; VAIDYA; DAWN; SMITH, 2016; TEUBERA; MILITZA; KRAUS, 2016).

Utilizar madeira tratada com CCA, RIP e PEAD para produção de WPC, configura um material eco-inovador, representando uma solução conjunta para vários impasses, como o impacto ambiental causado pela produção do polímero, gasto energético na produção do

material cerâmico e o resíduo da madeira tratada com CCA que é barato, mas com alto poder poluidor (OSBURG *et al.*, 2015; TEUBER *et al.*, 2015).

Quando empresas geradoras utilizam seu resíduo como matéria-prima, ou o destinam para incorporação em outros processos, além de obter retornos financeiros demonstram um modelo de gestão sustentável. O conhecimento do processo produtivo auxilia no mapeamento do ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima até o produto final, considerando todas as formas de reúso, reciclagem e descarte final adequado. No setor elétrico o WPC possui diversas aplicações potenciais, como fabricação de isoladores elétricos de material compósito, espaçadores de fios, caixas de luz, suporte universal para chaves e facas, além das aplicações em outros setores.

WPC com pó de madeira tratada com CCA e pó de RIP preenchem uma lacuna nessa área. Em muitos casos, são utilizados aditivos para melhorar a resistência à degradação biológica e estabilidade térmica como produtos químicos a base de boro e cobre (WU *et al.*, 2010; AYRILMIS, 2013). O cobre e o arsênio, presentes no preservante, usado nos postes conferem ao WPC alta resistência a fungos, xilófagos, térmitas e outros micro-organismos, além de que a madeira tratada diminui o seu grau de hidrofilicidade, diminuindo a capacidade de absorção de água (KAMDEM *et al.*, 2004). O RIP por sua vez, pertencente à classe dos materiais cerâmicos, o qual proporciona maior estabilidade térmica e dimensional aos compósitos com matriz polimérica (CAMPOS, 2011). Surge então, uma redução dos custos, não só relacionada ao volume desses reforços em substituição ao volume de matriz, mas também na eliminação de aditivos empregados nos WCP convencionais.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os métodos e as técnicas utilizadas para obtenção e caracterização das matérias-primas e dos compósitos desenvolvidos com resíduos de postes de madeira tratada com CCA e isolador elétrico cerâmico moído.

### 4.1 MATERIAIS

O PEAD grade (Braskem) HC 7260LS-L foi utilizado como matriz. O polímero apresentou índice de fluidez de  $7,2 \text{ g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$  e massa específica de  $0,959 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . O agente de acoplamento utilizado é um composto de PEAD grafitado com 1% em massa de anidrido maleico (PEADgMA), recomendado para compósitos de fibras naturais, nome comercial *Polybond 3009*®, produzido pela Crompton Co.

Os reforços do compósito, o alburno (parte externa) do poste de madeira de eucalipto, *Eucalyptus grandis*, (Figura 4) e os isoladores elétricos cerâmicos (Figura 5) pós-uso foram fornecidos pela Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL/RGE, unidade de Caxias do Sul/RS. O cerne (parte interna) dos postes de madeira foi segregado e destinado para outro projeto de pesquisa.



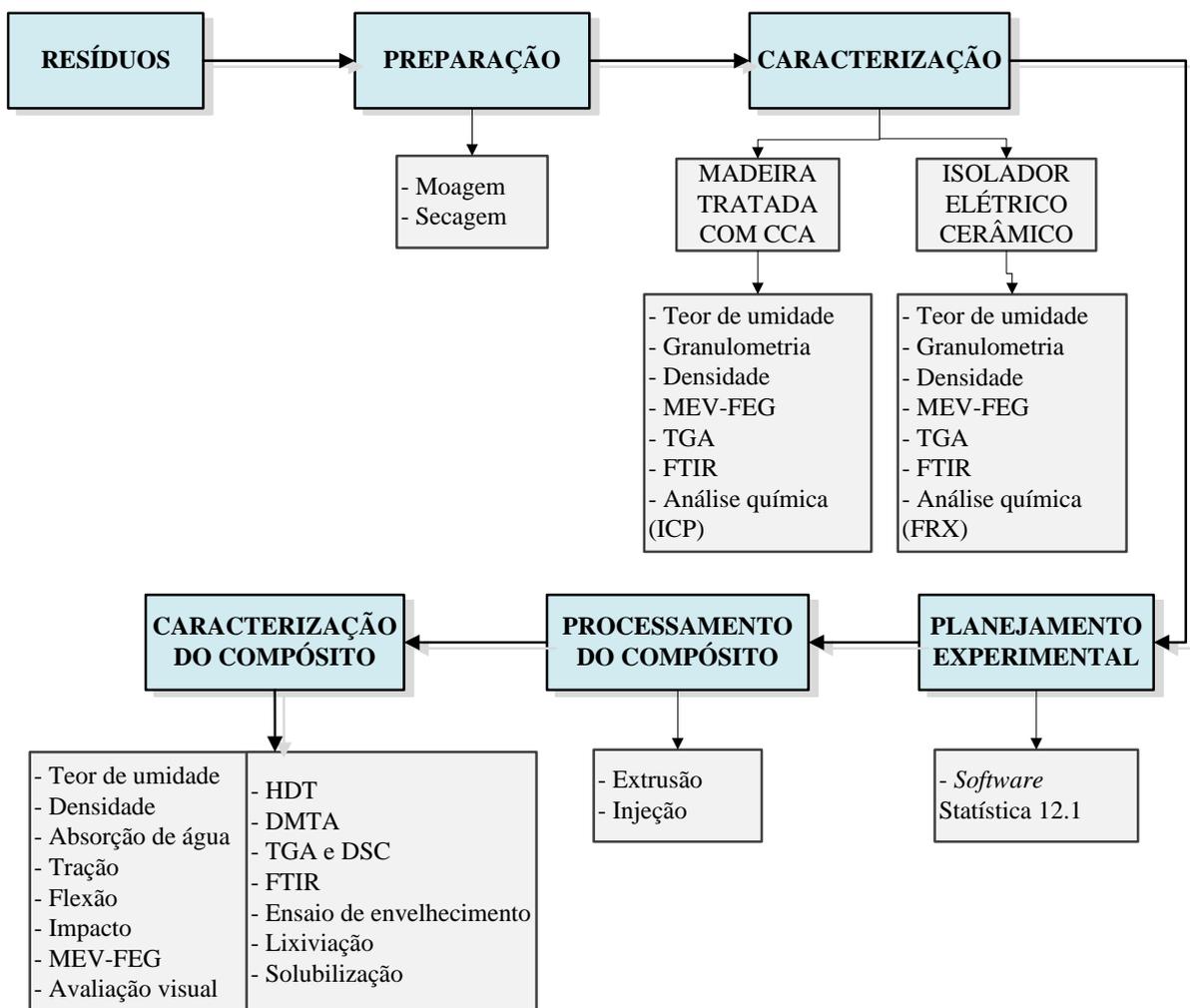
**Figura 4.** Postes de madeira tratado com CCA pós-uso nas estações avançadas.



**Figura 5.** Resíduos de isoladores elétricos cerâmicos nas estações avançadas.

## 4.2 MÉTODOS

A metodologia proposta para a obtenção do compósito com resíduos de pó de madeira de postes de CCA e pó de RIP é apresentada no fluxograma da Figura 6.



**Figura 6.** Metodologia utilizada para produção do compósito polimérico reforçado com resíduo de madeira tratada com CCA e pó de RIP

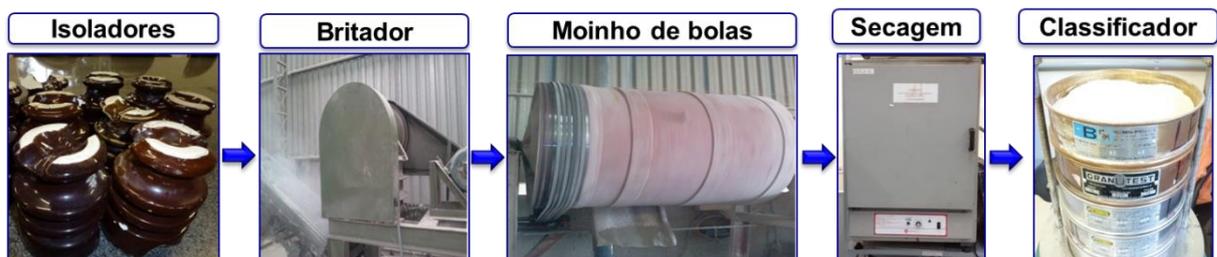
#### 4.2.1 Preparação das matérias-primas

O poste de madeira de aproximadamente 0,22 m de diâmetro e 11 m de comprimento foi cortado com motosserra em partes de aproximadamente 1 m de comprimento. Após essa etapa, o albarno foi separado do cerne através da serra fita e reduzido a pedaços de aproximadamente 4 cm x 11 cm. Os alburnos foram cominuídos em dois moinhos de facas, marca PRIMOTECNICA P1001, sendo denominado moinho 1 e Moinho BR, denominado moinho 2. A Figura 7 apresenta o fluxograma do processo de cominuição do poste de madeira.



**Figura 7.** Processo de cominuição do poste de madeira.

Os isoladores elétricos cerâmicos foram fragmentados em britador de mandíbulas, porte industrial, SP2000, 15 cv, seguido de moagem em moinho de bolas industrial, marca SP100 310, 15 cv, volume de ocupação com bolas cerâmicas de 60 a 70%. A Figura 8 apresenta o fluxograma do processo de cominuição dos isoladores elétricos cerâmicos.



**Figura 8.** Processo de cominuição dos isoladores elétricos cerâmicos.

Ambos os materiais foram secos em estufa, marca Quimis Aparelhos Científicos, modelo B252, a 105°C durante 24h para posterior classificação granulométrica.

#### 4.2.2 Planejamento experimental da formulação do compósito

A formulação ótima do compósito foi definida utilizando planejamento experimental. Um planejamento fatorial  $2^k$  com um ponto central e em duplicata foi executado. O sobescrito k representa os fatores analisados, todos em dois níveis (alto e baixo), sendo os fatores avaliados, a concentração de pó de madeira tratada com CCA e pó de RIP. Foi estabelecida uma concentração máxima de 40% de reforço no compósito devido às limitações de operação da extrusora duplarrosca. As variáveis do processo como o perfil de temperatura, velocidade da rosca e condições do processo de injeção permaneceram fixos. A Tabela 3 apresenta as variáveis de processos.

**Tabela 3.** Parâmetros dos fatores utilizados para a realização dos ensaios

Fatores	Tipo	Nível baixo	Ponto central	Nível alto
Teor do pó de madeira tratada com CCA (%m/m)	Variável	0	10	20
Teor do pó de RIP (%m/m)	Variável	0	10	20

As variáveis de respostas foram as propriedades mecânicas de resistência à flexão e resistência à tração, determinadas de acordo com as normas ASTM D790/10 e D638/14. O Quadro 1 apresenta a matriz de ensaios do planejamento experimental para a formulação do compósito gerado pelo *software* Statistica12.0. A codificação das amostras do compósito é representada pela sigla CP indicando compósito, seguido da porcentagem de reforço e sua identificação, sendo M para pó de madeira tratada com CCA e RIP para pó de RIP. Além dessas codificações, a amostra sem adição de reforço foi representada pela sigla do polímero puro, PEAD. Na análise estatística adotou o nível de confiança de 95%.

A partir dessa matriz de experimentos (conforme Quadro 1), foram preparadas as amostras com suas respectivas formulações, para serem processadas, caracterizadas e avaliadas.

Quadro 1. **Input para o planejamento experimental da formulação ótima do compósito.**

Nº das Amostras	Codificação	Fatores		Variáveis Respostas	
		Madeira	RIP	Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
2	PEAD*	0	0		
6	CP/20M/0RIP	20	0		
7	CP/20M/0RIP*	20	0		
9	CP/20M/20RIP*	20	20		
10 (C)	CP/10M/10RIP*	10	10		
1	PEAD	0	0		
5(C)	CP/10M/10RIP	10	10		
8	CP/0M/20RIP*	0	20		
4	CP/20M/20RIP	20	20		
3	CP/0M/20RIP*	0	20		

Nota: \* réplicas das amostras

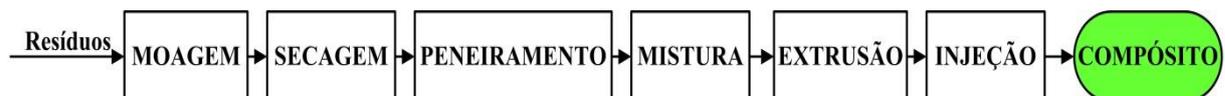
#### 4.2.3 Processo de Extrusão e Injeção dos compósitos

Após a etapa de secagem durante 24 h a 105°C, os materiais foram pesados para a preparação das misturas, conforme o planejamento experimental, para serem processados em uma extrusora duplarrosca, co-rotacional, modelo COR 20-46-LAB, do fabricante MH Equipamentos com perfil de temperatura de 150, 160, 175, 180, 180, 185, 190, 190 °C, velocidade de rotação da rosca de 200 rpm e L/D de 46.

Os corpos de prova foram obtidos através da moldagem por injeção, equipamento modelo LHS 150-80 fabricante Himaco Hidráulicos e Máquinas Ltda, com três zonas de aquecimento, 170, 180 e 190°C, molde a 40°C e rotação da rosca de 60 rpm. Antes da injeção, os *pellets* foram secos durante 12 h a 105°C.

#### 4.2.4 Fluxograma das etapas de processamento do compósito

A Figura 9 apresenta um fluxograma de blocos das etapas de processamento para obtenção do material compósito.



**Figura 9.** Fluxograma do processamento para obtenção do material compósito de PEAD com pó de madeira de postes tratados com CCA e isoladores elétricos cerâmicos.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

#### 4.3.1 Teor de umidade

O teor de umidade referente às matérias-primas (pó de madeira tratada com CCA, pó de RIP e PEAD) foi determinado conforme a norma *American Society for Testing Materials* (ASTM) ASTM E104-02/12. Esse ensaio baseia-se na secagem em estufa e visa determinar a quantidade de umidade em condições especificadas de temperatura. As amostras foram pesadas em balança analítica marca Hoaus, com massa de  $2\pm 1$ g, com precisão 0,01 e colocadas na estufa por 24 h a  $105^{\circ}\text{C}$ . Após retirar as amostras da estufa foram acondicionadas em um dessecador até atingir a temperatura ambiente, e em seguida foram submetidas a uma nova pesagem, até a obtenção de massa constante. Os ensaios foram realizados em triplicata, e o teor de umidade foi determinado a partir da equação 3:

$$P(\%) = \frac{P1 - P2}{Pa} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

P1, a massa da amostra antes da secagem em estufa (g);

P2, a massa da amostra após a secagem em estufa (g);

Pa, a massa aparente da amostra (g).

#### 4.3.2 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica do pó de madeira foi determinada conforme norma ASTM 1921/01, com auxílio de um agitador de peneiras, marca Produtest. As amostras de pó de madeira foram previamente secas, com massa de 50 g, e peneiradas por um tempo de 20 min utilizando as seguintes peneiras: #35, #48, #65, #100, #150, #200, #270 e fundo.

Para o pó de RIP seguiu o mesmo procedimento, com a sequência das peneiras de #150, #200, #270, #325, #400, #500 e fundo.

#### 4.3.3 Densidade aparente

A densidade aparente do pó de madeira tratada com CCA e do pó de RIP foi determinada pelo método do picnômetro, segundo a norma ASTM D792/13. Os ensaios foram

realizados em triplicata para ambos os materiais, com massa de  $2 \pm 1$  g a  $21^\circ\text{C}$ . As amostras foram previamente secas em estufas marca Quimis Aparelhos Científicos, modelo 317-B-252 a  $105^\circ\text{C}$  por 24h. A densidade aparente foi determinada utilizando a equação 2:

$$D = \frac{0,9980 \cdot A}{A - (B - C)} \quad (2)$$

Sendo:

A, a massa da amostra (g);

B, a massa do picnômetro com a amostra e o etanol (g);

C, a massa do picnômetro com o etanol (g);

D, a densidade do etanol a  $21^\circ\text{C}$  que é  $0,788484 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;

O, valor 0,9980 é a densidade do etanol à  $21^\circ\text{C}$ .

#### **4.3.4 Microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo**

Foi avaliada a morfologia do pó de madeira tratada com CCA e do pó de RIP através do microscópio eletrônico de varredura com emissão de campo (MEV-FEG) marca TESCAN, modelo MIRA3, do Laboratório Central de Microscopia Prof. Israel Baumvol (LCMic) da UCS, com uma tensão de aceleração de 15 kV. As amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro antes da análise.

#### **4.3.5 Análise termogravimétrica**

A análise termogravimétrica (TGA) foi utilizada para determinar a perda de massa e as temperaturas de degradação do PEAD, do pó de madeira tratada com CCA, do pó de RIP. Utilizou-se taxa de aquecimento de  $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , um intervalo de temperatura de 25 até  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , com massa da amostra de aproximadamente 10 mg, medidas em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de  $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . Foi utilizado o equipamento da marca Shimadzu, modelo TGA 50.

#### **4.3.6 Análise de infravermelho por transformada de Fourier**

O PEAD e o PEADgMA foram analisados por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), pela técnica de refletância total atenuada (Attenuated total reflection – ATR), as amostras de pó de madeira tratada com CCA e pó de RIP foram preparadas na forma de pastilhas de KBr (FTIR-KBR), e analisadas em espectrofotômetro marca Nicolet, modelo Impact IS10 Transmission, no intervalo de número de onda 4.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . A amostra de PEAD foi submetida ao processo de extrusão antes da caracterização por FTIR.

#### **4.3.7 Análise de elementos químicos na madeira de poste tratado com CCA e no isolador elétrico cerâmico**

A determinação dos elementos químicos As, Cu e Cr foi realizada nos resíduos de postes de madeira tratada com CCA, por meio do método da espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Os isoladores elétricos cerâmicos após moagem foram caracterizados quimicamente por meio de Espectrometria por Fluorescência de Raios-X de acordo com a norma ASTM C1605/04. O equipamento utilizado foi um espectrômetro sequencial de fluorescência de raios X, marca Shimadzu, modelo XRF 1800.

### **4.4 CARACTERIZAÇÕES DO COMPÓSITO**

As amostras do compósito foram acondicionadas à temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar de  $50 \pm 5\%$  por um período de 48 h e após os ensaios foram realizados ensaios na mesma condição de acondicionamento. As análises foram realizadas no LPol e no LCMic da UCS. Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados pelo laboratório BioAgri Ambiental, unidade em Canoas/RS.

#### **4.4.1 Ensaios mecânicos de tração, e flexão e impacto**

O ensaio de tração foi realizado conforme norma ASTM D638/10, com velocidade de  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a norma ASTM D790/10, célula

de carga de 100 kgf e velocidade de  $1,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Ambos os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaio EMIC DL 2000. O ensaio de impacto foi realizado do método IZOD com entalhe, pêndulo de 1 J e velocidade de  $3,46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , equipamento da CEAST, modelo Resil 25, conforme norma ASTM D256/10.

#### **4.4.2 Microscopia eletrônica de varredura de emissão de campo**

Foi avaliada a microestrutura do material compósito, após a fratura criogênica, através do microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo (MEV-FEG) marca TESCAN, modelo MIRA3, no LCMic/UCS, com uma tensão de aceleração de 15 kV. Também foi avaliada a superfície do compósito antes e após a exposição ao ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV. Antes da análise, todas as amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro para torná-las condutoras e possibilitar a interação do feixe de elétrons com a amostra antes da análise.

#### **4.4.3 Análises térmicas**

##### **4.4.3.1 Calorimetria diferencial de varredura**

Foi realizada para determinar a temperatura de fusão e a cristalinidade das amostras de PEAD e compósito. Equipamento Schimadzu DSC 50, com massa de amostra de aproximadamente 10mg, a uma taxa de aquecimento e resfriamento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ . Foram realizadas isotermas de dez minutos entre cada ciclo de aquecimento-resfriamento-aquecimento, com variação de temperatura de  $-50$  a  $200^\circ\text{C}$ , com fluxo de nitrogênio de  $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . A incerteza de medição em relação à temperatura é de 0,4 % e em relação à entalpia é de 8,6%, utilizando carta controle do Índio (In) como material de referência.

##### **4.4.3.2 Análise termogravimétrica**

A análise termogravimétrica (TGA) foi empregada para determinar os eventos de perda de massa e as temperaturas de degradação do compósito. Utilizou-se taxa de aquecimento de  $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , um intervalo de temperatura de 25 até  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , com massa da amostra de aproximadamente 10 mg, medidas em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de  $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . O equipamento utilizado da marca Schimadzu, modelo TGA 50. As incertezas de

medição em relação à massa é de 0,1% e a incerteza em relação a temperatura é de 2,0 %. Utilizando carta controle das massas padrões e do oxalato de cálcio ( $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) como material de referência.

#### 4.4.3.3 Temperatura de deflexão térmica

A temperatura de deflexão térmica (HDT) foi determinada, conforme a norma ASTM D648/07, em um equipamento CEAST, modelo HDT/6 VICAT, com uma tensão de 1,82 MPa, taxa de aquecimento de  $2 \pm 0.2^\circ\text{C}/\text{min}$ , num banho de óleo de silicone. A temperatura foi determinada após a amostra ter defletido 0,25 mm. Uma série de 3 amostras foi ensaiada e a temperatura de deflexão térmica medida.

#### 4.4.3.4 Análise térmica dinâmico-mecânico

As propriedades viscoelásticas foram determinadas em equipamento Q800 AT DMA, da marca TA Instruments. Os testes foram realizados em *clamp single cantilever*, com corpos de prova retangulares de dimensões 17,01 mm x 8,55 mm x 3,65 mm. As análises foram realizadas em método não-isotérmico, em uma faixa de temperatura de -135 a  $100^\circ\text{C}$ , utilizando uma taxa de aquecimento de  $3^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ , a uma frequência de 1 Hz e amplitude de deformação de 0,1%.

### 4.4.4 Análise de infravermelho por transformada de Fourier

O compósito antes e após ensaio de envelhecimento acelerado foi analisado por FTIR-ATR em espectrofotômetro marca Nicolet, modelo Impact IS10 Transmission, no intervalo de número de onda 4.000 a  $400 \text{ cm}^{-1}$ .

### 4.4.5 Ensaios físicos

#### 4.4.5.1 Teor de umidade

O teor de umidade referente ao compósito foi determinado conforme a norma ASTM-E104-02/12. Esse ensaio baseia-se na secagem em estufa e visa determinar a quantidade de umidade em condições especificadas de temperatura. Para realização do ensaio foram utilizados três corpos de prova para compósito reforçado com pó de madeira tratada com

CCA e pó de RIP. As amostras foram pesadas em balança analítica marca Hoaus, com massa de  $(2 \pm 1g)$ , com precisão 0,01 e colocadas na estufa por 24 h à  $105^{\circ}C$ . Após retirar as amostras da estufa foram acondicionadas em um dessecador até atingir a temperatura ambiente, e em seguida foram submetidas a nova pesagem, até a obtenção de massa constante. O teor de umidade foi determinada a partir da equação 3:

$$P(\%) = \frac{P1 - P2}{Pa} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

P1, a massa da amostra antes da secagem em estufa (g);

P2, a massa da amostra após a secagem em estufa (g);

Pa, o peso aparente da amostra(g).

#### 4.4.5.2 Densidade Aparente

A densidade aparente do compósito reforçado com pó de madeira tratada com CCA e pó de RIP foi determinada conforme a norma ASTM D792/13 método A2 (ensaio de Arquimedes) utilizando etanol como líquido para imersão. As amostras foram previamente secas em estufa, marca Quimis Aparelhos Científicos, modelo 317-B-252 por 24 h a  $105^{\circ}C$ . Os corpos de prova para o ensaio de densidade aparente foram cortados com auxílio de uma serra fita em dimensões de aproximadamente  $20 \times 13 \times 3,5$  mm e massa de  $2 \pm 1g$ . O ensaio foi realizado em triplicata e a densidade (D) foi determinada pela equação 4:

$$D = \frac{a \cdot d}{a - L} \quad (4)$$

Sendo:

a, a massa da amostra (g);

d, a densidade do líquido de imersão ( $g \cdot cm^{-3}$ );

L, massa da amostra imersa no líquido (g).

#### 4.4.5.3 Absorção de água

Para realização do ensaio de absorção de água, utilizou-se a norma ASTM D 570/12. Foram realizados ensaios com amostras de compósitos e PEAD. A determinação da capacidade de absorção do compósito foi realizada com parte do corpo de prova de tração com dimensões de 3,51 mm x 24 mm x 28 mm, medidos com um paquímetro digital, e massa  $2\pm 1$  g, pesados em balança analítica com precisão de 0,001g. No ensaio, ambas as amostras foram colocadas em um bécker (1000mL) em água destilada por 1000 h em um ambiente climatizado a 21°C, o ensaio foi realizado em quintuplicata. A massa de água absorvida foi determinada segundo a equação 5:

$$a(\%) = \frac{P_i - P_a}{P_a} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

a, a porcentagem de água absorvida (%);

P<sub>a</sub>, a massa da amostra antes da imersão (g);

P<sub>i</sub>, a massa da amostra após a imersão (g).

#### 4.4.6 Ensaio de Envelhecimento acelerado simulado em câmara com lâmpadas UV

O ensaio de envelhecimento acelerado em câmara de UV foi realizado em equipamento da marca ComExim Matérias Primas Indústria e Comércio Ltda, modelo UV COM – 1999. O envelhecimento acelerado por UV foi realizado conforme a norma ASTM G154/12, utilizando radiação UVB-313 com ciclos de exposição de 4 h ao UV a 60 °C ± 3 °C e 4 h de condensação a 50 °C ± 3 °C, sendo envelhecida apenas uma face de cada corpo de prova. A utilização das lâmpadas de UVB 313 incluiu uma região de 280 a 315 nm, responsável por causar danos consideráveis aos polímeros.

As análises foram realizadas num total de 3024 h de exposição, com avaliações da superfície das amostras nos tempos de 0, 336, 672, 1008, 1344, 2184, 3024 h. Segundo o fabricante ComExim, esse período equivale a aproximadamente 5 anos de exposição ao meio ambiente. O intervalo de tempos analisados foram determinados com base na literatura. As propriedades analisadas foram à resistência à flexão, à tração, ao impacto, HDT, TGA, DMTA, FTIR/ATR, MEV/FEG, além dos ensaios de lixiviação e solubilização.

#### **4.4.7 Caracterização e avaliação conforme NBR 10.004/04**

O compósito foi submetido ao ensaio de lixiviação e solubilização segundo norma ambiental vigente e o lixiviado e solubilizado foram analisados para determinar traços dos elementos químicos da solução preservante de CCA presentes na madeira e do chumbo (Pb) detectado na amostra do pó de RIP. Foram analisados o As, Cu, Cr e Pb, pois segundo a norma ABNT 10.004/04, a identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem. O acompanhamento desses parâmetros é necessário devido à toxicidade que tais elementos podem apresentar quando em contato com o ser humano ou quando disposto de forma inadequada ao meio ambiente.

O ensaio de lixiviação foi realizado conforme a norma NBR 10.005/04 para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no compósito, por meio de dissolução no meio extrator. A solução de extração é composta de ácido acético glacial, ácido clorídrico, ácido nítrico e hidróxido de sódio com objetivo de simular o efeito do chorume sobre os materiais em aterros. Através do resultado dessa análise os resíduos são classificados na ABNT 10.004/04 como classe I – perigosos ou como classe II – não perigosos. O ensaio de solubilização foi realizado conforme norma 10.006/04, para obtenção de um extrato solubilizado aquoso do compósito, visando diferenciar os resíduos classificados na ABNT NBR 10.004/04 como classe II A - não inertes – e classe II B – inertes. É imprescindível esclarecer que essa norma se aplica para classificação do material do compósito, somente quando o mesmo tornar-se resíduo, visando sua destinação final conforme legislação, portanto não havendo objeção quanto à empregabilidade de material ou limites para a sua aplicação. De acordo com os resultados dos ensaios, pode ser sugeridas restrições para algumas aplicações, considerando segurança do homem e do meio ambiente.

Esses ensaios foram avaliados antes do ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV (0 h de exposição), após 1.344 h e após as 3.024 h, equivalente a 5 anos de exposição ao meio ambiente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados e sua discussão, iniciando pelos ensaios de caracterização das matérias-primas seguido do delineamento do planejamento experimental. Posteriormente será apresentada a caracterização do compósito e comparadas as suas propriedades após a exposição ao envelhecimento acelerado.

### 5.1 PROPRIEDADES DA MATÉRIA-PRIMA

#### 5.1.1 Teor de umidade

O teor de umidade das matérias-primas está apresentado na Tabela 4. O resíduo de madeira tratada com CCA apresentou maior teor de umidade quando comparando as outras matérias-primas. Isso está relacionado à composição química da madeira, composta de grupamentos polares tais como hidroxilas em sua estrutura que possuem maior afinidade com as moléculas de água. O teor de umidade da madeira apresentado é considerado aceitável para o tipo de processamento. Clemons (2002), Kollmann e Côté (1984), Yamaji e Bonduelle (2004), Lahr e Christoforo (2013), afirmam que o material apresentando de 1 até 6% de teor de umidade não acarretará dificuldade de processamento e nem perda de propriedade mecânica do compósito. Lahr e Christoforo (2013) ressaltam que o controle deste parâmetro é necessário, pois teores de umidade 2% acima do teor desejado podem gerar excesso de vapor, causando bolhas e explosões nas chapas durante a moldagem, proporcionando vazios em compósitos moldados por compressão.

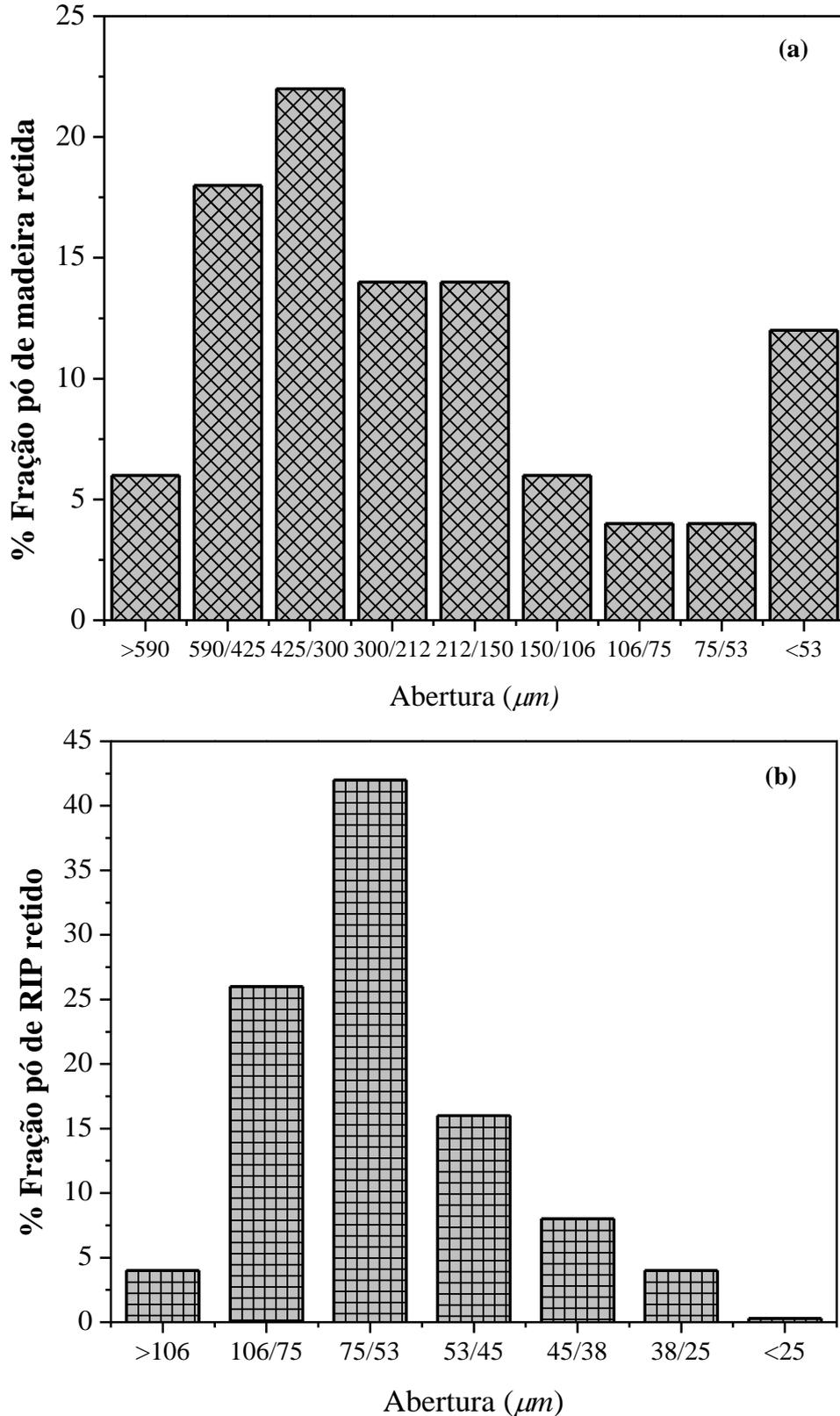
O pó de RIP e o PEAD possuem como propriedade intrínseca a baixa tendência de sorção de água, corroborando com os valores apresentados na Tabela 4. Dessa forma a umidade apresentada após o processo de secagem tornou-se satisfatória para o processo de extrusão e injeção (LINTZ *et al.*, 2008; LI *et al.*, 2014, RESTREPO-FLÓREZA *et al.*, 2014).

**Tabela 4.** Teor de umidade das matérias-primas

Amostras	Teor de umidade (%)
Pó de madeira tratada com CCA	3,347 ± 0,016
Pó de RIP	0,202 ± 0,007
PEAD (pellets)	0,072 ± 0,001

### 5.1.2 Análise Granulométrica

O resultado da análise granulométrica do pó da madeira tratada com CCA e do RIP está apresentado na Figura 10 (a) e (b), respectivamente.



**Figura 10.** Distribuição granulométrica do resíduo de madeira tratada com CCA (a) e pó de RIP (b).

A maior fração de pó de madeira ficou retida entre as peneiras de 28 a 100 *mesh*, correspondente aos tamanhos de partículas entre 590 e 150  $\mu\text{m}$ . O pó de RIP apresentou maior fração retida entre 150 e 270 *mesh*, correspondente aos tamanhos de partículas entre 106 a 53 $\mu\text{m}$ . Todas as amostras apresentaram uma distribuição heterogênea. Esse perfil de granulometria está relacionado à forma de processamento e potência do equipamento. Os reforços particulados contribuem para uma melhor dispersão na matriz, restringido à sua mobilidade, proporcionando maior rigidez aos compósitos (ASHORI, 2008; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010; GOMIDE, 1983).

Neste estudo foram utilizados os pós de madeira referentes às peneiras de 28, 65, 150, 200 #, considerando que os vazios proporcionados pelas partículas de tamanhos maiores podem ser preenchidos com os pós mais finos. Para o pó de RIP não houve segregação de faixas granulométricas (GRIZON *et al.*, 2015).

### 5.1.3 Densidade aparente dos reforços

A densidade aparente do pó da madeira tratada com CCA e o pó de RIP foram determinados pelo método da picnometria e a do PEAD o fornecido no boletim técnico da Brasken, *grade* HC 7260LS-L, e estão apresentados na Tabela 5. O pó de madeira tratado com CCA apresentou densidade aparente de 1,552  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Poletto *et al.* (2011), Lima *et al.* (2011) e Sommerhuber, Welling, Krause (2015) encontraram valores de densidades próximas para o pó de madeira determinado pelo método da picnometria, valores de 1,41, 1,42 e 1,40  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectivamente. A densidade da madeira pode variar de acordo com a espécie, gênero, idade da árvore, tipo de tratamento, o teor de umidade e também ao tempo de uso (PODDAR *et al.*, 2014; YARGICOGLOUA *et al.*, 2015; TUMULURU, 2016). A presença do preservante químico na madeira contribuiu para um aumento da densidade do pó da madeira, visto que são impregnados no alburno entre 2.700 e 35.400  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  da solução de CCA (HASAN *et al.*, 2010; KARTAL *et al.*, 2015; FERRARINI *et al.*, 2016).

O pó de RIP apresentou uma densidade aparente superior ao do pó de madeira tratada com CCA e PEAD, como esperado, pois são materiais cerâmicos, mais densos, sendo próximo aos valores da literatura para argilas brancas (CAMPOS, 2011; KE *et al.*, 2013; ZIMMERMANN & ZATTERA, 2013; BRITO *et al.*, 2015; PENTEADO *et al.*, 2016).

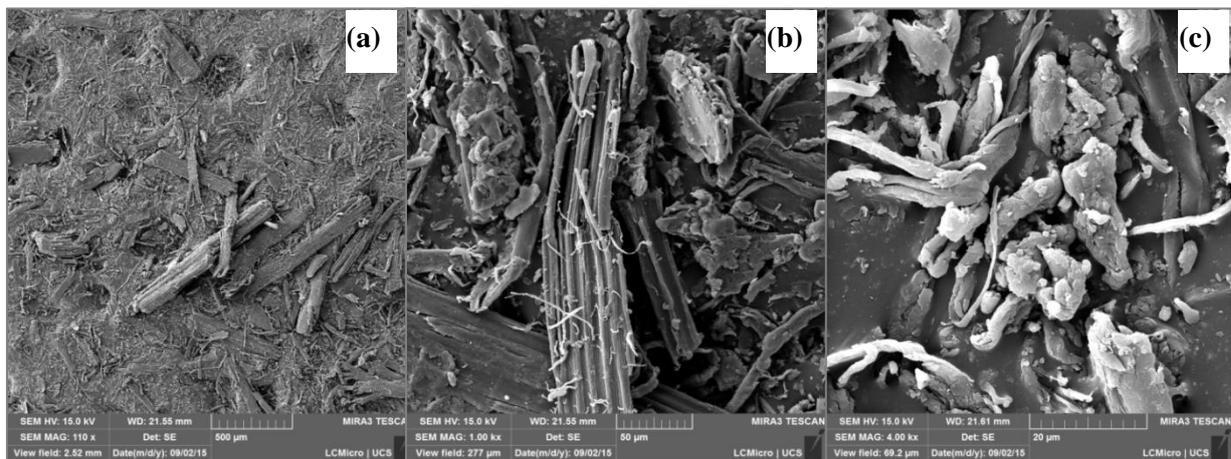
**Tabela 5.** Densidade das matérias-primas

Amostras	Densidade aparente (g.cm <sup>-3</sup> )
Pó de madeira tratada com CCA	1,552 ± 0,011
Pó de RIP	2,539 ± 0,077

Nota: \* fornecido pelo fabricante

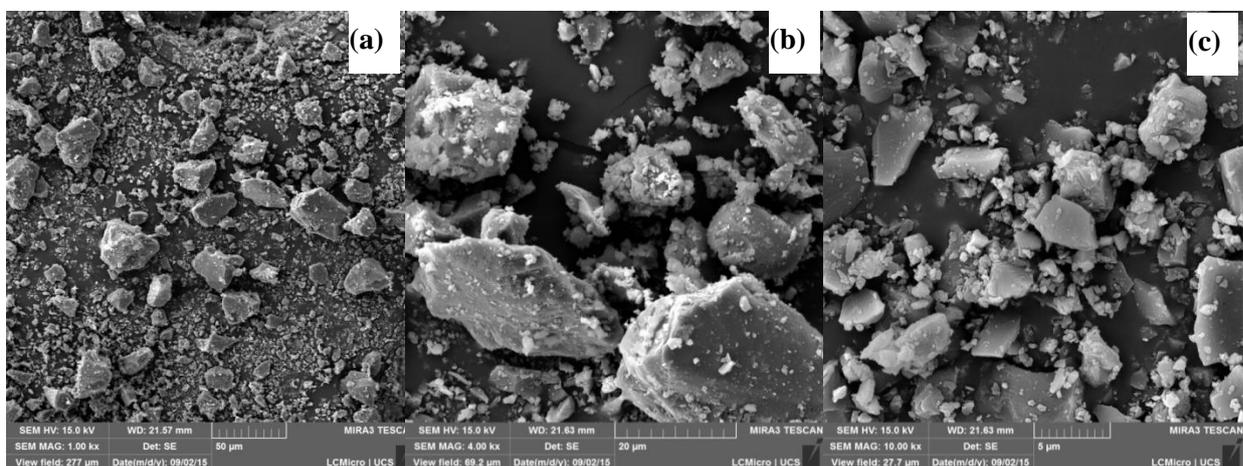
### 5.1.4 Análise morfológica dos reforços

A morfologia do pó da madeira tratada com CCA e do pó de RIP pode ser observada através das micrografias apresentadas nas Figuras 11 e 12.



**Figura 11.** Micrografia do pó da madeira tratada com CCA, (a) com 110x, (b) 1.000x e (c) 4.000x de ampliação

As amostras da Figura 11 são referentes ao pó da madeira tratada com CCA, observa-se variação do tamanho das partículas (evidenciado pela análise granulométrica), formas fibrilares e a presença de rugosidade na superfície dos particulados. Tais características podem proporcionar maior ancoragem dos particulados na matriz (POLETTO *et al.*, 2011; MA *et al.*, 2012).



**Figura 12.** Micrografia do pó de RIP, (a) 1.000x, (b) 4.000x e (c) 10.000x de ampliação

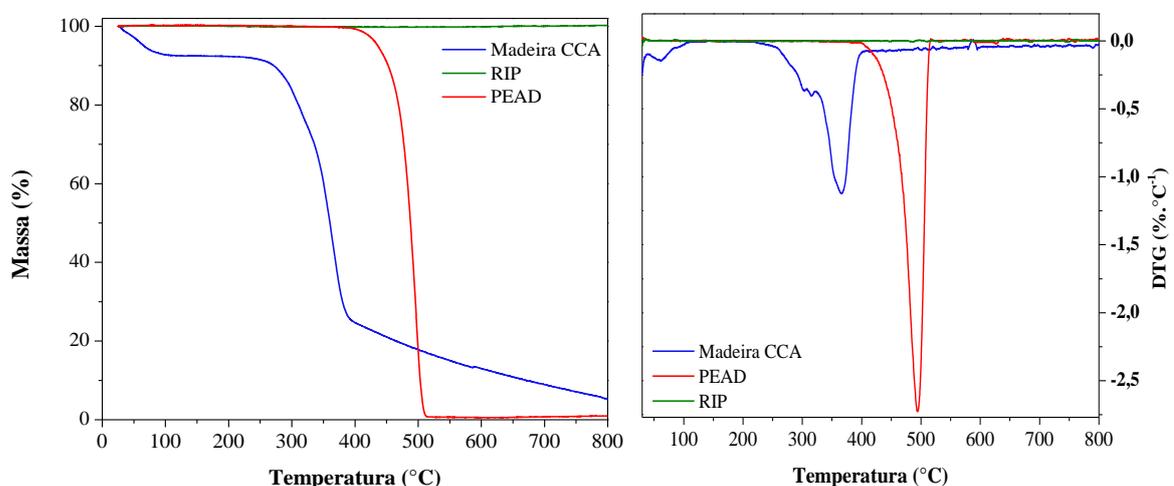
Analisando as micrografias da Figura 12, o pó de RIP apresenta características geométricas mais granulares e com forma prismática. Tais fatores estão associados à natureza inorgânica dos materiais cerâmicos (MA *et al.*, 2012; XU *et al.*, 2015).

### 5.1.5 Análise termogravimétrica

Na Figura 13 (a) e (b) estão apresentadas as curvas termogravimétricas (TG) e as curvas da primeira derivada do pó de madeira tratada com CCA, pó de RIP e PEAD.

A curva do pó da madeira apresentou três eventos, representados pelas inflexões da curva, totalizando em 94,36% de perda de massa. O primeiro evento de perda de massa em temperatura inferior aos 100°C, com perda de massa de 7,33%, refere-se à desidratação da celulose por um processo endotérmico. O segundo evento de perda de massa, com início em 201°C, onset em 278,2°C e com perda de massa de 14,1%. Segundo Chirayil *et al.* (2014), Poletto, Zattera, Santana (2014), Julie Chandra, Georgea, Narayankuttya (2016), nessa faixa de temperatura ocorre a despolimerização de vários constituintes, principalmente a hemicelulose e frações menores da lignina. O terceiro evento inicia em 317°C, com perda de massa de 68,99% e temperatura máxima de degradação em 365°C, e está associado à decomposição da celulose e fração da lignina, além da presença de sujidades, óleos, ceras (MONTEIRO *et al.*, 2012). Segundo Kamdem *et al.* (2004) e Tomak, Baysalb, Peker (2012) a presença de CCA nas amostras de madeira acelera o processo de degradação, reduzindo a temperatura de início de degradação.

Os três eventos de perda de massa do pó da madeira são evidenciados com mais precisão a partir da curva da DTG (Fig. 13 (b)). Através da DTG foi possível identificar as temperaturas de degradação máxima de cada amostra.

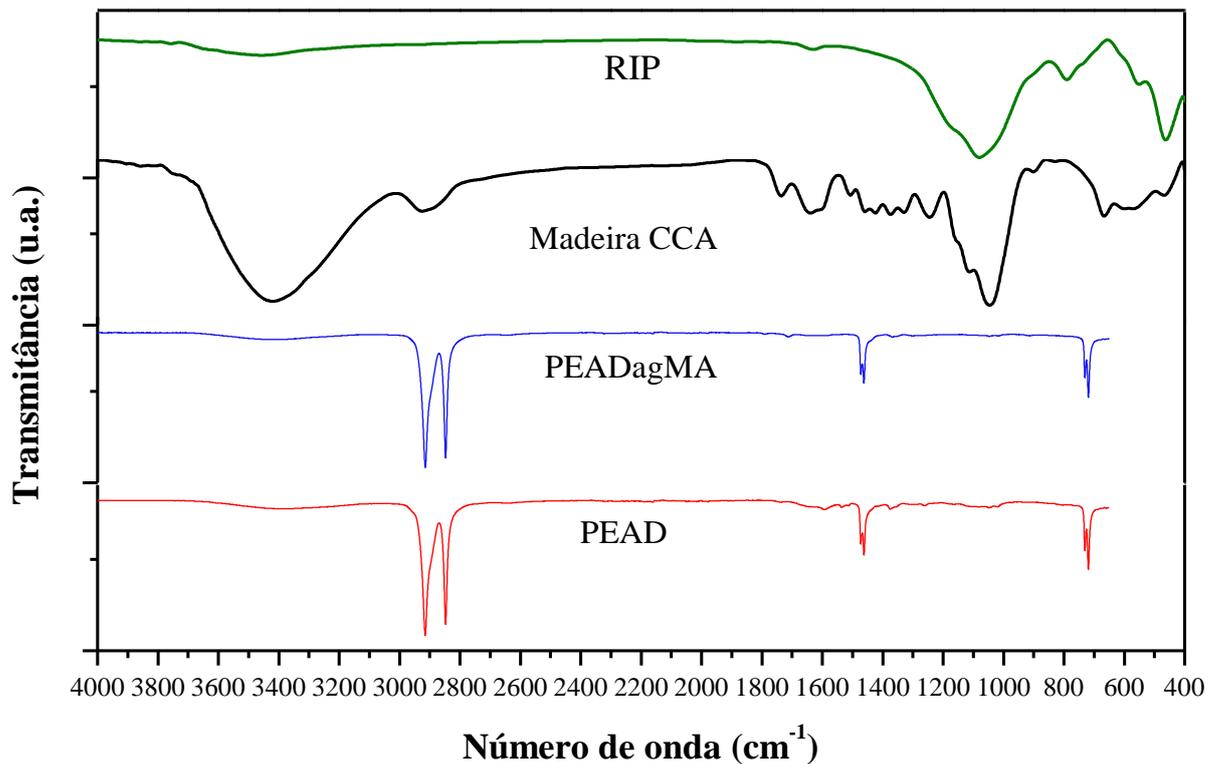


**Figura 13.** Curvas termogravimétricas (a) e DTG (b) do pó da madeira, pó de RIP e PEAD.

Para o pó de isolador cerâmico não foi possível evidenciar eventos de perdas de massa no intervalo de temperatura analisado. Isso ocorre porque os isoladores elétricos cerâmicos pertencem à classe dos materiais cerâmicos os quais apresentam como característica a alta resistência térmica e elevado ponto de fusão (BROSTOW *et al.*, 2016). O PEAD por sua vez apresentou apenas um evento de perda de massa, que iniciou em 360°C, e se estendeu até 505°C, com temperatura máxima de degradação em 490°C (J.R. ARAÚJO; WALDAMN; DE PAOLI, 2008; ZIMMERMANN & ZATTERA).

### 5.1.6 Análise de infravermelho por transformada de Fourier

A Figura 14 apresenta os espectros de FTIR das matérias-primas utilizadas no compósito.



**Figura 14.** Espectros de FTIR do PEAD, PEADgMA, madeira tratada com CCA e RIP.

No Quadro 2 estão relacionados as bandas de absorção e suas atribuições dos espectros das matérias-primas.

**Quadro 2.** Bandas de absorção e suas atribuições dos espectros das matérias-primas.

Amostra	Frequência vibracional (cm <sup>-1</sup> )	Atribuição	Referência
RIP	3690-3200	v <sub>O-H</sub> (umidade)	Muccillo <i>et al.</i> (2005)
	1080	v <sub>SiO<sub>2</sub></sub>	
	780	ligação metal-oxigênio	
	550		
	460		
Madeira CCA	3790-3040	v <sub>O-H</sub> (polissacarídeo)	Migneault <i>et al.</i> (2009) Fabiyl <i>et al.</i> (2011)
	2960-2810	v <sub>C-H(CH,CH<sub>2</sub>)</sub>	Migneault <i>et al.</i> (2009)
	1735	v <sub>C=O</sub> (lignina e extrativos)	Migneault <i>et al.</i> (2009) Fabiyl <i>et al.</i> (2011)
	1600	Grupo éter da lignina	Pouzet <i>et al.</i> (2015) Yang <i>et al.</i> (2015)
	1240	v <sub>C-O</sub> (compostos aromáticos da lignina)	Pouzet <i>et al.</i> (2015) Yang <i>et al.</i> (2015)
	1040	v <sub>C-O</sub> (celulose e hemicelulose)	Migneault <i>et al.</i> (2009) Yang <i>et al.</i> (2015)
	750-440	δ <sub>C-H</sub>	Migneault <i>et al.</i> (2009) Fabiyl <i>et al.</i> (2011) Pouzet <i>et al.</i> (2015)
PEADgMA	3682-3025	v <sub>O-H</sub> (umidade)	Maurano, Galland, Maurer (1998) Stuart (2004) Carvalho <i>et al.</i> , 2007 Fontanella <i>et al.</i> (2010) Morelli & Ruvolo Filho (2010) Torres; D'Almeida, Habas (2011) Araújo <i>et al.</i> (2014)
	2915	v <sub>C-H(CH<sub>2</sub>)</sub>	
	2847	v <sub>C-H</sub> (extremidades)	Fontanella <i>et al.</i> (2010)
	1700-1500	v <sub>C=O</sub>	Torres, D'Almeida, Habas (2011)
	1470-1460	δ <sub>C-H</sub> (extremidades)	Fontanella <i>et al.</i> (2010)
	715	δ <sub>C-H</sub>	Fontanella <i>et al.</i> (2010) Torres, D'Almeida, Habas (2011)
PEAD	3682-3025	v <sub>O-H</sub> (umidade)	Torres, D'Almeida, Habas (2011)
	2915	v <sub>C-H(CH<sub>2</sub>)</sub>	Fontanella <i>et al.</i> (2010)
	2847	v <sub>C-H</sub> (extremidades)	Stuart (2004) Fontanella <i>et al.</i> (2010)
	1700-1500	v <sub>C=O</sub>	Torres, D'Almeida, Habas (2011)
	1470-1460	δ <sub>C-H</sub> (extremidades)	Fontanella <i>et al.</i> (2010)
	715	δ <sub>C-H</sub>	Fontanella <i>et al.</i> (2010) Torres, D'Almeida, Habas (2011)

Para a amostra de RIP, se observa a presença de umidade na amostra, devido à banda entre 3650 a 3200 cm<sup>-1</sup>. Na região de 1060 cm<sup>-1</sup> ocorre a banda característica de SiO<sub>2</sub> e as

bandas na região de baixo número de onda, são associadas com a ligação metal-oxigênio (MUCCILLO *et al.*, 2005).

A madeira dos postes tratados com CCA apresentou bandas de forte intensidade na região entre 3800 a 3040  $\text{cm}^{-1}$  relacionado os grupos OH da celulose e da umidade da madeira. Entre 2960 a 2810  $\text{cm}^{-1}$ , representa as vibrações de estiramento das ligações C-H, dos carbonos secundários da estrutura da celulose. A presença das carbonilas e C=C do anel aromático é evidenciada na região que compreende 1750 a 1250  $\text{cm}^{-1}$ , onde ocorre deformação axial de duplas ligações. A banda na região entre 1040  $\text{cm}^{-1}$  é associada ao grupo hidroxila presente na celulose e hemicelulose. E a banda apresentada entre 750 a 400  $\text{cm}^{-1}$  decorre das vibrações dos anéis aromáticos, ligações C-H fora do plano e deformação angular de cadeia (STARK; MATUANA; CLEMONS, 2004; FABIVI *et al.*, 2011; MIGNEAULT *et al.*, 2015).

O espectro do PEADgMA foi semelhante ao PEAD, diferenciado pela ausência de umidade. O grupo anidrido maleico apresenta vibrações na região de comprimento de onda entre 1860 a 1750  $\text{cm}^{-1}$ , mas devido à técnica ATR empregada, a intensidade da banda nessa região não foi evidenciada (MAURANO; GALLAND; MAULER; 1998; CARVALHO *et al.*, 2007; MORELLI & RUVOLLO FILHO, 2010; ARAÚJO *et al.*, 2014).

O espectro do PEAD apresenta as três bandas características deste polímero, na região de comprimento de onda 2915 e 2847  $\text{cm}^{-1}$ , a segunda entre 1500 e 1400  $\text{cm}^{-1}$ , e a terceira com pico em 715  $\text{cm}^{-1}$ . As primeiras bandas em comprimento de onda de 2915 e 2847  $\text{cm}^{-1}$ , são devido ao estiramento das ligações internas e nas extremidades da cadeia polimérica, respectivamente. Na região de 1470 e 1460  $\text{cm}^{-1}$  as bandas correspondem à deformação e em 730 e 710  $\text{cm}^{-1}$  à deformação angular. É possível identificar a presença de uma larga banda na região entre 3600 e 3200  $\text{cm}^{-1}$ , característico do grupo hidroxila, inferindo a presença de umidade na amostra e entre 1700 e 1500  $\text{cm}^{-1}$  que está relacionado à presença de carbonilas, decorrente da oxidação superficial provocada pelo processo de extrusão do PEAD. As ligações C-C, com bandas entre 1250-1000  $\text{cm}^{-1}$  não foram evidenciadas nesse espectro, e isso é devido à simetria da cadeia polimérica do PEAD que induz à simetria das vibrações C-H e a pequena massa dos grupos laterais, que não consegue produzir por inércia o movimento do carbono (STUART, 2004; TORRES; D'ALMEIDA; HABAS, 2011).

### 5.1.7 Análise química do pó de madeira do poste tratado com CCA e do pó de isolador elétrico cerâmico

As análises químicas foram realizadas no pó de madeira de postes tratados com CCA para quantificar a concentração dos elementos químicos As, Cu e Cr. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6.** Resultados do ensaio da análise química para quantificar os elementos químicos (As, Cu e Cr) na amostra de madeira

Elemento	Concentração no pó de madeira (mg.kg <sup>-1</sup> )
Cobre	976
Cromo	2130
Arsênio	702

A concentração dos preservantes químicos na madeira pode variar de acordo com os procedimentos e parâmetros adotados durante o processo de preservação, além de considerar o tempo de serviço dos postes. Mercer e Frostick (2012) e Ferrarini *et al.* (2016), realizam estudos em postes pós uso e obtiveram valores de concentração dos óxidos de cobre, cromo e arsênio acima dos detectados nas amostras de postes deste estudo (JANIN *et al.*, 2011).

A composição do isolador elétrico cerâmico está apresentada na Tabela 7, resultado da análise química por espectrometria por fluorescência de raios-x. Pode ser observado que os principais constituintes da amostra são a sílica, alumina, óxido de potássio e o óxido de ferro (III), representando 96,88% da amostra. Os outros elementos químicos, presentes em menor proporção, em sua maioria são de natureza inorgânica, oriundos das argilas utilizadas para produção dos materiais cerâmicos. A presença dos óxidos de zinco, de chumbo, de titânio e cromo é devido ao processo de esmaltação dos isoladores elétricos cerâmicos. A presença do óxido de chumbo (II) (PbO) e do óxido de zinco (ZnO) também pode ser relacionada ao contato direto do isolador elétrico cerâmico com o suporte metálico de fixação nas redes de transmissão, o qual possui tratamento galvânico com zinco e chumbo e quando segregam a estrutura metálica, ocorre atrito e deixam resíduos do revestimento sobre os isoladores elétricos cerâmicos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, 2011; XU *et al.* (2015).

Sousa, Neves, Alarcon (2004) estimaram que a concentração de PbO em isoladores elétricos cerâmicos varia de 0,1 a 15,0%, resultados obtidos pela técnica de FRX. Bonan

(2009) analisou amostras de isoladores elétricos cerâmicos pela mesma técnica e obteve um teor (%m/m) de 0,11% para PbO. Jang e So (2015), Portella *et al.* (2015) e Xu *et al.* (2015) também realizaram estudos de reaproveitamento de isoladores cerâmicos e obtiveram composição química similar as encontradas nas amostras deste estudo.

**Tabela 7.** Composição química dos RIP por espectrometria por fluorescência de raios X (% mássica de óxidos).

Óxidos	Teor (% m/m)
SiO <sub>2</sub>	75,104
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,354
K <sub>2</sub> O	4,161
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,257
CaO	0,685
Na <sub>2</sub> O	0,604
TiO <sub>2</sub>	0,297
PbO	0,297
MgO	0,187
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,112
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,077
MnO	0,077
Rb <sub>2</sub> O	0,043
ZnO	0,037
ZrO <sub>2</sub>	0,038
NiO	0,015
Perda de fogo	0,655
Total	100,00

## 5.2 FORMULAÇÃO DO COMPÓSITO

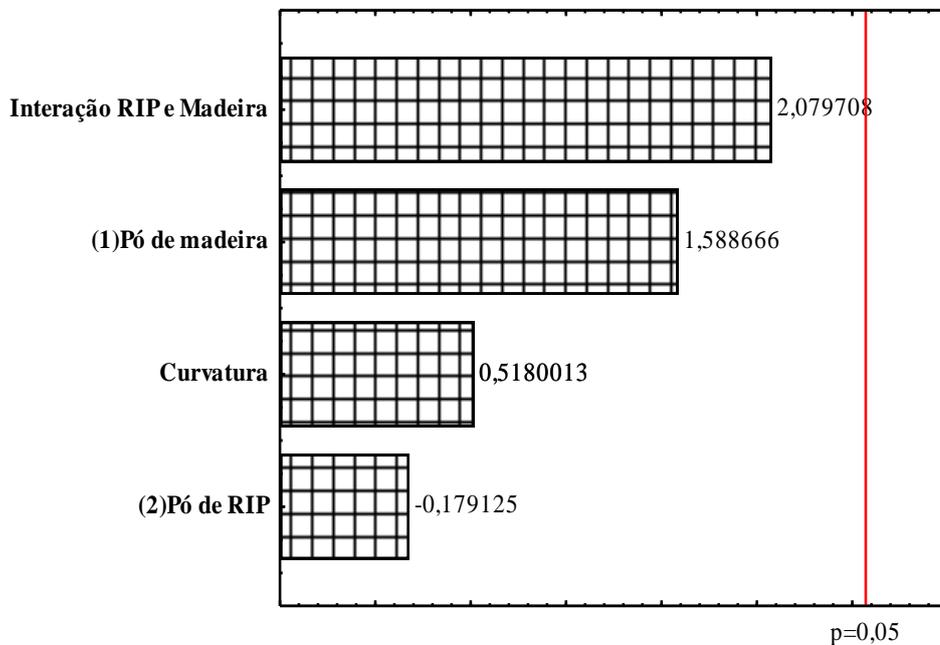
A Tabela 8 apresenta os valores obtidos para as variáveis respostas a partir da utilização de diferentes concentrações de pó de madeira e pó de RIP.

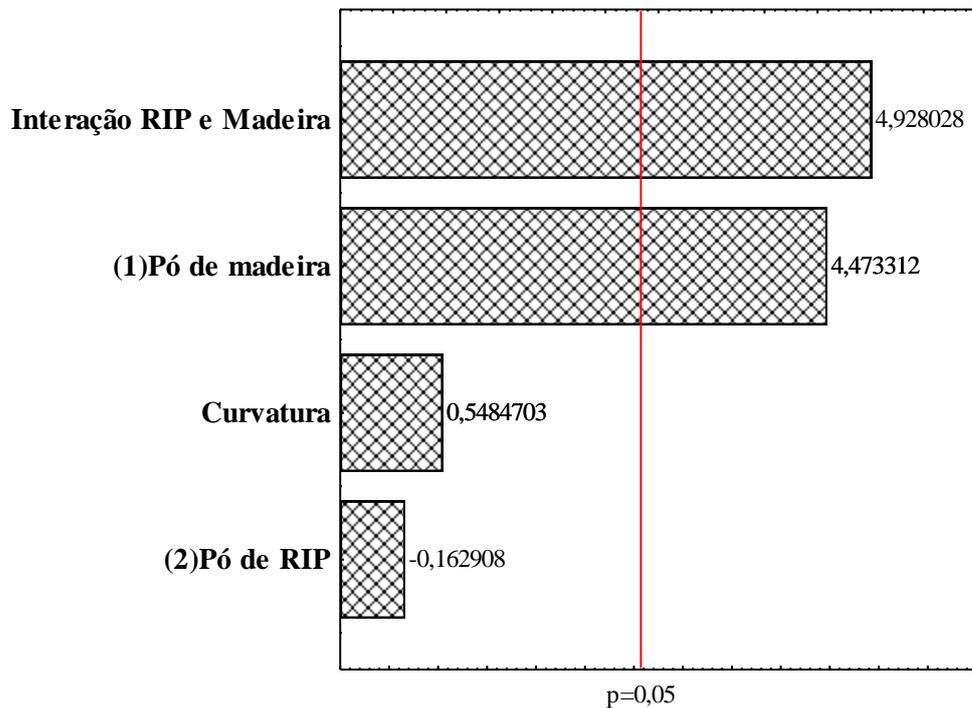
**Tabela 8.** Matriz de experimentos e variáveis respostas do planejamento fatorial 2<sup>2</sup>

Nº das Amostras	Codificação	Fatores		Variáveis Respostas	
		Madeira	RIP	Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
2	PEAD*	0	0	18,64	12,91
6	CP/20M/0RIP	20	0	27,52	17,57
7	CP/20M/0RIP*	20	0	27,96	16,79
9	CP/20M/20RIP*	20	20	28,24	21,17
10 (C)	CP/10M/10RIP*	10	10	24,32	15,08
1	PEAD	0	0	21,63	13,34
5(C)	CP/10M/10RIP	10	10	23,86	16,64
8	CP/0M/20RIP*	0	20	20,62	8,607
4	CP/20M/20RIP	20	20	31,85	21,21
3	CP/0M/20RIP*	0	20	20,42	8,756

Nota: \* réplicas das amostras

A Figura 15 e 16 apresenta os efeitos dos fatores sobre a variável de resposta resistência à flexão e tração, respectivamente, obtidas a partir da ANOVA dos resultados apresentados na Tabela 8. Os efeitos apresentados no eixo das ordenadas cujos valores estiverem à direita da linha  $p = 0,05$  apresentaram efeitos significativos sobre as variáveis respostas em estudo.

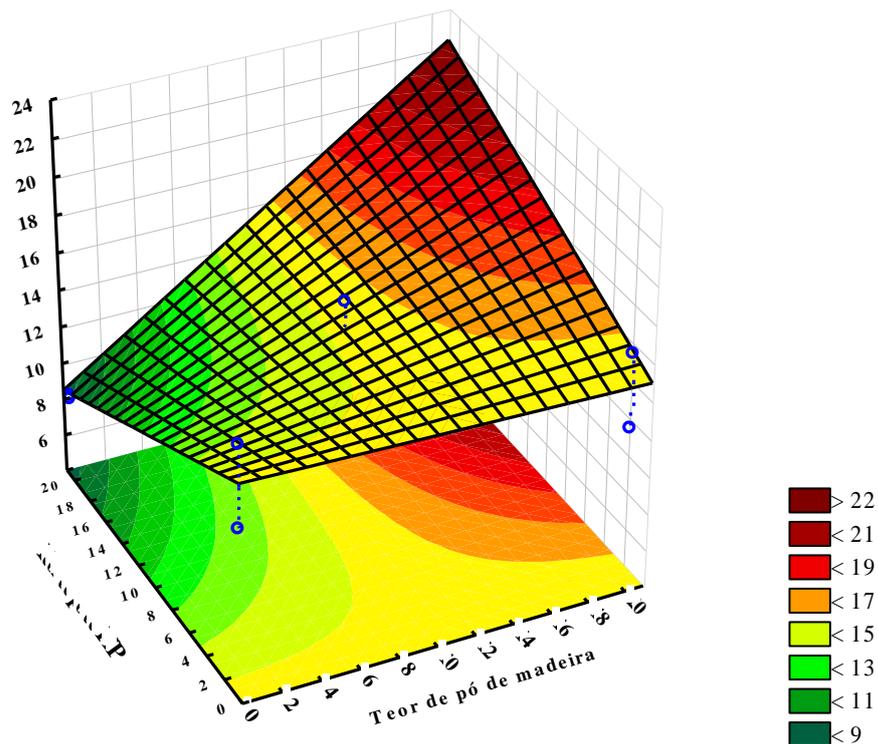
**Figura 15.** Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resistência à flexão



**Figura 16.** Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a tração

Conforme a Figura 15 observa-se que nenhuma das variáveis avaliadas teve efeito significativo sobre a resistência à flexão. Na Figura 16 observa-se que o fator madeira e a interação RIP e madeira foram significativos, e evidenciou que o pó de madeira tem maior influência na propriedade de tração do compósito. Isso prova que, para o processamento desse compósito, a análise dos fatores de forma isolada pode não ser suficiente para explicar totalmente os fenômenos ocorridos e, conseqüentemente, pode não justificar os resultados obtidos para os ensaios mecânicos de tração que foram avaliados. A curvatura (curvatr.) não apresentou efeito significativo, e isso permite inferir que a relação entre os fatores é uma função linear. Quando a relação entre os efeitos apresenta uma linearidade, possibilita analisar o comportamento da propriedade em estudo dentro dos limites dos níveis pré-estabelecidos.

A Figura 17 apresenta a superfície de resposta para variável resistência à tração. Observa-se que conforme aumentam os valores nos eixos dos fatores madeira tratada com CCA e RIP, a variável resposta resistência à tração aumenta. Dessa forma pode-se inferir que o melhor resultado é obtido com a combinação dos dois fatores, quando estão nos níveis altos, ou seja, quando 20% de cada reforço são adicionados ao compósito. Diante dessa análise, torna-se evidente que a formulação ótima para o compósito híbrido em estudo é aquela em que a amostra contém 20 % de pó de madeira e 20% de pó de RIP, 60% de PEAD e 2% de PEADgMA sob a massa da amostra, denominada CP/20M/20RIP.

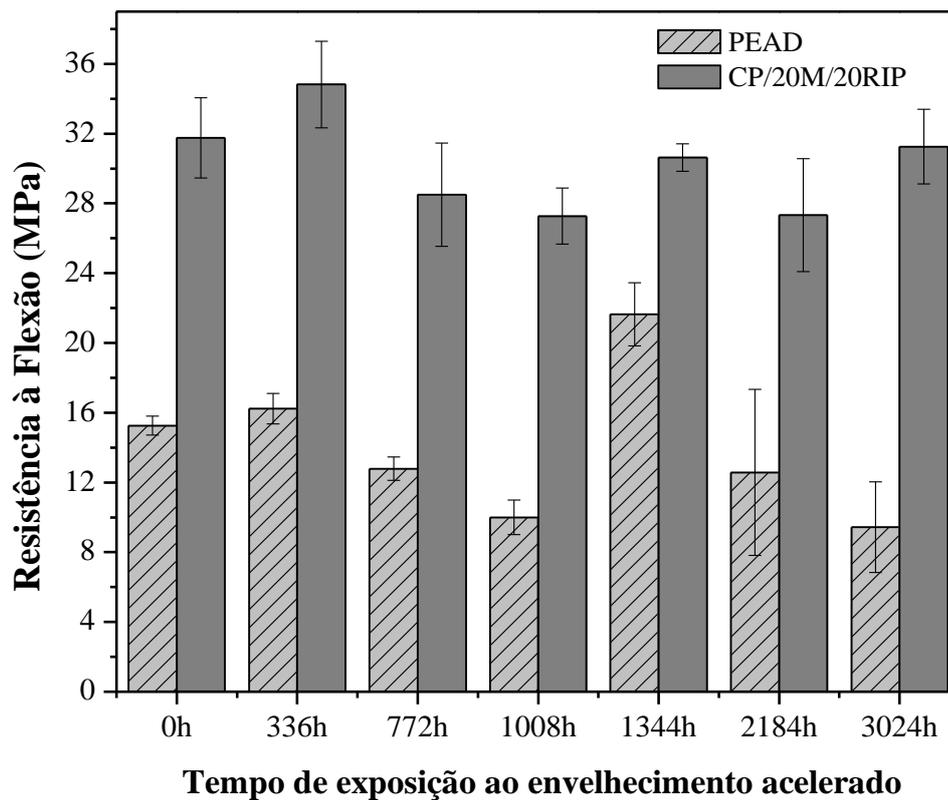


**Figura 17.** Superfície de resposta para a variável resistência à tração

### 5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

O planejamento experimental evidenciou que 40% de reforço (pó de madeira e pó de RIP) adicionado ao compósito proporcionaram as melhores propriedades mecânicas. Para validar os resultados obtidos, uma amostra com composição igual à considerada ótima (CP/20M/20RIP) foi processada e corpos de provas foram produzidos e caracterizados para avaliar a resistência à flexão, tração e ao impacto. As propriedades do compósito foram comparadas às do PEAD puro. Para obter equiparação nas análises, o PEAD foi extrusado e moldado por injeção para passar pelo mesmo processo termomecânico oxidativo o qual o material compósito foi submetido.

Também foram avaliadas as propriedades mecânicas do compósito após o envelhecimento acelerado em câmara UV, pelo período de 3024 h, sendo analisadas amostras nos tempos de 0, 336, 672, 1008, 1344, 2184, 3024 h. O intervalo de tempo foi estimado baseado em dados da literatura (KAMDEM *et al.*, 2004; MATUANA, L. M; JIN, S; STARK, N. M., 2011; SOCCALINGAME *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2015). A Figura 18 apresenta o resultado da resistência à flexão antes (0 h) e após o envelhecimento acelerado.



**Figura 18.** Resultados da resistência à flexão do PEAD e compósito CP/20M/20RIP antes e após o envelhecimento acelerado.

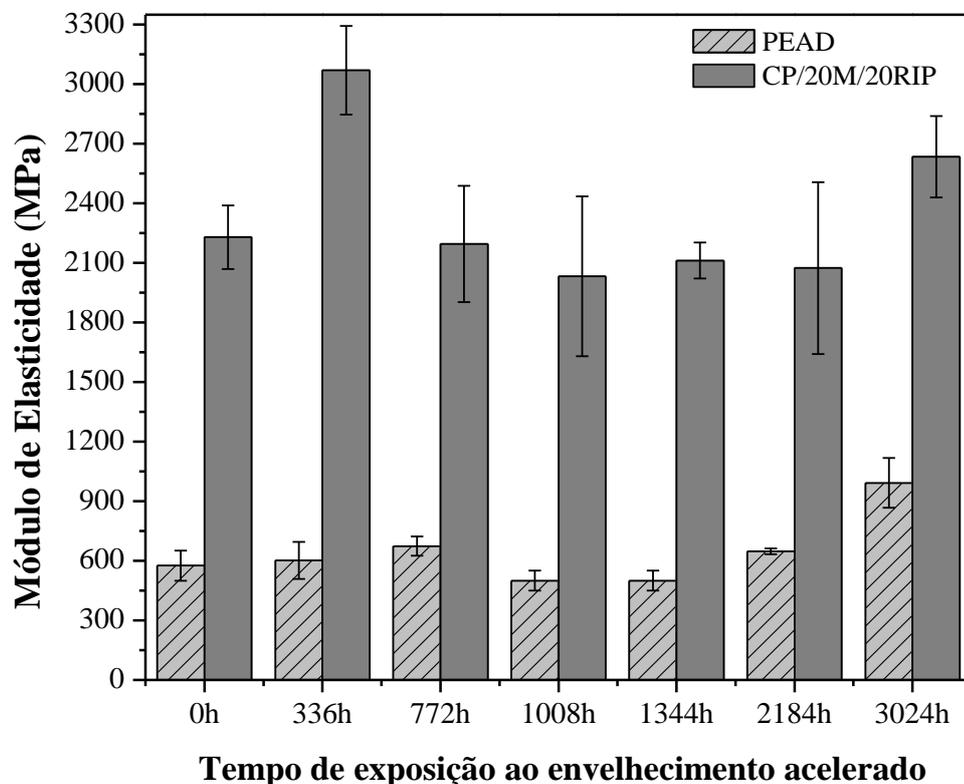
É possível verificar que a adição dos reforços resultou no aumento da resistência à flexão no compósito quando comparado ao PEAD. Tal resultado pode ser atribuído à presença dos particulados que reduzem a mobilidade das cadeias poliméricas, proporcionado pela adesão interfacial entre a matriz e os reforços, aumentando também a resistência de fletir do compósito. A forma geométrica dos reforços também tem influência, pois a forma de pós contribui para uma distribuição homogênea na matriz, através do efeito das forças cisalhantes durante o processo de extrusão (ANTICH *et al.*, 2006; KUO *et al.*, 2009; SOCCALINGAME *et al.*, 2015). Ashori (2010) e Tisserat *et al.* (2014) observaram que compósitos que sofreram a adição de partículas de madeira com tamanhos entre 200 a 400  $\mu\text{m}$ , apresentaram melhores propriedades mecânicas quando comparados a compósitos com partículas  $<75 \mu\text{m}$ . Isto pode ser atribuído ao fato de que as partículas menores possibilitam a formação de microfendas, propiciando a deformação antes de iniciar as fissuras (BOUAFIF *et al.*, 2009).

O aumento da resistência à flexão de 50% pode ser relacionado à composição estrutural da madeira, que contém um complexo de celulose, lignina e hemicelulose, considerado um polímero natural e que possui como propriedade intrínseca a flexibilidade. O reforço mineral por sua vez, proporcionou aumento de rigidez no material. A combinação das

propriedades dos reforços e a concentração das mesmas no compósito contribuiram para que se obtivesse aumento da propriedade de resistência à flexão (ANTICH *et al.*, 2006; LI *et al.*, 2012; MUSTATA; TUDORACHI; ROSU, 2012; YAO *et al.*, 2013).

Pode-se observar o efeito do envelhecimento acelerado em câmara UV sobre o PEAD e o compósito na Figura 18, após 3024h. No PEAD, no início do processo de envelhecimento acelerado, ocorre a reticulação das cadeias poliméricas, promovendo um aumento imediato da propriedade mecânica (SOCCALINGAME *et al.*, 2015). Essa característica do polímero pode ser observada na amostra após 336 h, onde ocorreu o aumento da resistência à flexão. Essa redução da propriedade mecânica não foi observada para as amostras de compósito e isso indica que os reforços particulados conferiu estabilidade ao intemperismo. Um dos reforços que contribui de forma direta para essa estabilidade é o pó de madeira, devido à lignina presente em sua composição, que atua como um antioxidante natural, impedindo a penetração de radiação UV (ABU-SHARKH & HAMID, 2004 PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

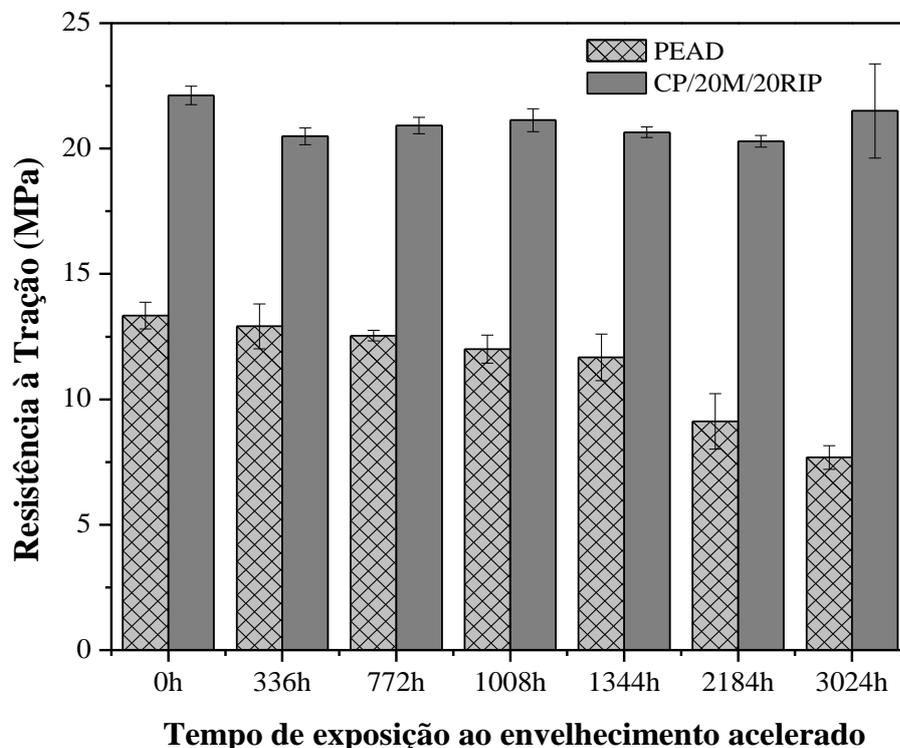
A Figura 19 apresenta o módulo de elasticidade das amostras de PEAD e do compósito CP/20M/20RIP antes e após o ensaio de envelhecimento.



**Figura 19.** Módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de resistência à flexão antes e após o envelhecimento acelerado.

Em relação ao módulo de elasticidade no ensaio de flexão, observa-se um aumento do módulo do compósito em relação ao PEAD, sendo mais efetiva a contribuição do pó de RIP, pois pertence à classe dos materiais cerâmicos e estes possuem maiores módulos elásticos, que possuem maior módulo de elasticidade em relação à matriz polimérica (YAO *et al.*, 2013; MISNON *et al.*, 2014). O módulo de elasticidade do PEAD e do compósito sofreram alterações após o envelhecimento acelerado. Na amostra após as 3024 h, houve um acréscimo do módulo para o PEAD e para o compósito, isto pode estar associado ao aumento da rigidez, devido ao processo de degradação do polímero (JOSEPH *et al.*, 2002a, SOCCALINGAME *et al.*, 2015).

Para o ensaio de tração, conforme Figura 20, houve acréscimo da resistência à tração no compósito, aproximadamente 65%, quando comparado à matriz. Esse aumento refere-se ao efeito da adição e por uma distribuição uniforme de reforço. A presença de reforços particulados, quando dispersos e homogêneos, resulta em uma transferência de tensão mais uniformemente distribuída, melhorando as propriedades de rigidez e resistência dos compósitos obtidos por meio do processo de injeção. Outro fator relevante é a composição da madeira que favorece o aumento dessa propriedade (ANTICH *et al.*, 2006; MIGNEAULT *et al.*, 2009; BORSOI, *et al.*, 2011; JAWAID *et al.*, 2011; ALBINANTE;PACHECO; VISCONTE, 2013; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

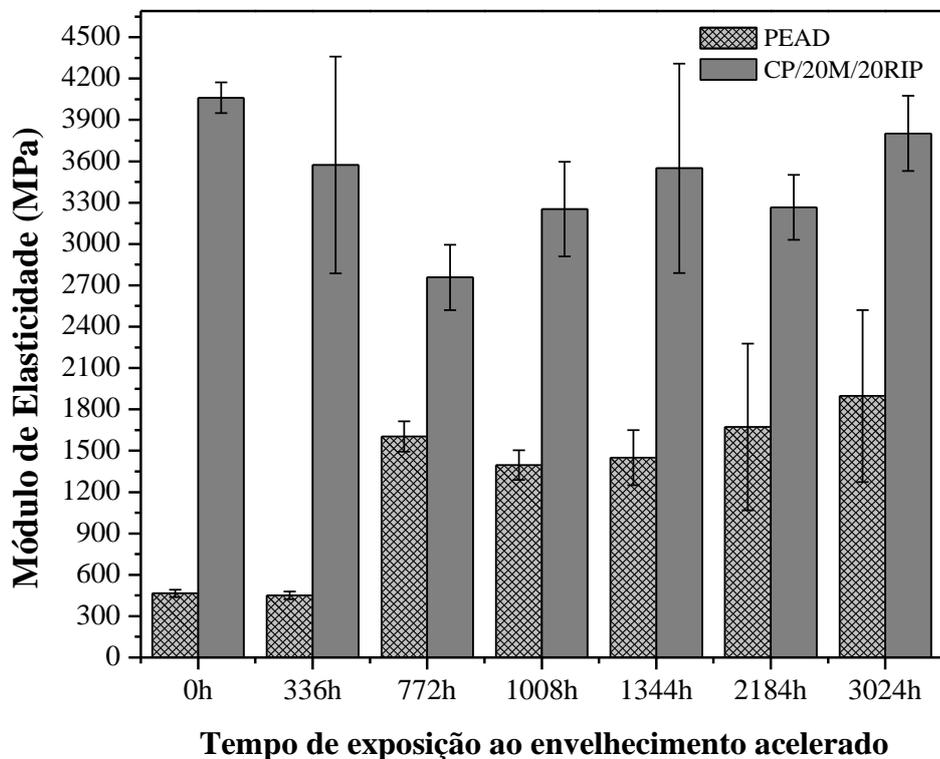


**Figura 20.** Resultado da resistência à tração do PEAD e compósito CP/20M/20RIP antes e após o envelhecimento acelerado.

A resistência à tração do PEAD foi reduzida devido ao aumento da rigidez proporcionada pelo efeito da radiação UV, enquanto, a amostra do compósito apresentou estabilidade dessa propriedade.

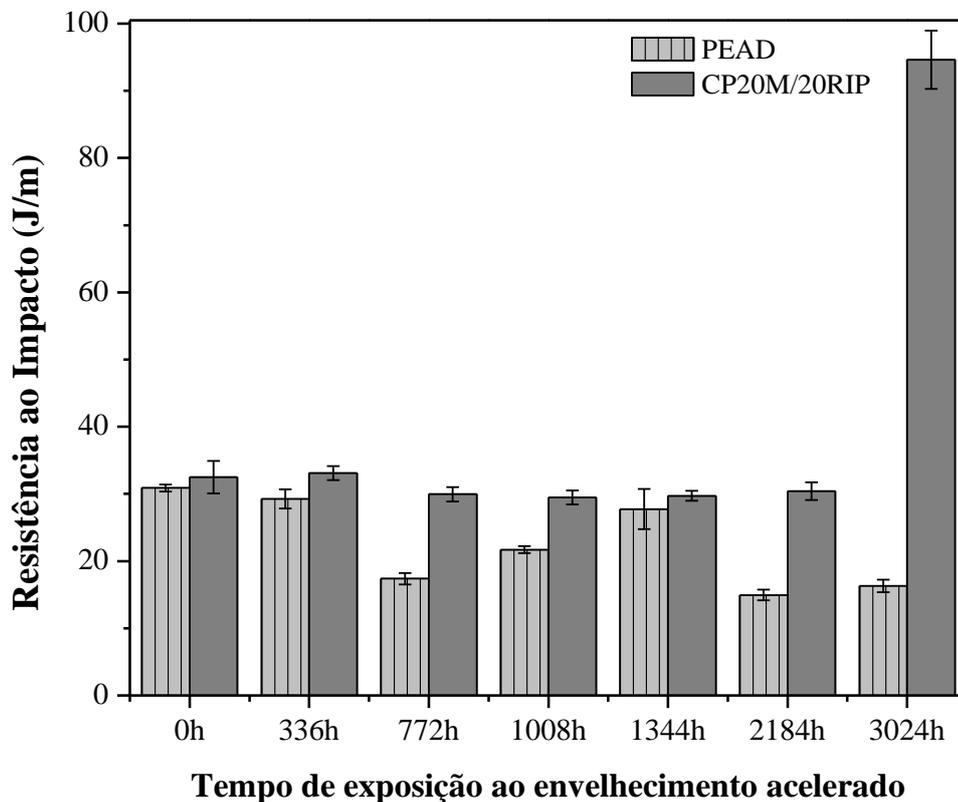
O módulo elástico no ensaio de tração dos compósitos, Figura 21 foi de 8 vezes superior à amostra de PEAD. O módulo de elasticidade está relacionado com a rigidez do material, assim, quanto maior o valor do módulo, mais rígido será o material e menor a deformação. Os reforços distribuídos de forma homogênea proporcionam um aumento no módulo de elasticidade, refletindo a capacidade das partículas e da matriz de transferirem as pequenas deformações elásticas sem fraturar na interface (SPINACÉ *et al.*, 2009; SHANG *et al.*, 2012).

O módulo de elasticidade do PEAD foi aumentado após a exposição ao envelhecimento acelerado, corroborando com os resultados apresentados na resistência à tração. O módulo elástico do compósito CP/20M/20RIP permaneceu superior ao PEAD após as 3024 h, entretanto em tempos intermediários, houve oscilação desses módulos, atribuído à possível variação do grau de cristalinidade do material.



**Figura 21.** Módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de resistência à tração antes e após o envelhecimento acelerado

A resistência ao impacto do PEAD e do compósito antes e após o ensaio de envelhecimento está apresentada na Figura 22. A adição dos reforços ao PEAD aumentou a resistência ao impacto do compósito, em relação polietileno puro. Antes do envelhecimento acelerado em câmara UV (0 h), a diferença não foi tão expressiva, mas após a exposição de até 3014 h a diferença tornou-se mais evidente. O PEAD sofreu degradação, aumentando sua rigidez e perdendo a capacidade de absorver energia. No compósito, o pó de madeira tratada com CCA, pó de RIP e PEgMA poderia estar proporcionando um efeito barreira, reduzindo a velocidade de degradação e dessa forma o envelhecimento acelerado em câmara UV não afetou a absorção de impacto do compósito. Após 3024 h, a resistência ao impacto do compósito apresentou um comportamento atípico (BEHZAD *et al.*, 2012; SHANG *et al.*, 2012; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

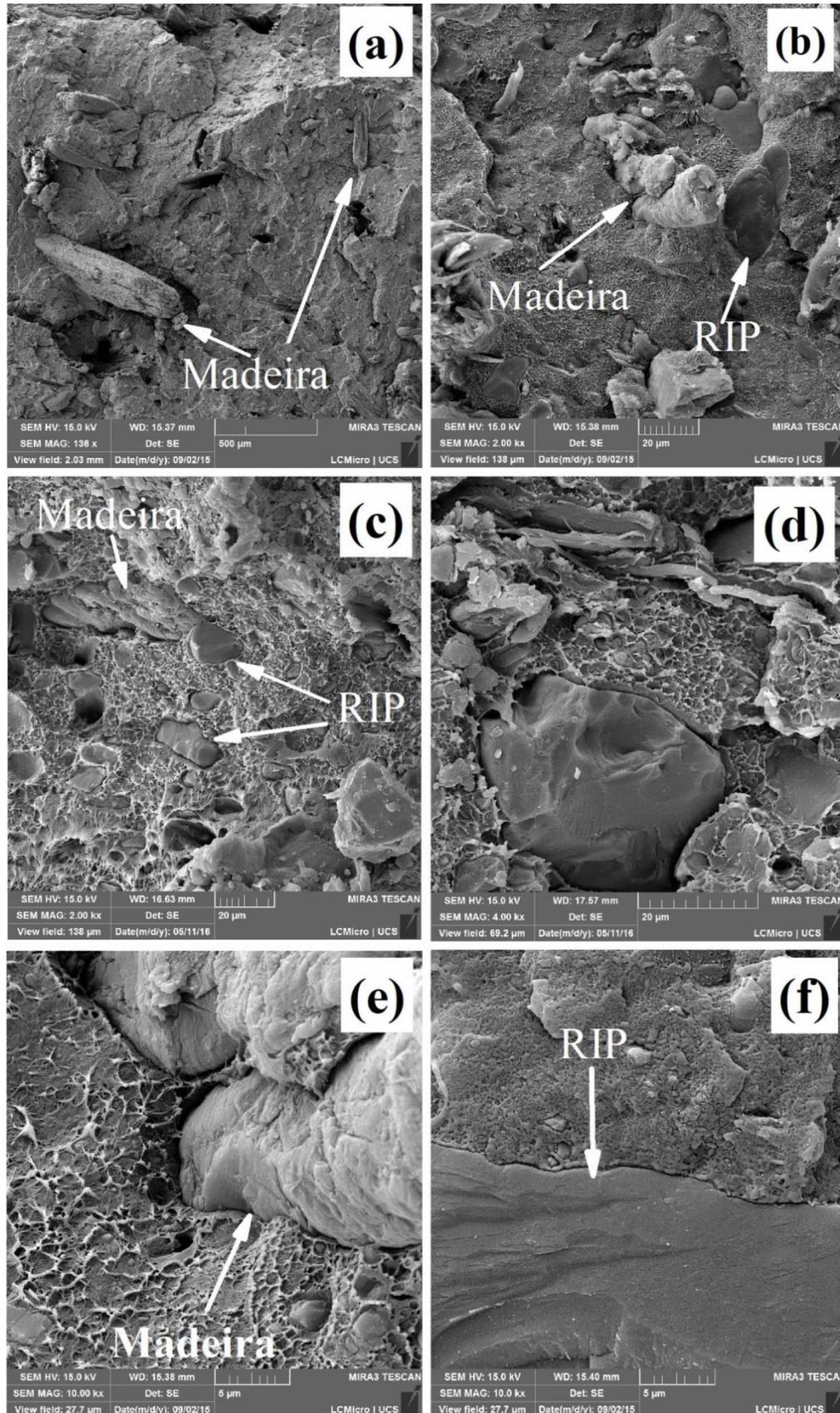


**Figura 22.** Resultado da resistência ao impacto antes e após o envelhecimento acelerado do PEAD e compósito.

#### 5.4 ANÁLISE MORFOLÓGICA

A morfologia do compósito com pó de madeira e de RIP em matriz de PEAD está apresentada na Figura 23. Na Figura 23(a), (b), (c) e (d) é possível verificar a distribuição dos reforços na matriz polimérica, a qual apresenta uma distribuição heterogênea, corroborando com o resultado da análise granulométrica.

A Figura 23 (e) apresenta a interface entre a matriz e as partículas de madeira tratada com CCA, sendo possível observar uma boa interação entre as fases. O PEADgMA foi adicionado com o intuito de melhorar essa interação, porque possui oligômeros funcionais com grupos polares que melhoram a afinidade entre as fases. No entanto, partículas de madeira tratadas com processos térmicos e químicos tendem a apresentar caráter hidrofóbico, fazendo com que o PEADgMA utilizado não tivesse total efeito na formulação (BEHZAD *et al.*, 2012; PÉREZ *et al.*, 2012; SHANG *et al.*, 2012). Segundo Kamdem *et al.* (2004), Oliveira *et al.* (2010), Wang *et al.* (2011) e Kocafe *et al.* (2015) os tratamentos químicos e térmicos na superfície de fibras favorecem o aumento do grau hidrofóbico dos materiais, possibilitando uma potencial incompatibilidade entre o reforço e a matriz. A Figura 23 (f) apresenta a boa interação entre a partícula de RIP e a matriz de PEAD.



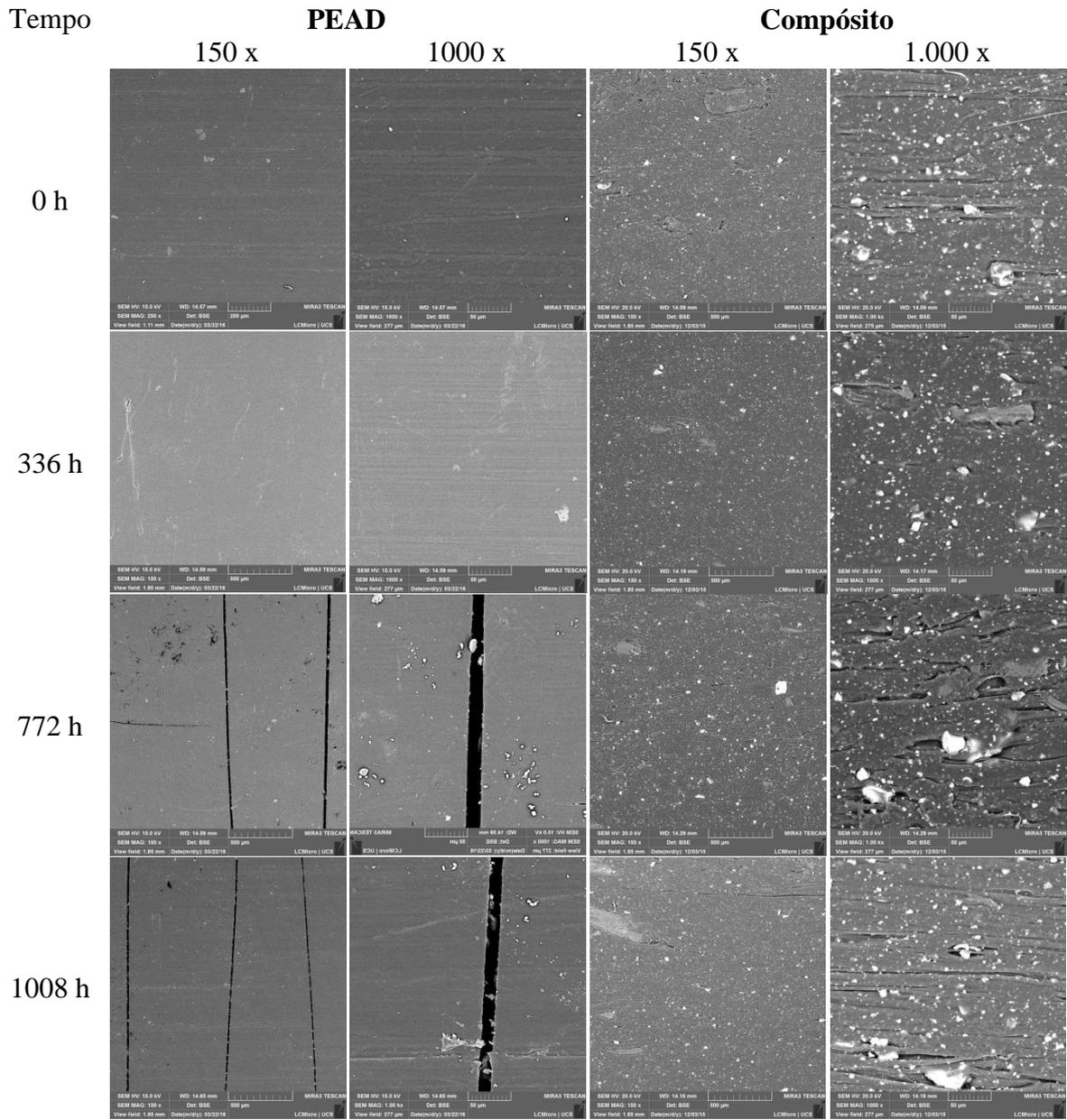
**Figura 23.** Micrografia por MEV-FEG da fratura do compósito com (a) ampliação 150x, (b) e (c) ampliação 2.000x, (d) ampliação 4.000x, (e) interface partícula de madeira/matriz com ampliação de 10.000x e (f) partícula de RIP/matriz com ampliação de 10.000x.

Nas Figuras 24 e 25 é possível observar o efeito do envelhecimento acelerado na superfície do PEAD e do compósito antes, durante e após as 3024 h horas de exposição. As micrografias das amostras antes do ensaio de envelhecimento, ou seja, a 0 h, mostram que a amostra de PEAD apresenta alguns pontos em destaques e esses são atribuídos a possível sujidade durante o processo de preparação das amostras. Para o compósito, é possível identificar as partículas do pó de madeira tratada com CCA e do pó de RIP na superfície, além de “linhas” ou ranhuras no sentido horizontal, referentes a possíveis desgastes do molde de injeção. Após as 336 h são evidenciados os primeiros sinais de degradação na superfície da amostra de PEAD, com a presença de fissuras no sentido vertical, que se propagam com o tempo de ensaio, sendo essa degradação intensificada a partir das 1344 h até 3024 h (Figura 25), que apresentou um aspecto de craquelamento e início de fragmentação superficial da amostra. Segundo Oliveira *et al.* (2012), a superfície degradada é resultado do processo de cisões moleculares formadas durante a exposição ao envelhecimento acelerado.

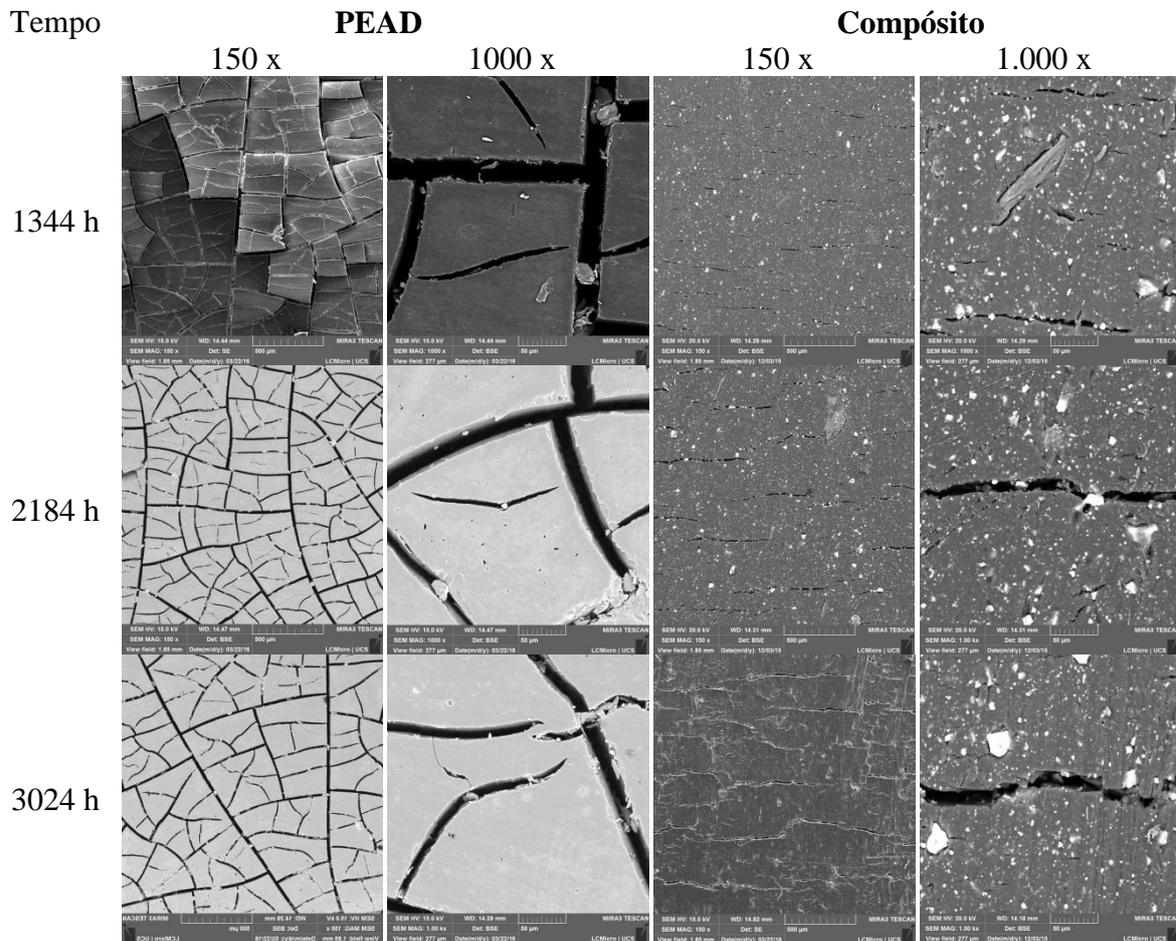
De acordo com Oliveira *et al.* (2012) a diminuição na resistência à tração ocorre pela formação de uma camada degradada frágil na superfície do corpo-de-prova devido às cisões moleculares formadas durante a degradação com exposição ao envelhecimento acelerado em câmara de UV, esta camada facilita a propagação da trinca para o interior da amostra.

Para as amostras do compósito, as primeiras evidências de degradação ocorreram após 1008 h de ensaio, apresentando microfissuras na superfície do compósito. Com o decorrer do ensaio, as fissuras aumentaram, apresentando maiores proporções após as 3024 h, conforme Figura 25. Apesar dessas evidências, as amostras dos compósitos, não apresentaram aspecto de craquelamento e fragmentação da amostra, como identificado nas amostras de PEAD após as 772 h, Figura 24.

Dessa forma é possível inferir que a fase reforço contribui de forma efetiva para reduzir o efeito fragmentação da amostra durante a degradação nos compósitos quando comparado ao PEAD puro.



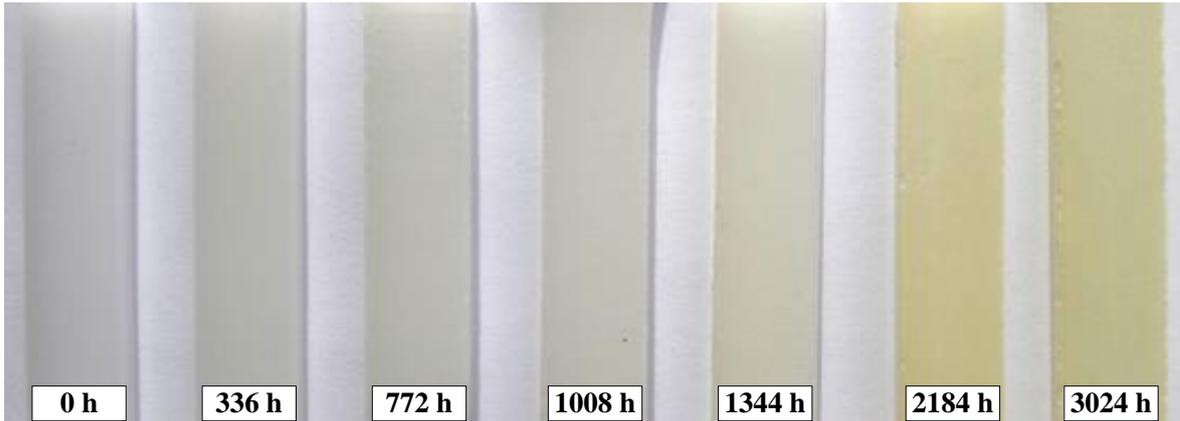
**Figura 24.** Micrografia por MEV-FEG da superfície das amostras de PEAD e compósito antes e após 1008 h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV; ampliação de 150x e 1.000x.



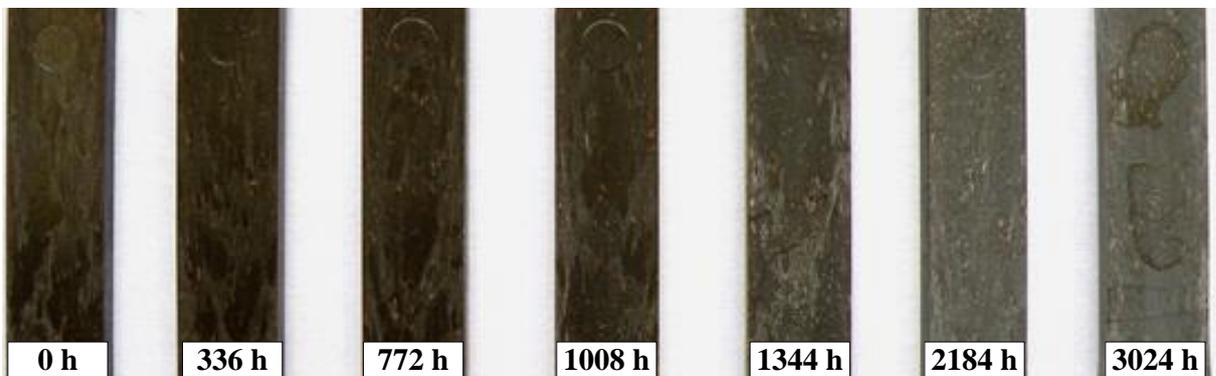
**Figura 25.** Micrografia por MEV-FEG da superfície das amostras de PEAD e compósito com 1344, 2184 e 3024 h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV e ampliação de ampliação 150x e ampliação 1.000x.

A Figura 26 e 27 apresentam as imagens fotográficas da superfície das amostras do PEAD e do compósito antes e após 3024 h de ensaio de envelhecimento. É possível observar a diferença de coloração castanha do compósito e branco do PEAD puro. Essa alteração é devido à degradação térmica da lignina durante os processos de extrusão e injeção.

A superfície da amostra de PEAD muda sua coloração de branca para amarelada, decorrente da incidência direta da radiação UV. Em intervalos intermediários de envelhecimento, após 772 h é possível identificar ranhuras na superfície da amostra, evidenciando efeitos de degradação do PEAD. O compósito CP/20M/20RIP após o ensaio de envelhecimento acelerado, alterou sua coloração apresentando aspectos esbranquiçados, relativo ao efeito dos raios UV na superfície da amostra.



**Figura 26.** Fotografias da superfície do PEAD com 0, 336, 772, 1008, 1344, 2184 e 3024 h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV.



**Figura 27.** Fotografias da superfície do compósito CP/20M/20RIP com 0, 336, 772, 1008, 1344, 2184 e 3024 h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV.

## 5.5 PROPRIEDADES TÉRMICAS DO COMPÓSITO

### 5.5.1 Calorimetria diferencial de varredura

Através dessa técnica foi possível determinar as temperaturas de fusão e o grau de cristalinidade da amostra de PEAD e do compósito CP/20M/20RIP, antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado e estão apresentados na Tabela 9.

As amostras de PEAD aumentaram a cristalinidade em 37% após exposto a 3024 h de ensaio, e esse aumento pode ser relacionado à redução da resistência à flexão e à tração (Figura 18 e 20). A variação do grau cristalino durante o envelhecimento conforme Tabela 9 é observado também no ensaio de resistência à flexão, sendo essa correlação mais evidente na amostra com 1008 h de exposição, devido ao aumento da cristalinidade tal propriedade mecânica foi reduzida. Outra evidência da mudança no grau cristalino do PEAD é o aspecto esbranquiçado na superfície do compósito, evidenciado pelas micrografias (Figura 25) e pela imagem fotográfica (Figura 26). A reticulação das cadeias poliméricas provocadas pelo

envelhecimento acelerado do PEAD resultou num aumento imediato dessa propriedade, evidenciada na Figura 18 (amostras 336 h) e corroborado com a redução do grau de cristalinidade (SOCCALINGAME *et al.*, 2015). A resistência à tração e o módulo de elasticidade (Figura 20 e 21), pode ser relacionado de forma direta com a cristalinidade do PEAD, ou seja, com a tendência de aumento da cristalinidade do PEAD a resistência à tração diminuiu, mas o módulo de elasticidade aumentou (HILLIG *et al.*, 2008; SEWDA & MAITI, 2010; GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2013). O aumento da cristalinidade do PEAD com o tempo de exposição ao UV maior do que o compósito infere que a degradação foi maior da fase amorfa no PEAD do que no compósito em estudo. Este comportamento é atribuído à barreira que o pó de madeira a luz UV, dificultando a sua penetração no interior do polímero.

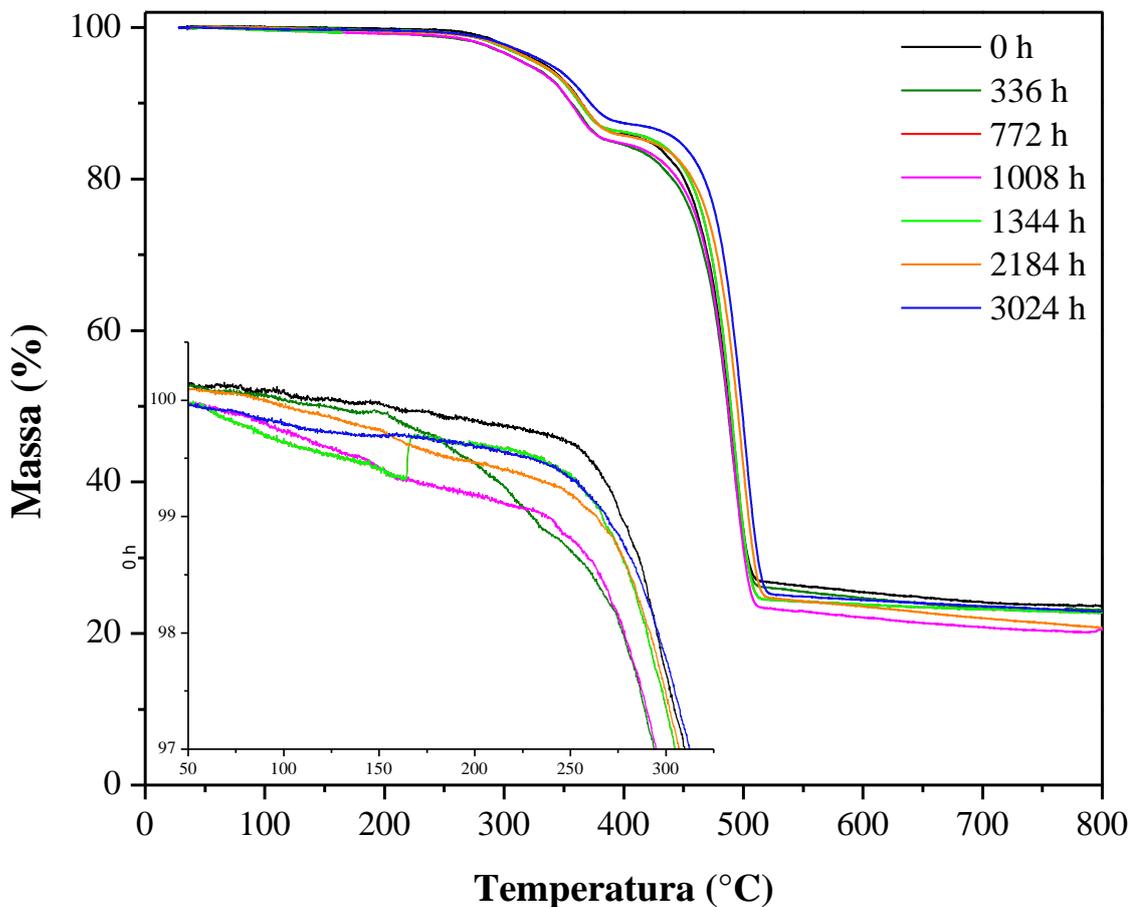
Pode-se observar que o compósito apresentou 5,84% de cristalinidade superior ao PEAD antes do ensaio do envelhecimento. Sua cristalinidade média foi de 52,75% após as 2034 h de envelhecimento acelerado, e reduziu abruptamente para 39,42% depois de 3024 h. O aumento de cristalinidade para o compósito infere que o pó da madeira e de RIP atuaram como agentes nucleantes, pois a presença dessas impurezas nos materiais poliméricos proporciona a formação de cristais em torno dos reforços, promovendo a adsorção de segmentos moleculares na superfície dos particulados, caracterizando um ponto de nucleação (PASQUINI *et al.*, 2008; GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2013; SOCCALINGAME *et al.*, 2015).

**Tabela 9.** Valores de cristalinidade, entalpia e temperatura de fusão para o PEAD e o compósito CP/20M/20RIP

Tempo de envelhecimento (h)	Amostras					
	PEAD			CP/20M/20RIP		
	H (J/g)	T <sub>m</sub> (°C)	X <sub>c</sub> (%)	H (J/g)	T <sub>m</sub> (°C)	X <sub>c</sub> (%)
0	124,91	136,46	45,09	84,65	132,17	50,93
336	113,61	135,05	41,01	89,03	135,71	53,57
772	107,89	136,92	38,95	94,19	137,98	56,67
1008	176,86	136,75	63,85	86,12	137,5	51,82
1344	120,76	135,1	43,59	84,48	134,8	50,83
2034	168,47	137,96	60,82	87,57	136,63	52,68
3024	171,28	136,36	61,83	65,51	136,17	39,42

### 5.5.2 Análise termogravimétrica do compósito

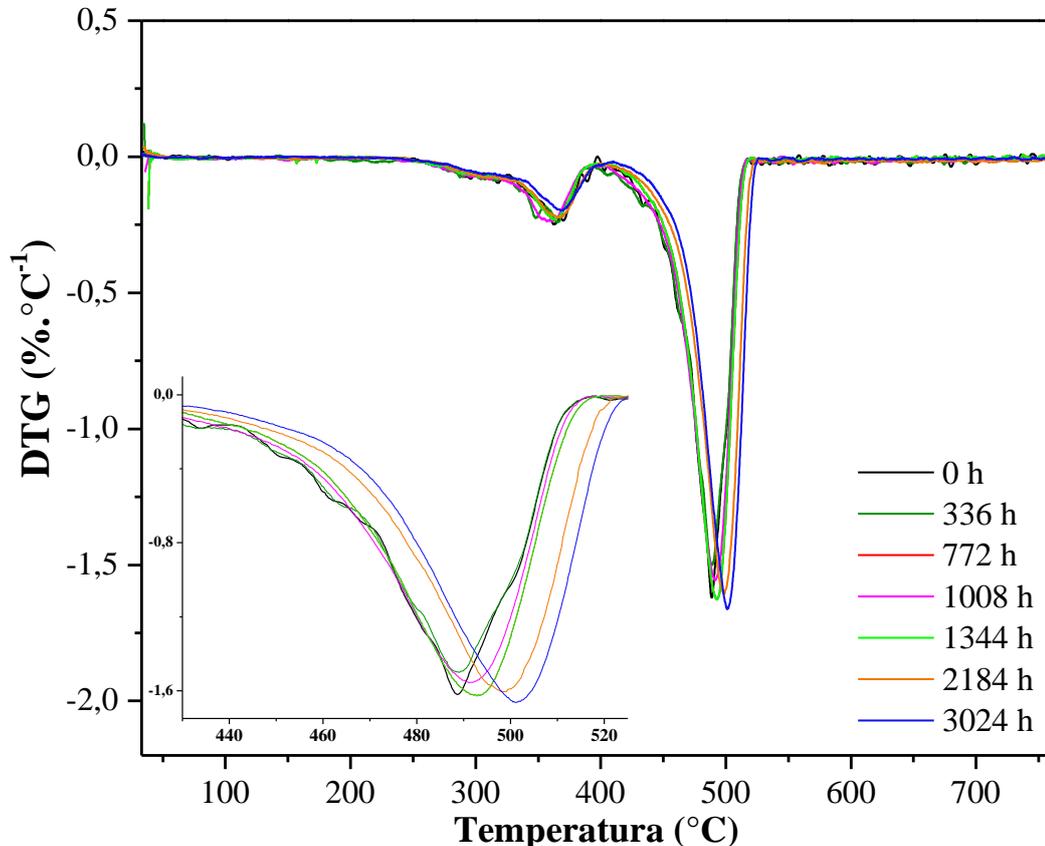
A curva termogravimétrica (TG) do compósito CP/20M/20RIP apresentou comportamento intermediário entre o PEAD e pó de madeira, sendo observado na Figura 28. As perdas de massa do compósito foram comparadas com as curvas TG da fase reforço e matriz (Figura 13). O compósito apresentou dois eventos térmicos distintos, com 76,32% de perda de massa. O primeiro evento de perda de massa iniciou em 251°C, com perda de massa de 13,87%, refere-se à degradação do pó da madeira. O segundo evento de perda de massa, com início em 396°C, e temperatura de degradação máxima em 484°C e com perda de massa de 62,45%, resultante da decomposição da matriz de PEAD. Em comparação com à madeira pura, o aumento da temperatura de degradação máxima para o compósito é atribuído à camada polimérica em torno da superfície dos reforços (LIU; WU; ZHANG, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2012; CHIRAYIL *et al.*, 2014; POLETTO; ZATTERA; SANTANA, 2014; JULIE CHANDRA; GEORGEA; NARAYANKUTTYA, 2016).



**Figura 28.** Análise termogravimétrica do compósito CP/20M/20RIP antes e após o envelhecimento acelerado em câmara UV.

É possível observar o efeito do envelhecimento acelerado em câmara UV nas propriedades térmicas do compósito. Em temperaturas inferiores a 300°C os compósitos expostos ao envelhecimento iniciam processo de perda de massa antes do compósito sem envelhecimento. Esta degradação está associada a degradação da celulose e que nos compósitos envelhecidos as partículas de pó de madeira estão mais expostas em função das microfissuras encontradas no compósitos, em especial os que possuem 3024 h. A partir dessa temperatura, a amostras com 3024 h de ensaio apresenta um aumento na estabilidade térmica, sobrepondo a curva sem exposição aos raios UV. Tais variações podem estar relacionadas à degradação da fase amorfa desta amostra, ou seja a amostra possui um teor de cristalinidade maior, dificultando a degradação térmica do polímero.

As curvas termogravimétricas derivadas (DTG) são apresentadas na Figura 29. É possível identificar o deslocamento em 12°C do pico da temperatura de degradação máxima da amostra com 3024 h de envelhecimento comparado a amostra não envelhecida. Esse deslocamento pode ser relacionado ao aumento da massa molar do PEAD, resultante do processo de degradação química (HINSKEN *et al.*,1991; NASCIMENTO & PINHEIRO, 2009).

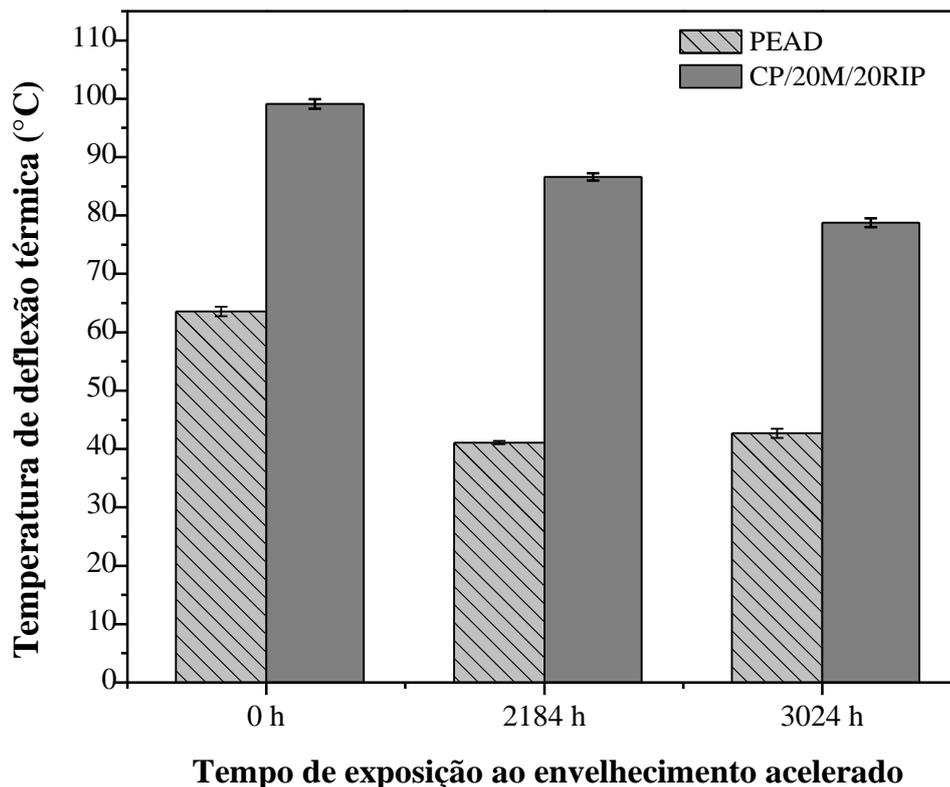


**Figura 29.** Curvas termogravimétricas derivada do compósito CP/20M/20RIP antes e após o envelhecimento acelerado em câmara UV.

### 5.5.3 Temperatura de deflexão térmica

A HDT mede a temperatura na qual um material (corpo de prova com área conhecida) que está sob tensão específica e uma taxa de aquecimento constante apresenta uma deflexão de 0,25 mm. É importante ressaltar que essa técnica tem como objetivo determinar a resistência térmica dos materiais sob cargas mecânicas, ou seja, a temperatura máxima de trabalho para um dado polímero, acima da qual o mesmo possivelmente não conseguirá desempenhar as funções para a qual foi projetado.

A Figura 30 apresenta os dados obtidos para a temperatura de deflexão térmica das amostras de PEAD e compósito em diferentes tempos de exposição ao ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV.



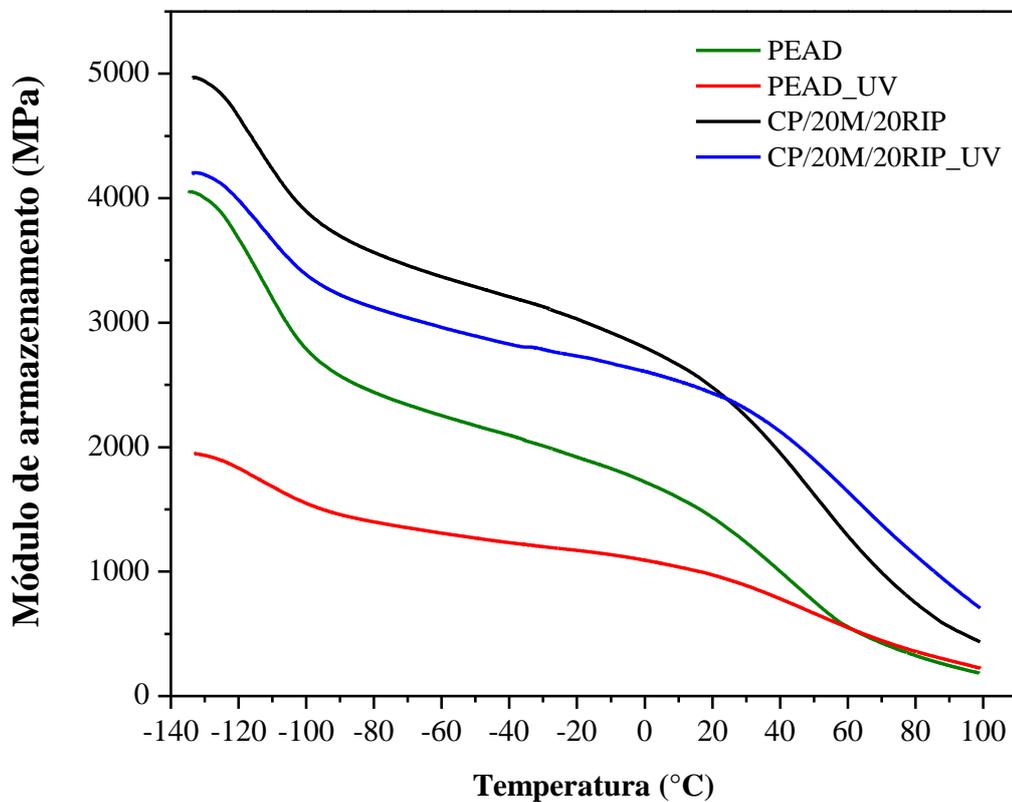
**Figura 30.** Temperatura de deflexão térmica das amostras de PEAD e compósito CP/20M/20RIP antes e após o ensaio de envelhecimento em câmara UV.

A presença dos reforços produziu um aumento no valor da temperatura de deflexão no compósito CP/20M/20RIP, com aumento de 55% antes do ensaio de envelhecimento e atingindo valores de 110%, após as 2184 h, quando comparado ao PEAD. Segundo Borsoi *et al.* (2011) e Garcia, Garmendia e Garcia, o aumento da HDT pode ser relacionado ao módulo de rigidez do material, quando ocorre um aumento deste, há também uma elevação da HDT.

Tal efeito também pode ser observado pela análise do tan delta e do módulo de elasticidade dos ensaios de resistência à flexão e tração. Para o compósito antes do envelhecimento, esse efeito resultou no aumento de mais de 35°C quando comparado ao PEAD. O envelhecimento provocou uma redução da HDT para o PEAD e compósito CP/20M/20RIP, e isso pode estar relacionado ao início da degradação superficial que os materiais sofreram.

#### 5.5.4 Análise Termo Dinâmico-Mecânico

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam o comportamento viscoelástico do PEAD e do compósito, antes e após as 3024 h de envelhecimento acelerado em câmara UV.



**Figura 31.** Módulo de armazenamento do PEAD e do compósito antes e após 3024 h no ensaio de em câmara de envelhecimento UV

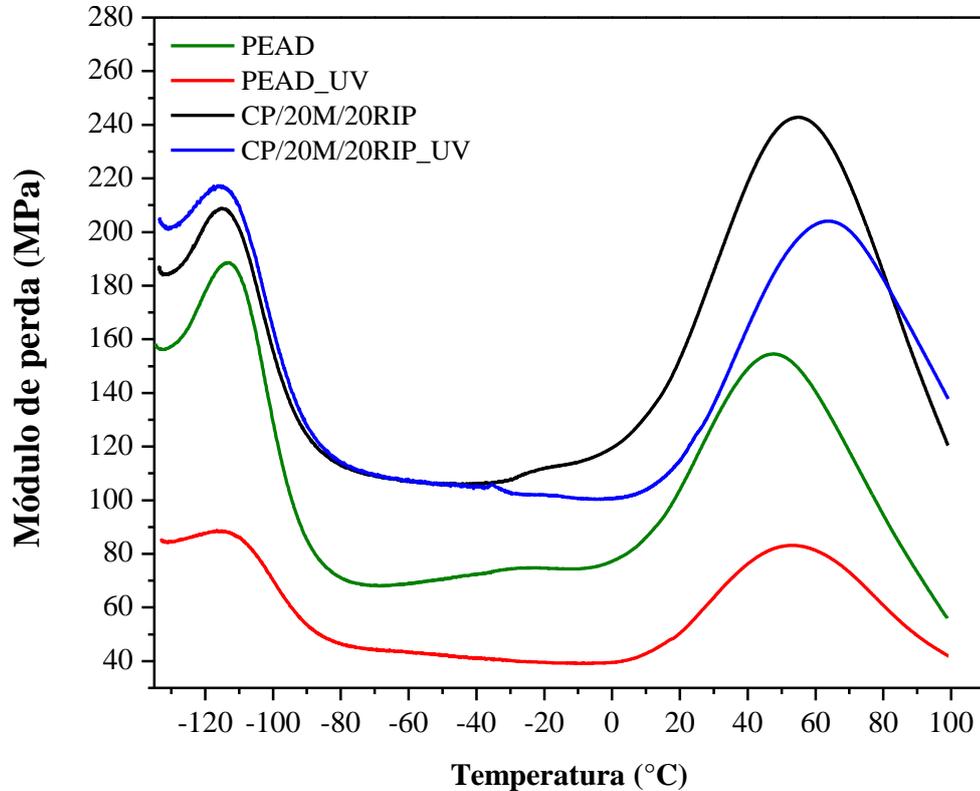
O módulo de armazenamento refere-se à capacidade do material de armazenar energia mecânica na forma de energia elástica e potencial (CASSU; FELIBSERTI, 2005). Conforme a Figura 31 é possível observar maior módulo de armazenamento para o compósito em todo o intervalo de temperatura, quando comparado ao PEAD antes e após o ensaio de envelhecimento. Em temperaturas negativas próximas a 135°C esse aumento é de

aproximadamente 23% e em temperaturas próximas a 20°C o valor atingido pelo compósito é superior ao PEAD em mais de 70%. O módulo de armazenamento de todas as amostras diminuiu com o aumento da temperatura e converge para um intervalo estreito em altas temperaturas. A redução do módulo de armazenamento com o aumento da temperatura é causada pelo amolecimento da matriz e ao início do processo de relaxação (POTHAN; OOMMEN; THOMAS, 2003; WU *et al.*, 2014; SABA *et al.*, 2016).

O módulo de armazenamento está associado com a resposta elástica do compósito e indica a rigidez do material. É uma propriedade inerente de um material, que está associada com a resposta molecular e, portanto, pode proporcionar uma melhor estimativa da interação dos particulados na matriz. O aumento do módulo de armazenamento do compósito ocorreu devido à limitação mecânica provocada pelos reforços, aumentando a rigidez e também pela adesão interfacial entre os particulados e a matriz. Dessa forma a mobilidade molecular das cadeias laterais do PEAD e a deformação foram reduzidas mesmo com o aumento da temperatura, devido às interações dos reforços no compósito (MOHANTY; VERMA; NAYAK, 2006; SEWDA e MAITI, 2007; HUANG *et al.*, 2012; SEWDA e MAITI, 2013; SABA *et al.*, 2016).

Na Figura 32 está apresentada a variação do módulo de perda em função da temperatura de -135 a 100°C. Observa-se duas regiões de transição dos materiais bem definidas, entre -130 a -90°C e a outra entre 10 e 100°C, a primeira transição é a transição vítrea – movimento cooperativo das cadeias. A segunda transição está associada a movimentação de cadeias secundárias onde a cooperatividade não é necessária. A região  $\beta$  não foi evidenciada devido à ausência (ou presença de uma quantidade insignificante) de conteúdo amorfo na região interfacial dentro da zona cristalina (NIELSEN, 1974; SEWDA e MAITI, 2013). Os valores do  $E''$  do compósito foram superiores aos do PEAD. Todas as amostras de materiais compósitos e PEAD apresentaram pico em torno de -115°C, este é relacionado ao pico de transição vítrea ( $T_g$ ) do material. O pico relacionado a transição  $\alpha$  ocorreu em aproximadamente 55°C para o compósito, antes do envelhecimento, e 65°C para o compósito, após o envelhecimento. O pico  $\alpha$  dos compósitos exibiu um relaxamento nas cadeias do PEAD com uma mudança para temperaturas mais elevadas, correspondente a dissipação viscosa devido ao atrito interno das duas fases. Para as amostras de PEAD antes e após o envelhecimento, esse pico foi evidenciado em temperaturas entre 50 e 55°C, respectivamente. Este pico refere-se ao relaxamento do PEAD que está em um processo complexo, do movimento molecular da região de PE cristalino (MATUANA;

BALATINECZ; PARK, 2004; MOHANTY; VERMA; NAYAK; 2006; WU *et al.*, 2014; SABA *et al.*, 2016).



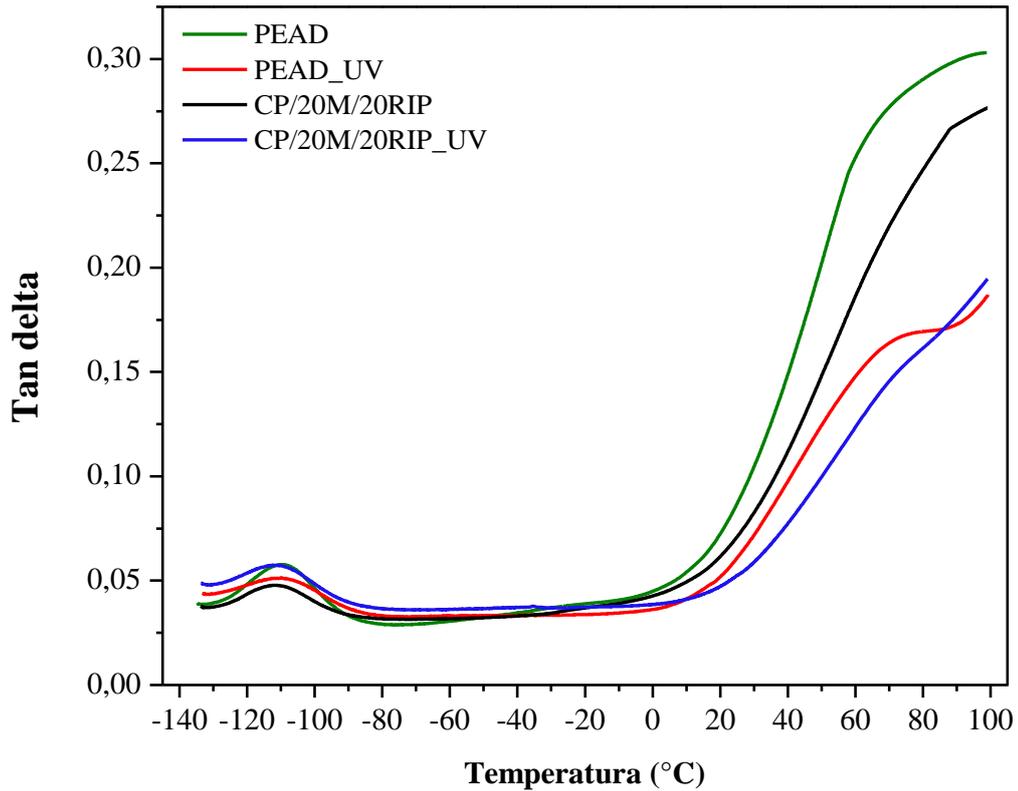
**Figura 32.** Módulo de perda das amostras de PEAD e do compósito antes e após 3024 h no ensaio de em câmara de envelhecimento UV

A temperatura de transição vítrea foi determinada como a temperatura máxima do pico do módulo de perda na região vítrea e os resultados estão apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10.** Valores da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), determinado pelo módulo de perda, do PEAD e Compósito antes e após 3024 h de envelhecimento

Amostra	$T_g$ (°C)
PEAD	-113
PEAD_UV	-116
CP/20M/20RIP	-115
CP/20M/20RIP_UV	-115

O tan delta mostra a diferença da resposta visco elástica dos materiais, que é a razão entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento. A Figura 33 mostra a variação do tan delta (amortecimento), em função da temperatura. A transição vítrea também pode ser observada na curva do tan delta, o que corrobora com as evidências mencionadas a partir do módulo de perda.

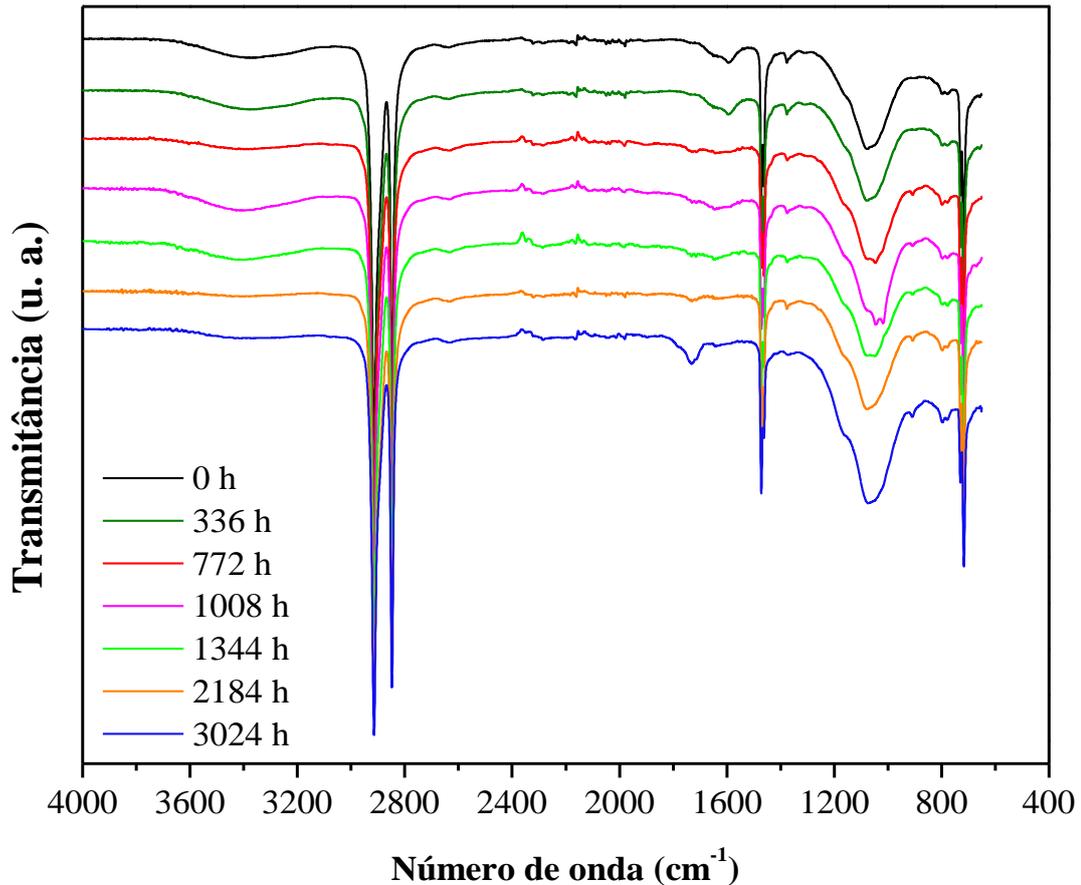


**Figura 33.** Tan delta das amostras de PEAD e do compósito antes e após 3024 h no ensaio de em câmara de envelhecimento UV

Acima da temperatura ambiente observa-se uma diferença na altura das curvas do tan delta. A curva do PEAD tornou-se proeminente a do compósito e o mesmo efeito foi percebido para as amostras de PEAD e compósito envelhecidas. Essa redução na altura do tan delta para o compósito está associada à presença dos reforços na matriz de PEAD, que age como uma barreira física entre as cadeias moleculares e que há processos de relaxação no compósito que não estão presentes na matriz. Além disso, a partir desse fenômeno é possível inferir que houve um grau de adesão interfacial, impedindo o amortecimento do polímero. A redução da altura do pico está associada a diminuição de absorção de impacto do compósito quando comparado ao PEAD (SABA *et al.*, 2016).

## 5.6 ANÁLISE DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER DO COMPÓSITO

A Figura 34 ilustra os espectros no infravermelho do compósito CP/20M/20RIP após 0, 336, 772, 1008, 1344, 2184 e 3024 h de envelhecimento acelerado.



**Figura 34.** Espectros no infravermelho da face do compósito após 0, 336, 772, 1008, 1344, 2184 e 3024 h de envelhecimento acelerado.

O material compósito apresentou um espectro constituído das várias bandas identificadas nas matérias-primas, conforme esperado. A exposição das amostras ao envelhecimento acelerado em câmara UV, na maioria das regiões apenas intensificou as bandas, como é o caso na região de 1100 a 1200  $\text{cm}^{-1}$ , relacionada à formação de instauração (C=C) devido ao processo de degradação. Nas regiões de comprimento de onda de 2915, 2847, 1470, 1460, 730 e 720  $\text{cm}^{-1}$  podem ser identificados os picos referentes ao PEAD. Após as 2184 h, as amostras apresentaram bandas relacionadas ao estiramento da ligação C=O em 1714  $\text{cm}^{-1}$ , sendo mais evidente na amostra após 3024 h comprovando a oxidação do compósito pela ação da irradiação. Essas evidências corroboraram com a alteração da cor do PEAD, do branco para o amarelo, observado após 2184 h do ensaio de envelhecimento, conforme Figura 26 e aspecto esbranquiçado observado nas micrografias (Figura 25) (STARK; MATUANA; CLEMONS, 2004; FABIVI *et al.*, 2011; GOMES *et al.*, 2011; TORRES; D'ALMEIDA; HABAS, 2011; DARABI *et al.*, 2012).

## 5.7 PROPRIEDADES FÍSICAS

### 5.7.1 Teor de umidade e Densidade

O teor de umidade foi calculado conforme a equação 3 e densidade do compósito CP/20M/20RIP pela equação 4, ambos estão apresentados na Tabela 11. O compósito apresentou uma densidade aparente 6,3% maior quando comparado ao PEAD puro ( $0,959\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). O valor é coerente, pois de acordo com a lei das misturas para compósito, a densidade aparente do compósito não pode ser inferior ou superior a dos materiais que a constituem (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010). Poletto *et al.* (2011), Zimmermann e Zattera (2013), Ayrilmis, Kaymakci, Guleç (2015), obtiveram densidades aparentes que variaram de 1,02 a  $1,55\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Essa variação está associada a espécie de madeira utilizada, ou do reforço inorgânico, além de considerar a escolha e parâmetros do processamento. Neste último fator, o tipo de processo pode provocar vazios e a temperatura de processo pode degradar a madeira, alterando a densidade do compósito.

**Tabela 11.** Propriedades físicas do compósito.

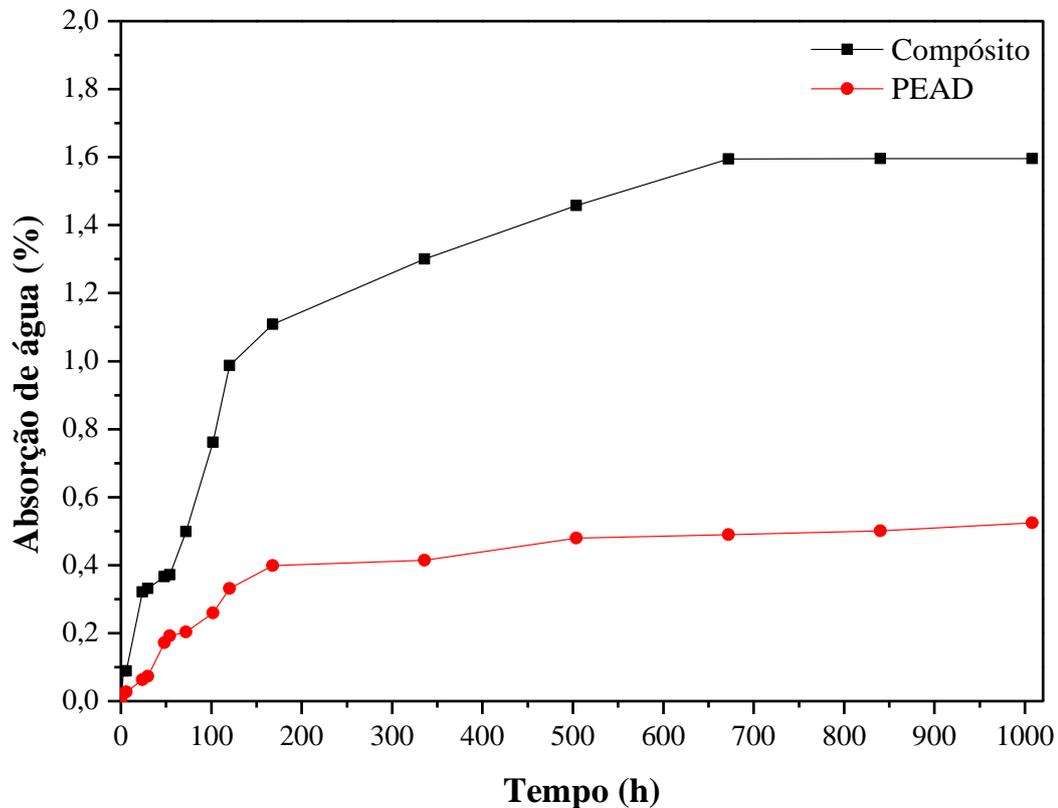
Amostra	Teor de umidade (%)	Densidade aparente ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
CP/20M/20RIP	$0,754 \pm 0,006$	$1,02 \pm 0,006$

O teor de umidade apresentado permite inferir que processo de obtenção por meio de extrusão e injeção proporcionou aos reforços aderência à matriz de PEAD, visto o baixo teor de umidade. A literatura registra valores de teor de umidade para compósitos com fibras vegetais de 2 a 14%, e afirma teores de umidade inferiores a estes, estão associados a uma boa molhabilidade da matriz aos reforços (NAFAJI e ENGLUD, 2013; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016).

### 5.7.2 Absorção de água

A Figura 35 apresenta o ensaio de absorção de água do compósito. A presença da madeira proporcionou maior absorção de água, devido ao caráter polar da celulose, pois os grupos hidroxilas têm facilidade em absorver água, aumentando a massa do compósito. O isolador elétrico cerâmico apresenta baixa absorção de água devido ao complexo de argila

plástica e feldspato (TAMRAKAR; LOPEZ-ANIDO, 2011; HOSSEINAEI *et al.*, 2012; GARCIA-DIAZC *et al.*, 2016; PAN; ZHONG, 2016).



**Figura 35.** Resultado da absorção de água para amostra de PEAD e compósito.

A curva de absorção do compósito apresentou um comportamento linear nas primeiras 24 h, absorvendo 0,32% de água e após, um comportamento logarítmico com máximo de absorção de 1,59% de água com 700 h de ensaio, posterior a esse tempo o compósito não absorveu mais água. Yang *et al.* (2015) produziram WCP com 30% de farinha de madeira, e após 24 h de imersão, apresentou 0,70 de absorção e explicou que a taxa de absorção está relacionado a interação dos grupos hidroxilas das fibras com água, e com a fração de fibras utilizadas, quanto maior a quantidade, maior será a massa de água absorvida. Carvalho, Moraes, Almeida (2009) avaliaram a absorção de água em compósitos híbridos de algodão, sisal e juta, com 19 % de reforço e após imersão por 150 h, apresentou 1,5% de absorção de água. Relataram que além do volume de fibras adicionado ao compósito, a seleção dos parâmetros e o tipo do processamento influência essa propriedade. Huner (2015) produziu compósito com matriz de resina epóxi reforçada com 1, 5 e 10 % de fibras de linho, e após 24 h de ensaio absorveram 0,8, 0,85 e 0,89% de água. Kamal, Pang, Staiger (2008), produziu compósito com PEAD e farinha de madeira de *Pinus radiata*, em diversas proporções com adição de agente de acoplamento, e observou que os compósitos com 30 e 40% de madeira

apresentaram 0,39 e 0,94 % de absorção de água após 2 h de ensaio e 0,98 e 2,14% após 24 h, respectivamente. Segundo Kamal, Pang, Staiger (2008), a diferença entre a taxa de absorção da matriz de PEAD e da madeira está relacionado à composição de cada material, pois as fibras lignocelulósicas possuem lúmens, que são poros muito finos, e sítios de ligação de hidrogênio, além da presença das hidroxilas e grupos polares, constituintes da farinha de madeira (STOKKE & GARDNER, 2003).

A amostra de PEAD não apresentou comportamento linear no início da absorção e estabilizou com 0,52 % em 1008 h. Com 500 h de ensaio a amostra de PEAD absorveu 0,48%, sendo uma diferença desprezível quando comparada a absorção final, considerando que levou o dobro do tempo.

A baixa absorção de água no compósito está relacionada a uma boa aderência dos reforços à matriz, visto através das micrografias da fratura e também pelo aumento das propriedades mecânicas do compósito. A incompatibilidade entre as fases provoca o surgimento de vazios e fissuras, deixando os reforços com área livre para absorver umidade (ARAÚJO; WALDMAN; DE PAOLI, 2008; LA MANTIA; MORREALE, 2011; KAKOU *et al.*, 2014; PICKERING; ARUAN EFENDY; LE, 2016). A amostra de PEAD absorveu menos água devido às ligações de sua estrutura química, com caráter apolar, proporcionando propriedades como a impermeabilidade a água ao polímero.

## 5.8 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO

As concentrações do As, Cu, Cr e Pb obtidas a partir do ensaio de lixiviação estão apresentados na Tabela 12. Foram submetidas ao ensaio 3 amostras do compósito CP/20M/20RIP, uma antes do ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV e as demais após 1344 h e 3024 h.

**Tabela 12.** Resultados da análise do extrato obtido no ensaio de lixiviação conforme ABNT NBR 10.005/04 e comparação ao limite máximo permitido segundo anexo F da NBR 10.004/04

Parâmetros	Concentração no lixiviado antes do envelhecimento (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentração no lixiviado após 1344h de envelhecimento (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentração no lixiviado após 3024h de envelhecimento (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentração máxima no lixiviado (mg.L <sup>-1</sup> )
Cobre	0,626	1,94	2,29	-
Cromo	0,225	0,868	0,998	5,0
Arsênio	0,101	0,294	0,314	1,0
Chumbo	0,678	0,340	0,692	1,0

As concentrações dos elementos no extrato dos lixiviados antes, durante e após ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV foram inferiores à concentração limite permitida, conforme anexo F da NBR 10.004/04. O elemento Cu não foi comparado, porque não há parâmetros disponíveis na legislação. A molhabilidade da matriz em relação aos reforços, contribuiu de forma efetiva para o encapsulamento do As, Cu, Cr e Pb no compósito, o que também resultou em excelentes propriedades mecânicas. Dessa forma, o material compósito passa a pertencer à classe dos materiais não perigosos (Classe II), segundo a classificação apresentado pela norma NBR 10.004/04.

As concentrações do As, Cu, Cr e Pb obtidas no extrato solubilizado do compósito antes, durante (após 1344 h) e após 3024h de ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV estão apresentadas na Tabela 13.

**Tabela 13.** Resultados da análise do extrato obtido no ensaio de solubilização conforme ABNT NBR 10.006/04 e comparação ao limite máximo permitido segundo anexo F da NBR 10.004/04

Parâmetros	Concentração no solubilizado antes do envelhecimento (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentração no solubilizado após 1344h de envelhecimento (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentração no solubilizado após 3024h de envelhecimento (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentração limite máxima no solubilizado (mg.L <sup>-1</sup> )
Cobre	3,39	5,70	6,01	2,0
Cromo	3,43	4,58	5,16	0,05
Arsênio	1,36	1,67	1,98	0,01
Chumbo	0,0662	0,206	0,518	0,01

As concentrações no extrato do ensaio de solubilização foram superiores aos limites dos padrões para o ensaio de solubilização. A concentração solubilizada foi mais expressiva, quando comparada ao lixiviado, pois a solução preservante utilizada na madeira é hidrossolúvel e, por conseguinte, apresenta maior afinidade com a água, resultando na solubilidade dos elementos químicos do compósito. Dessa forma, após a vida útil do material compósito este deverá ser destinado como resíduo Classe IIA - não perigoso e não inerte. Embora tenha sido realizado ensaio de solubilização, a característica de combustibilidade inerente ao compósito já o enquadraria na referida classe.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

- É possível produzir compósitos de PEAD/Madeira-CCA/RIP com boas propriedades mecânicas a partir do reaproveitamento dos resíduos da companhia de distribuição de energia elétrica.
- A análise estatística evidenciou a formulação ótima do compósito com 20% de pó de RIP, 20% de pó de madeira tratada com CCA e 60% de PEAD, denominada CP/20M/20RIP.
- O compósito apresentou melhores propriedades mecânicas em relação ao polímero puro e a WPC que consta na literatura, com aumento de aproximadamente 50% na resistência à flexão e 65% na resistência à tração.
- As micrografias da fratura criogênica do compósito evidenciaram uma boa interação interfacial da matriz aos reforços, promovendo aderência entre as fases.
- O envelhecimento acelerado apresentou sinais de degradação no PEAD e no compósito, no entanto os reforços adicionados proporcionaram uma maior resistência às intempéries, impedindo a propagação das trincas e evitando reduções bruscas nas propriedades mecânicas e viscoelástico dos compósitos, quando comparado ao PEAD puro.
- A temperatura de distorção térmica foi aumentada pela adição dos pós de madeira e RIP, possibilitando maior temperatura de aplicação nos compósitos. O ensaio de HDT e DMA evidenciaram que é possível utilizar os compósitos em aplicações em temperaturas mais elevadas em relação ao PEAD puro.
- O compósito produzido a partir de resíduos contaminado de madeira, a partir dos testes de lixiviação é classificado como resíduo não-perigoso – classe IIA, não inerte, conforme NBR 10.004/04. Desta forma a metodologia desenvolvida é adequada para a destinação final destes resíduos.
- A produção de compósitos poliméricos a partir de resíduos de madeira com CCA e com partículas de RIP mostrou-se uma alternativa viável, visto que possibilita a destinação tecnológica do resíduo, agregando valor ao material. Promove o desenvolvimento sustentável, demonstrando ser alternativa de melhor reaproveitamento dos recursos de forma equilibrada, além de possibilitar a geração de renda.

## REFERÊNCIAS

- ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas.** Anuário estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010. Brasília, 2011. 130 p.
- ABRUZZI, R. C.; PIRES, M. R.; DEDAVID, B. A.; KALIL, S. B. Relação das propriedades mecânicas e densidade de postes de madeira de eucalipto com seu estado de deterioração. **Revista Árvore**, v.36, n.6, p.1173-1181, 2012.
- ABU-SHARKH, B. F.; HAMID, H. Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis. **Polym Degrad Stab**, v. 85, n. 3, p. 967-973, 2004.
- ALBINANTE, S. R.; PACHECO, E. B. A.; VISCONTE, L. L. Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. **Quim. Nova**, v. 36, p. 114, 2013.
- ALMEIDA JUNIOR, J. H. S.; ANGRIZANI, C. C.; AMICO, S. C.; AMADO, F. D. R. Comportamento mecânico e térmico de compósitos de fibra de vidro sob diferentes temperaturas de cura. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 13, n. 1, p. 20-28, 2012.
- ANTICH, P.; VÁZQUEZA, A.; MONDRAGONB, I.; BERNAL, C. Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers. **Composites: Part A**, v. 37, p. 139–150, 2006.
- ANUNCIACÃO, E. B. B. **Formulação de massas cerâmicas para porcelanas elétricas utilizando resíduos oriundos de corpos de fusíveis.** 2013. 165f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2013.
- ARAÚJO, J. A.; SOARES, M. M.; SILVA, S. F. L.; CASQUEIRA, R. G.; COSTA, D. A. Membranas poliméricas de PE-g-MA-Al/AIPO<sub>4</sub> impregnado com Fe, Al - utilização na recuperação de efluentes de galvanoplastia. **Polímeros**, v. 24, n. 1, p.101-109, 2014.
- ARAÚJO, J. R.; WALDAMN, W. R.; DE PAOLI, M. A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, p. 1770–1775, 2008.
- ASHBY, M. F.; RÉCHET, Y. J. Designing hybrid materials. **Acta Materialia**, v. 51, n. 19, p. 5801-5821, 2003.
- ASHORI, A. e NOURBAKHS, A. Reinforced polypropylene composites: effects of chemical compositions and particle size. **Bioresources. Technology**, v. 101, p. 2515–2519, 2010.
- ASHORI, A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries! **Bioresour. Technol.**, v. 99, p. 4661-4667, 2008.
- ASHORI, A.; BEHZAD, H. M.; TARMIAN, A. Effects the chemical preservative treatments on durability of wood flour/HDPE composites. **Composites: Part B**, v. 47, p. 308-313, 2013.

ASSIS, O. B. G. Alteração do caráter hidrofílico de filmes de quitosana por tratamento de plasma de HMDS. **Quim. Nova**, v. 33, n. 3, p. 603-606, 2010.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ P. **Ciencia e ingeniería de los materiales**. México: Ed. Thomson, 3 ed., 2004.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA**. 2011. Informações Técnicas – Processos de fabricação. Disponível em:< <http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=50>>. Acesso em 28 mai. 2016.

AYRILMIS, N. Combined effects of boron and compatibilizer on dimensional stability and mechanical properties of wood/HDPE composites. **Composites: Part B**, v. 44, n. 1, p. 745–749, 2013.

AYRILMIS, N.; KAYMAKCI, A.; GÜLEÇ, T. Potential use of decayed wood in production of wood plastic composite. **Industrial Crops and Products**, v. 74, p. 279–284, 2015.

BAILEY, D. S. **The Feasibility of Recycling CCA Treated Wood From Spent Residential Decks**. 2003. 221 f. Masther Thesis. Faculty of Virginia Polytechnic Institute, State University at Blacksburg, Virginia, 2003.

**Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social –BNDES**. 1996. Disponível em:< [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/relato/peadx.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/relato/peadx.pdf)>. Acesso em 02 jun. 2015.

BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento e meio ambiente: as estratégias de mudança da agenda 21**. Petrópolis: Vozes, 2007, 157p.

BARBOSA JÚNIOR, V; RAMIRES, E. .C; RAZERA, I. A. T; FROLLINI, E. Biobased composites from tannin–phenolic polymers reinforced with coir fibers. **Industrial Crops and Products**. v. 32, n. 32, p. 305-312, 2010.

BEHZAD, H. M.; ASHORI, A.; TARMIAN, A.; TAJYDI, M. Impacts of wood preservative treatments on some physico-mechanical properties of wood flour/high density polyethylene composites. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 246–250, 2012.

BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de Pinus sp com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona**. 2011. 128f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2011.

BERTOLINI, M. S., *et al.* Painéis de partículas provenientes de rejeitos de *Pinus* sp. tratado com CCA e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.2, p.339-346, 2014.

BERTOLINI, M. S.; NASCIMENTO, M. F.; LAHR, F. A. R. Rejeitos de espécies de reflorestamento tratadas com preservantes CCA e CCB empregados em painéis de partículas. **In: Workshop de Integração da rede de Pesquisa INOVATEC FINEP [Polo USP]**. 1º, 2012, Pirassununga/SP.

BLEDZIK, A. K.; LETMAN, M.; VIKSNE, A.; RENCE, L., A comparison of compounding process and wood type for wood fiber-pp composites, **Composites: Part A**, v.36, p.789-797, 2005.

BORGES, C. C.; MORESCHI, J. C. Potencialidade do uso de cruzetas de madeira tratada no Brasil. **Floresta**, v. 43, n. 2, p. 313-326, 2013.

BORSOI, C. *et al.* Obtenção e Caracterização de Compósitos Utilizando Poliestireno como Matriz e Resíduos de Fibras de Algodão da Indústria Têxtil como Reforço. **Polímeros**, v. 21, p. 271, 2011.

BOUAFIF, H.; KOUBA, A.; PERRÉ, P.; CLOUTIER, A. Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. **Composites: Part A**, v. 40, p. 1975–1981, 2009.

**BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. República Federativa do Brasil, Brasília, DF.

**BRASIL.** Ministério do Meio Ambiente. Resíduos Sólidos. 2010. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos>>. Acesso em 07 jul. 2015.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.

BRITO, I. P.; ALMEIDA, E. P.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; SILVA, V. J.; SANTANA, L. N. L. Avaliação de novos depósitos de argilas do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica**, v. 61, n. 360, p. 391-398, 2015.

BROSTOW, W.; DATASHVILI, T.; JIANG, P.; MILLER, H. Recycled HDPE reinforced with sol-gel silica modified wood sawdust. **European Polymer Journal**, v. 76, p. 28–39, 2016.

CAETANO, M. J. L. **A importância relativa dos Materiais.** CTB BORRACHA. Disponível em:<[http://ctborracha.com/?page\\_id=442](http://ctborracha.com/?page_id=442)>. 2014. Acesso em 20 set. 2015.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o statistica.** Rio de Janeiro: E-Papers, 260 p, 2003.

CALLISTER JR, W. D; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**, 8th ed. New York: John Wiley & Sons, 2010, 626-672p.

CAMPOS, M. A. **Análise microestrutural e das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas e concretos com isoladores elétricos de porcelana.** 2011. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

CANEVAROLO JR; S. V. **Ciência dos polímeros: um teste básico para tecnólogos e engenheiros.** São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CARRER, D. Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC. **Pesquisa alerta para perigo de liberação de elementos tóxicos na queima de madeira tratada com CCA**. 2013. Disponível em:< <http://www.fapesc.sc.gov.br/1904-pesquisa-alerta-para-perigo-de-liberacao-de-elementos-toxicos-na-queima-de-madeira-tratada-com/>>. Acesso em 29 out. 15.

CARUS, M.; EDER, A.; DAMMER, L.; KORTE, H.; SCHOLZ, L.; ESSEL, R.; BREITMAYER, E.; BARTH, M. Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets and Future Trends. **Nova-Institut GmbH**, v. 3, p. 1-16, 2014.

CARVALHO, G. M. X.; MANSUR, H. S.; VASCONCELOS, W. L.; OREFICE, R. L. Obtenção de compósitos de resíduos de ardósia e polipropileno. **Polímeros**, v. 17, n.2, p.98-103, 2007.

CARVALHO, L. H.; MORAES, S.; D'ALMEIDA, J. R. M. Influence of Water Absorption and Pre-drying Conditions on the Tensile Mechanical Properties of Hybrid Lignocellulosic Fiber/Polyester Composites. **Journal of Reinforced plastics and composites**, v. 28, n. 16, p. 1921-1932, 2009.

CHIRAYIL, C. J.; JOY, J.; MATHEW, L.; MOZETIC, M.; KOETZ, J.; THOMAS, S. Isolation and characterization of cellulose nanofibrils from Helicteres isora plant. **Industrial Crops and Products**, v. 59, p. 27–34, 2014.

CLEMONS, C. Plastic-wood composites in the United States. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 6, p-10-18, 2002.

**CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA – CRQ 13ª Região**. 2012. Curiosidades e Cuidados com Madeiras Tratadas. Disponível em:< [http://www.crqsc.gov.br/templates/\\_175/noticia\\_visualizar.jsp?idEmpresa=60&idNoticia=7591&idUser=1713180&idCategoriaNoticia=0&area=1](http://www.crqsc.gov.br/templates/_175/noticia_visualizar.jsp?idEmpresa=60&idNoticia=7591&idUser=1713180&idCategoriaNoticia=0&area=1)>. Acesso em 29 out. 15.

COUTINHO, F.; M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2003.

**CPFL Energia. Relatório Anual 2014**. Disponível em:< <http://www.cpfl.com.br/institucional/relatorio-anual/Documents/RA-8-cpfl-2014.pdf>>. Acesso em Set. 2015.

**CPFL Energia. Relatório Anual 2012**. Disponível em:<[https://www.unglobalcompact.org/system/attachments/32821/original/CPFL\\_RA12\\_ENG\\_0407.pdf?1378757299](https://www.unglobalcompact.org/system/attachments/32821/original/CPFL_RA12_ENG_0407.pdf?1378757299)>. Acesso em Ago. 2015.

**CPFL. Meio Ambiente** . Resíduos sólidos gerados pela RGE. Disponível em :<[http://relatorioanual.cpfl.com.br/relatorioanual/2011/Documentos%20Compartilhados/cPFL\\_RA11\\_PORT.pdf](http://relatorioanual.cpfl.com.br/relatorioanual/2011/Documentos%20Compartilhados/cPFL_RA11_PORT.pdf)>. Acesso em 20 jan 2014.

**CPFL. Meio Ambiente.** Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br/relatorioanual/2011/SitePages/MeioAmbiente.aspx>>. Acesso: janeiro de 2015.

CRABB\_e, A., JACOBS, R., van HOOFF, V., BERGMANS, A., van ACKER, K. Transition towards sustainable material innovation: evidence and evaluation of the Flemish case. **J. Clean. Prod.**, v. 56, p. 63-72, 2013.

DARABI, P.; GRIL, J.; THEVENON, M. F.; KARIMI; A. N.; AZADFALAH; M. Evaluation of high density polyethylene composite filled with bagasse after accelerated weathering followed by biodegradation. **Bioresources**, v. 7, n. 4, p. 5258-5267, 2012.

DE MEDEIROS, J. F.; RIBEIRO, J. L. D.; CORTIMIGLIA, M. N. Success factors for environmentally sustainable product innovation: a systematic literature review. **J. Clean. Prod.**, v. 65, p. 76-86, 2014.

DUBEY, B.; TOWNSEND, T. G.; SOLO-GABRIELE, H. M. Metal loss from treated wood products in contact with municipal solid waste landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, p. 558–568, 2010.

FABIVI, J. S.; MCDONALD, A. G.; MORRELL, J. J.; FREITAG, C. Effects of wood species on durability and chemical changes of fungal decayed wood plastic composites. **Composites: Part A**, v. 42, p. 501–510, 2011.

FALUDI, G.; LINK, Z.; RENNER, K.; MÓCZÓ, J.; PUKÁNSZKY, B. Factors determining the performance of thermoplastic polymer/wood composites the limiting role of fiber fracture. **Materials and Design**, v. 61, p. 203–210, 2014.

FERRARINI, S. F.; SANTOS, H. S.; MIRANDA, L. G.; AZEVEDO, C. M. N.; PIRES, M. J. R.; MAIA, S. M. Classificação de resíduos de madeira tratada com preservativos à base de arseniato de cobre cromatado e de boro/flúor. **Química Nova**, v. 35, n. 9, p. 1767-1771, 2012.

FERRARINI, S. F.; SANTOS, H. S.; MIRANDA, L. G.; AZEVEDO, C. M. N.; MAIA, S. M. PIRES, M. Decontamination of CCA-treated eucalyptus wood waste by acid leaching. **Waste Management**, v. 49, p. 253–262, 2016.

FINKLER, M. **Desenvolvimento de compósitos com base em rejeito de tecidos de algodão e acrílico em matriz de polietileno de alta densidade**. 2005. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul/RS, 2005.

FONTANELLA, S., BONHOMME, S., KOUTNY, M., HUSAROVA, L., BRUSSON, J.-M., COURDAVAULT, J.-P., PITTEI, S., SAMUEL, G., PICHON, G., LEMAIRE, J., DELORT, A.-M. Comparison of the biodegradability of various polyethylene films containing pro-oxidant additives. **Polym. Degrad. Stab.**, v. 95, p. 1011-1021, 2010.

FREIRE, E.; LOPES, G. B. Implicações da Política Nacional de Resíduos Sólidos para as práticas de gestão de resíduos no setor de confecções. **Redige**, v. 4, n. 1, p. 1-22, 2013.

FREITAS, V. P. **Variações na retenção de CCA-A em estacas de *Pinus* após 21 anos de exposição em campo de apodrecimento.** 2002. 76f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP, 2002.

FURLAN, L. G.; DUARTE, U. L.; MAULER, R. S. Avaliação das propriedades de compósitos de polipropileno reforçados com casca de aveia. **Quim. Nova**, Vol. 35, n. 8, 1499-1501, 2012.

GARCÍA, M.; GARMENDIA, I.; GARCÍA, J. Influence of natural fiber type in eco-composites. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 107, n. 5, p. 2994–3004, 2008.

GARCIA-DIAZC, S.; HERNANDEZ-JAIMES, C. ESCALONA-BUENDIA, H. B.; BELLO-PEREZ, L.A.; VERNON-CARTER, E. J.; ALVAREZ-RAMIREZ. Effects of CaCO<sub>3</sub> treatment on the morphology, crystallinity, rheology and hydrolysis of gelatinized maize starch dispersions. **Food Chemistry**, v. 207, p.139-147, 2016.

GERALDO, F. C. A madeira de eucalipto para postes. **Revista da Madeira**. São Paulo: ABPM, v. 75, 2003.

GLEIM, M.R.; SMITH, J. S.; ANDREWS, D.; CRONIN, J.J. Against the green: a multimethod examination of the barriers to green consumption. **J. Retail**, v. 89, p.44-61, 2013.

GOMES, L. B. **Viabilidade da incorporação de resíduos vitrificados de isoladores elétricos cerâmicos no processo de obtenção de revestimentos refratários produzidos a partir de concreto sílicoaluminoso.** 2012, 206f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos E Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul/RS, 2012.

GOMES, L. B.; BRANDALISE, R. N.; BERGAMAN, C. P.; SANTOS, V. Processo de fragmentação de resíduos cerâmicos vitrificado (RCV) visando sua incorporação em concreto refratário sílico-aluminoso. **In:** 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica, IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials, Curitiba, junho 2012.

GOMES, L. B.; SAVARIS, M.; ANDRADE, M. Z.; BRANDALISE, R. N.; GRISA, A. M. C. Degradação de filmes de polietileno com aditivos pró-degradantes após exposição ao envelhecimento acelerado. **In:** Anais do 11º Congresso Brasileiro de Polímeros, Campos do Jordão, 2011.

GOMES, T. S.; VISCONTE, L. L. Y.; PACHECO, E. B. A. V. Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos de polietileno de alta densidade. Parte 1. Avaliação mecânica e térmica. **Polímeros**, v. 23, n. 2, p. 206-211, 2013.

GRESS, J. K.; LESSL, J. T.; DONG, X.; MA, L. Q. Assessment of children's exposure to arsenic from CCA-wood staircases at apartment complexes in Florida. **Science of the Total Environment**, v. 476–477, p. 440–446, 2014.

GRISON, K.; TURELLA, T. C.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J. Avaliação das propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de PEAD com pó de Pinus taeda e alumina calcinada. **Polímeros**, v. 25, n. 4, p. 408-413, 2015.

GÜLTEKIN, M.; ÇAYLI, G.; ESEN, H. Utilization of renewable filler from lichen in low density polyethylene. **Polymer Composites**, p. 1-7, 2015. doi: 10.1002/pc.23597.

GURUNATHAN, T.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. **Composites Part B: Eng**, v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011.

LI, H.Y.; TAN, Y.Q.; ZHANG, L.; CHEN, T.; SONG, Y. H.; YE, Y.; XIA, M. S. Bio-filler from mus-sel shell: preparation and its effects on polypropylene composites properties, **J. Inorg. Mater.** V. 27, p. 1–7, 2012.

HASAN, A. R.; HUB, L.; SOLO-GABRIELE, H. M.; FIEBER, L.; CAI, Y.; TOWNSEND, T. G. Field-scale leaching of arsenic, chromium and copper from weathered treated wood. **Environmental Pollution**, v. 158, p. 1479–1486, 2010.

HILLIG, E.; IWAKIRI, S.; ANDRADE, M. Z.; ZATTERA, A. J. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira. **R. Árvore**, v.32, n.2, p.299-310, 2008.

HINESTROZA, J.; NETRAVALI, A. N. **Cellulose based composites: New green nanomaterials**. John Wiley & Sons, 2014.

HINGSTON, J. A.; COLLINS, C. D.; MURPHY, R. J.; LESTER, J.N. Leaching of cromated copper arsenate wood preservatives: a review. **Environmental Pollution**, v. 111, p. 53-56, 2001.

HINSKEN, H.; MOSS, S.; PAUQUET J. R.; ZWEIFEL, H. Degradation of polyolefins during melt processing. **Polymer Degradation and Stability**, v. 34, n. 1–3, p. 279-293, 1991.

HOLLAWAY, L. **Handbook of polymer composites for engineers**. Cambridge: Woodhead, 1994.

HOSSEINAEI, O.; WANG, S.; TAYLOR, A. M.; KIMMID, J-W. Effect of hemicellulose extraction on water absorption and mold susceptibility of wood–plastic composites. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 71, n. 1, p.29-35, 2012.

HUANG, R.; XIONG, W.; XU, X.; WU, Q. Thermal expansion behavior of co-extruded wood plastic composites with glass-fiber reinforced shells. **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5514–5526, 2012.

HUNER, U. Effect of water absorption on the mechanical properties of flax fiber reinforced epoxy composites. **Advances in Science and Technology**, v. 9, n. 26, p. 1–6, 2015.

IOST, C. A. R.; RAETANO, C. G. Tensão superficial dinâmica e ângulo de contato de soluções aquosas com surfactantes em superfícies artificiais e naturais. **Eng. Agríc.**, v. 30, n.

4, p.670-680, 2010

**IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.** Caderno de Diagnóstico: Resíduos Sólidos Industriais, 2011. Disponível em:<[http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/05\\_CADDIAG\\_Res\\_Sol\\_Industriais.pdf](http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/05_CADDIAG_Res_Sol_Industriais.pdf)>. Acesso em 06 de out. 2015.

JANG, H.; SO, S-Y.; The properties of cement-based mortar using diferente particle size of grinding waste insulator powder. **Journal of Building Eng**, v. 3, p. 48–57, 2015.

JANIN, A.; BLAIS, J.; MERCIER, G.; DROGUI, P. Optimization of a chemical leaching process for decontamination of CCA-treated wood. **J. Hazardous Materials**, v. 169, p. 136-45, 2009.

JANIN, A.; COUDERT, L.; RICHE, P.; MERCIER, G.; COOPER, P.; BLAIS, J. F. Application of a CCA-treated wood waste decontamination process to other copper-based preservative-treated wood after disposal. **J. Hazardous Materials**, v. 186, p. 1880–1887, 2011.

JANSSON, J., 2011. Consumer eco-innovation adoption: assessing attitudinal factors and perceived product characteristics. **Bus. Strat. Env**, v. 20, p. 192-210, 2011.

JAWAID, M; ABDUL KHALIL, P. S. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: a review. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, n. 1, p. 1-18, 2011.

JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials**. Ed: Taylor & Francis, Inc, 2<sup>nd</sup> ed., 1999.

JOSEPH, P. V.; RABELLO, M. S.; MATTOSO, L. H. C.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, v. 62, p. 1357-1372, 2002a.

JULIE CHANDRA, C. S.; GEORGEA, N.; NARAYANANKUTTYA, S. K. Isolation and characterization of cellulose nanofibrils from arecanuthusk fibre. **Carbohydrate Polymers**, v. 142, p. 158–166, 2016.

JUNGES, J. **Pirólise de madeira tratada com CCA em reator de leito fixo**. 2015, 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos E Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul/RS, 2015.

KAKOU, C. A.; ARRAKHIZ, F. Z.; TROKOUHEY, A.; BOUHIFID, R.; QAISS, A. Influence of coupling agent content on the properties of high density polyethylene composites reinforced with oil palm fibers. **Materials and Design**, v. 63, p. 641–649, 2014.

KAMDEM, D. P.; JIANG, H.; CUI, W.; FREED, J.; MATUANA, L. M. Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service. **Composites: Part A**, v. 35, p. 347–355, 2004.

KARTAL, S. N.; TERZIA, E.; YILMAZA, H.; GOODELL, B. Bioremediation and decay of wood treated with ACQ, micronized ACQ, nano-CuO and CCA wood preservative. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 99, p. 95–101, 2015.

KARTAL, S. N.; TERZIL, E.; WOODWARD, B.; CLAUSEN, C. A.; LEBOW, S. T. Chemical remediation of wood treated with micronised, nano or soluble copper preservatives. **Holzforschung**, v. 68, n. 7, p. 831–837, 2014.

KE, S.; CHENG, X.; WANG, Y.; WANG, Q.; WANG, H. Dolomite, wollastonite and calcite as different CaO sources in anorthite-based porcelain. **Ceramics International**, v. 39, n. 5, p. 4953–4960, 2013.

KIM, N. K.; LIN, R. J. T; BHATTACHARYYA, D. Extruded short wool fibre composites: mechanical and fire retardant properties. **Compos Part B: Eng**, v. 7, p. 472–480, 2014.

KINATA, S. E.; LOUBAR, K.; PARASCHIV, M.; BELLONCLE, C.; TAZEROUT, M. Combination of pyrolysis and hydroliquefaction of CCB-treated wood for energy recovery: Optimization and products characterization. **Bioresource Technology**, v. 118, p. 315–322, 2012.

KOCAEFE, D.; HUANG, X.; KOCAEFE, Y. Dimensional Stabilization of wood. **Current Forestry Reports**, v. 1, n. 3, p. 151-161, 2015.

KORONIS, G.; SILVA, A.; FONTUL, M. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. **Composites: Part B**, v. 44, n. 1, p. 120-127, 2013.

KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAIYAKOOP, N.; TRADA, M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites: Part B**, v. 42, p. 856–873, 2011.

KUMAR, R.; KUMAR, K.; SAHOO, P.; BHOWMIK, S. Study of Mechanical Properties of Wood Dust Reinforced Epoxy Composite. **Procedia Materials Science**, v. 6, p. 551-556, 2014.

KUO, P. Y.; WANG, S-Y.; CHEN, J-H.; HSUEH, H-C.; TSAI, M-J. Effects of material compositions on the mechanical properties of wood–plastic composites manufactured by injection molding. **Materials and Design**, v. 30, p. 3489–3496, 2009.

LA MANTIA, F. P.; MORREALE, M. Green composites: A brief review. **Composites: Part A**, v. 42, p. 579-588, 2011.

LAHR, F. A. R; CHRISTOFORO, A. L. **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos: EESC/USP, 2013, 339 p.

LEWANDOWSKI, K.; PISZCZEK, K.; ZAJCHOWSKI, S.; MIROWSKI, J. Rheological properties of wood polymer composites at high shear rates. **Polymer Testing**, v. 51, p. 58-62, 2016.

LEWANDOWSKI, K.; PISZCZEK, K.; ZAJCHOWSKI, S.; MIROWSKI, J.; MAJCHROWICZ, B. Evaluation of rheological properties of polymers at high shear rates. **Polym. Process**, v. 20, n. 5, p. 410, 2014.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: E. Blücher, 2006. xv, 313 p.

LI, J.; SONG, Z.; LI, D.; SHANG, S.; GUO, Y. Cotton cellulose nanofiber-reinforced high density polyethylene composites prepared with two different pretreatment methods. **Industrial Crops and Products**, v. 59, p. 318-328, 2014.

LIMA, I. L.; LONGUI, E. L.; GARCIA, R.; LUCA, F.; JÚNIOR, F. G. S.; FLORSHEIM, S. M. B. Propriedades da Madeira de Eucalyptus umbra R. T. Baker em Função do Diâmetro e da Posição Radial na Tora. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 3, p. 289-298, 2011.

LIN, R.J., TAN, K.-H., GENG, Y. Market demand, green product innovation, and firm performance: evidence from Vietnam motorcycle industry. **J. Clean. Prod**, v. 40, p. 101-107, 2013.

LINTZ, R. C. C.; CAMPOS, M. A.; JACINTHO, A. E. P. de A.; PAULON, V. A.; BARBOSA, L. A. Estudos das propriedades mecânicas do concreto com adições de isoladores elétricos de porcelana em substituição ao agregado gráudo. **In: Jornadas sudamericanas de Ingeniería Estructural**, 34, 2008. Santiago. Anais... Santiago: ASAAE, 2008.

LIU, X.; LI, X.; LIU, J.; WANG, Z.; KONG, B.; GONG, X.; YANG, X.; LIN, W.; GUO, L. Study of high density polyethylene (HDPE) pyrolysis with reactive molecular dynamics. **Polymer Degradation and Stability**, v. 104, p.62-70, 2014.

LIU, H.; WU, Q.; ZHANG, Q. Preparation and properties of banana fiber-reinforced composites based on high density polyethylene (HDPE)/Nylon-6 blends. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 23, p. 6088–6097, 2009.

LOMELI-RAMIREZ, M. G. *et al.* Evaluation of accelerated decay of wood plastic composites by *Xylophagus* fungi. **Int Biodeter Biodegrad**, v. 63, n. 8, p. 1030–1035, 2009.

LUNA, C. B. B., SILVA, D. F., ARAÚJO, E. M. Análise do comportamento termomecânico, térmico e mecânico de blendas de PA6/Resíduos de borracha. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 6, n. 1, 160-169, 2014.

MA, M. G.; FU, L. H.; LI, S. M.; ZHANG, X. M.; SUN, R. C.; DAI, Y. D. Hydrothermal synthesis and characterization of wood powder/CaCO<sub>3</sub> composites. **Carbohydrate Polymers**, v. 88, n. 4, p. 1470–1475, 2012.

MAITI, S.N.; SUBBARAO, R.; IBRAHIM, M.N. Effect of wood fibers on the rheological properties of i-PP/wood fiber composites, **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 91, n. 1, p. 644, 2004.

MATUANA, L. M.; BALATINECZ, J. J.; PARK, C. B. Effect of surface properties on the adhesion between PVC and wood veneer laminates. **Polym Eng Sci.**, v. 38, p. 765–773, 2004.

MAURANO, C. H. F.; GALLAND, G. B.; MAULER, R. S. Influência da estrutura de diferentes copolímeros de etileno e  $\alpha$ -olefinas na funcionalização com anidrido maleico. **Polímeros**, v.8, n.3, p.79-88, 1998.

MAYES, P. Report on CCA treated timber in South Australia. **Environment Protection Authority – EPA Australia**. 2008. Disponível em:< [www.epa.sa.gov.au](http://www.epa.sa.gov.au)>. Acesso em 13 ago. 15.

MEDEIROS, J.F. de, RIBEIRO, J.L.D., CORTIMIGLIA, M.N. Success factors for environmentally sustainable product innovation: a systematic literature review. **J. Clean. Prod.**, v. 65, p 76–86, 2014.

MENARD, K.P. **Dynamic mechanical analysis: a practical introduction**, CRC Press, 2008.

MERCER, T. G.; FROSTICK, L. E. Leaching characteristics of CCA-treated wood waste: A UK study. **Science of The Total Environment**, v. 427–428, p. 165–174, 2012.

MIGNEAULT, S., A. KOUBA, F. ERCHIQUI, A. CHAALA, K.R. ENGLUND, C. KRAUSE, and M.P. WOLCOTT. Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites. **Composites Part A.**, v. 40, n. 1, p.80-85, 2009.

MIGNEAULT, S., A. KOUBA, F; PERRÉC, P.; RIEDL, B. Effects of wood fiber surface chemistry on strength of wood–plastic composites. *Applied Surface Science*, v. 343, p. 11–18, 2015.

MIGUEL, J. J. P. **Estudo Comparativo das Propriedades Térmicas e Mecânicas do Polipropileno Reforçado com Óxido de Zinco, Carbonato de Cálcio e Talco**. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial), Faculdade de Tecnologia Senai Cimatec, Salvador, 2010.

MISNON, M. I. *et al.* Potentiality of utilising natural textile materials for engineering composites applications. **Materials and Design**, v. 59, p. 359-368, 2014.

MISSAGIA, Z. M. V. **Compósitos particulados em matriz epóxi reforçados com serragem, cimento e silicato de magnésio**. 2013. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei/MG, 2013.

MOHANTY, S.; VERMA, S. K.; NAYAK, S. K. Dynamic mechanical and thermal properties of MAPE treated jute/HDPE composites. **Composites Science and Technology**, v. 66, p. 538–547, 2006.

MOHEE, R.; MAUTHOOR, S.; BUNDHOO, Z. M. A.; SOMAROO, G.; SOOBHANY, N.; GUNASEE, S. Current status of solid waste management in small island developing states: A review. **Waste Management**, v. 43, p. 539-549, 2015.

MONTEIRO, S. N.; CALADO, V.; RODRIGUEZ, R. J. S.; MARGEM, F. M. Thermogravimetric Stability of Polymer Composites Reinforced with Less Common Lignocellulosic Fibers – an Overview. **J. Mater. Res. Tecnol.**, v. 1, n. 2, p. 117-126, 2012.

MORELLI, F. C.; RUVOLO FILHO, A. Nanocompósitos de Polipropileno e Argila Organofílica: Difração de Raio X, Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho e Permeação ao Vapor D'água. **Polímeros**, v. 20, n. 2, p. 121-125, 2010.

MOREIRA, M. C. **Dados e informações sobre resíduos sólidos urbanos no Brasil**. 2013, 153 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Brasília, 2013.

MORESCHI, J. C.; ROCHA, M. P.; BORGES, C. C.; CARVALHO, R. C.; **Revista da Madeira**, v. 12, p. 68, 2013.

MUCCILLO, E. N. S.; PORFÍRIO, T. C.; TADOKORO, S. K.; REY, J. F. Q.; ROCHA, R. A.; STEIL, M. C.; MUCCILLO, R. Propriedades físicas do óxido de cério preparado por técnica de solução e a condutividade elétrica em função da pressão parcial de oxigênio em cerâmicas sinterizadas. **Cerâmica**, v. 51, n. 318, p. 157-162, 2005.

MULINARI, D.R.; VOORWALD, H.J.C.; CIOFFI, M.O.H.; LIMA, C.A.A.; BAPTISTA, C.A.P.R.; NAFAJI, S. K. Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review. **Waste Management**, v. 33, p. 1898–1905, 2013.

MUSTATA, N.; TUDORACHI, D.; ROSU, D. Thermal behavior of some organic/inorganic composites based on epoxy resin and calcium carbonate obtained from conchshell of *Rapana thomasiana*, **Compos. Part B: Eng.**, v. 43, p. 702–710, 2012.

NAFAJI, S. K.; ENGLUND, K. R. Effect of Highly Degraded High-Density Polyethylene (HDPE) on Processing and Mechanical Properties of Wood Flour-HDPE Composites. **J. Appl. Polym. Sci**, 2013.

NASCIMENTO, E.; PINHEIRO, L. A. Estudo da degradação termo-oxidativa do polietileno de alta densidade. In: Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, 2009.

NERI, M. G. G.; COSTA, E. G.; GARCIA, R. W. S.; PAIVA, O. L. S. Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos. In: 6º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, 2005, Montevideo - Uruguay, 2005.

NETO, R. B.; BARBOSA, R. V.; VASCONCELLOS, A. S. **Poliolefinas**. 2009. Disponível em: <<http://www.iq.ufrgs.br/solid/poliolefinas.doc>>. Acesso em 03 jun. 2015.

NIELSEN, L. **Mechanical properties of polymers and composites**. v. 2. New York: Marcel Dekker Inc, 1974.

OHGAMI, N.; YAMANOSHITA, O.; THANG, N. D.; YAJIMA, I.; NAKANO, C.; WENTIG, W.; OHNUMA, S.; KATO, M. Carcinogenic risk of chromium, copper and arsenic in CCA-treated wood. **Environmental Pollution**, v. 206, p. 456–460, 2015.

OLIVEIRA, C. F. P.; DEMARQUETTE, N. R.; CARASTAN, D. J.; FECHINE, G. J. M. Fotodegradação de compósitos de poliestireno/argila montmorilonita: efeito do tipo de argila e presença de sal. **Polímeros**, v. 22, n. 1, p. 13-21, 2012.

OLIVEIRA, R.; BRISOLARI, A.; SALES, A.; GONCALVES, D. Wettability, Shrinkage and Color Changes of *Araucaria angustifolia* After Heating Treatment. **Mat. Res.**, v. 13, n.3, p. 351-354, 2010.

OSBURG, V. S., *et al.* Consumer acceptance of Wood-Polymer Composites: a conjoint analytical approach with a focus on innovative and environmentally concerned consumers, **J. Clean. Prod.** 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.086>.

PAES, J. B. Qualidade de Moirões de Eucalipto Tratados Comercializados em Três Municípios do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**. v. 19, n. 4, p. 475-482, 2012.

PAES, J. B.; NUNES, S. T; ROCCO LAHR, F. A.; NASCIMENTO, M. F.; LACERDA, R. M. A., Qualidade de chapas de partículas de pinus *elliottii* coladas com resina poliuretana sob diferentes combinações de pressão e temperatura. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 551-558, 2011.

PAN, Y.; ZHONG, Z. Micromechanical modeling of the wood cell wall considering moisture absorption. **Composites Part B: Engineering**, v. 91, p.27-35, 2016.

PENTEADO, C. S. G.; CARVALHO, E. V.; LINTZ, R. C. C. Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 514–520, 2016.

PASQUINI, D.; TEIXEIRA, E. M.; CURVELO, A. A. S.; BELGACEM, M. N.; DUFRESNE, A. Surface esterification of cellulose fibres: Processing and characterisation of low-density polyethylene/cellulose fibres composites. **Compos. Sci. Technol**, v. 68, p.193, 2008.

PENHA, F. G.; SPIER, V. C.; DEBACHER, N. A. Adsorção de xanxatos sobre pirita. **Quim. Nova**, v. 24, n. 5, p. 612-615, 2001.

PEREIRA, P. H. F.; ROSA, M. F.; CIOFFI, M. O. H.; BENINI, K. C. C.; MILANESE, A. C.; VOORWALD, H. J. C.; MULINARI, D. R. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. **Polímeros**, v. 25, n. 1, p. 9-22, 2015.

PÉREZ, E. *et al.* Tensile and fracture behaviour of PP/wood flour composites. **Composites: Part B**, v. 43, p. 2795–2800, 2012.

PESIC, N.; ZIVANOVICA, S.; GARCIA, R.; PAPASTERGIOUBINOSLAV, P. Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. **Construction And Building Materials**, v. 115, p.362-370, 2016.

PICKERING, K.L. ARUAN EFENDY, M.G. LE, T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites: Part A**, v. 83, p. 98–112, 2016.

PODDAR, S.; KAMRUZZAMAN, M.; SUJAN, S. M. A.; HOSSAIN, M.; JAMAL, M. S.; GAFUR, M. A.; KHANAM, M. Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. **Fuel**, v. 131, p. 43–48, 2014.

POLETTTO, M. **Obtenção e caracterização de compósitos preparados com poliestireno expandido reciclado e pó de madeira**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

POLETTTO, M.; DETTENBOM, J.; ANDRADE, M. Z.; ZATTERA, A. J. Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. **Waste Management**, v. 31, n. 4, p. 779–784, 2011.

POLETTTO, M.; ZATTERA, A. J.; SANTANA, R. M. C. Effect of Natural Oils on the Thermal Stability and Degradation Kinetics of Recycled Polypropylene Wood Flour Composites. **Polymer Composites**, v. 35, n. 10, p. 1875–2084, 2014.

PORTELLA, K. F.; MENGARDA, P.; BRAGANÇA, M. d'O. G. P.; RIBEIRO, J.; SEBASTIÃO, J. S. S.; CERQUEIRA, D. P.; PIANARO, S. A.; MAZUR, M. M. Nanostructured Titanium Film Deposited by Pulsed Plasma Magnetron Sputtering (Pdms) on a High Voltage Ceramic Insulator for Outdoor Use. **Materials Research**, v.18, n. 4, p. 853–859, 2015.

POTHAN, L. A.; OOMMEN, Z.; THOMAS, S. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. **Compos. Sci. Technol.**, v. 63, p. 283–293, 2003.

POUZET, M.; GAUTIER, D.; CHARLET, K.; DUBOIS, M.; BÉAKOU, A. How to decrease the hydrophilicity of wood flour to process efficient composite materials. **Applied Surface Science**, v. 353, p. 1234–1241, 2015.

QUEIROS, J. P. M. **Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais**. 2013, 136 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2013.

RESTREPO-FLÓREZA, J. M.; BASSIA, A.; THOMPSONB, M. R. Microbial degradation and deterioration of polyethylene – A review. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 88, p. 83–90, 2014.

RGE – Rio Grande Energia. Disponível em: <<http://www.rge-rs.com.br>>. Acesso em: 02 ago. 2014.

ROMANZINI, D.; LAVORATTI, A.; ORNAGHI JR., H.L.; AMICO, S.C.; ZATTERA, A. J. Influence of fiber content on the mechanical and dynamic mechanical properties of glass/ramie polymer composites. **Materials & Design**, v. 47, p. 9–15, 2013.

RONG, L. *et al.* Assessment of the potential utilization of municipal solid waste from a closed irregular landfill. **J. Clean. Prod.** 2015, doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.050.

SABA, N.; JAWAID, M.; ALOTHMAN, OTHMAN Y.; PARIDAH, M.T. A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 149–159, 2016.

SALES, A. Avaliação da retenção de CCA em postes de eucalipto deteriorados. **Revista da Madeira**, v. 11, n. 3, 2003.

SANJAV, M. R.; ARPITHA, G. R.; YOGESHA, B. Study on Mechanical Properties of Natural - Glass Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4-5, p. 2959-2967, 2015.

SANTOS, R. C. **Caracterização vibracional e térmica de blendas de LDPE e m-LLDPE**. 2005. 76 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2005.

SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G. Avaliação do tratamento sob pressão de postes de Eucalyptus saligna e Eucalyptus cloeziana com CCA-C. **Sci. For.**, v. 41, n. 100, p. 541-547, 2013.

SCHWARTZ, M. M. **Composite Materials Handbook**. New York: McGrawHill, 1984.

SENTHAMARAIA, R. M.; DEVADAS-MANO HARANB. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 9, p. 910-913, 2005.

SEWDA, K.; MAITI, S. N. Dynamic mechanical properties of high density polyethylene and teak wood flour composites. **Polym. Bull.**, v. 70, p. 2657-2674, 2013.

SEWDA, K.; MAITI, S. N. Mechanical properties of HDPE/bark flour composites. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 105, n. 5, p. 2598-2604, 2007.

SEWDA, K.; MAITI, S. N. Effect of Bark Flour on Melt Rheological Behavior of High Density Polyethylene. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 123, p. 2122-2130, 2012.

SEWDA, K.; MAITI, S. N. Crystallization and Melting Behavior of HDPE in HDPE/Teak Wood Flour Composites and Their Correlation with Mechanical Properties. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 118, p. 2264-2275, 2010.

SHANG, L.; HAN, G.; ZHU, F.; DING, J.; SHUPE, T.; WANG, Q.; WU, W. High-density polyethylene-based composites with pressure-treated wood fibers. **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5181-5180, 2012.

SHEBANI, A. N.; REENEN, A. J. van; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochimica Acta**, [S.l.], v. 471, p. 43-50, 2008.

SILVA FILHO, C.R.V. & SOLER, F.D. **Gestão de resíduos sólidos: o que diz a lei**. 2ª edição. São Paulo: Trevisan Editora, 2013.

SILVA, G. A. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brasil, 2008.

SILVA, J. C. Madeira preservada – Os impactos ambientais. **Revista da Madeira**, v. 100, nov. 2006. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=985&subject=Preserva%E](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=985&subject=Preserva%E)

[7%E3o&title=Madeira%20preservada%20%96%20Os%20impactos%20ambientais>](#). Acesso em 29 out. 15.

SILVA, P. P. J. C. G. P. O. **Inspeção da degradação nos isoladores de compósito de linhas de transmissão através de ensaios não destrutivos**. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2009.

SIMÕES, C. **Cuidado ao queimar madeira tratada!** 2008. Disponível em:<<http://ambientedaserra.blogspot.com.br/2008/02/cuidado-ao-queimar-madeira-tratada.html>>. Acesso em 29 out. 15.

SOCCALINGAME, L.; PERRIN, D.; BENEZET, J-C, MANI, S.; COIFFIER, F.; RICHAUD, E.; BERGERET, A. Reprocessing of wood flour reinforced polypropylene composites: Impact of particle size and coupling agent on composite and particle Properties. **Polymer Degradation and Stability**, v. 13, p. 72-85, 2015.

SOLO-GABRIELE, H.; TOWNSEND, T. Disposal practices and management alternatives for CCA-treated wood waste. **Waste Management**, v. 17, p. 378-389, 1999.

SOMMERHUBER, P. F.; WELLING, J.; KRAUSE, A. Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in Wood-Plastic Composites. **Waste Management**, v. 46, 76-85, 2015.

SONG, Q.; LI, J.; ZENG, X. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. **J. Clean. Prod.** v. 104, p. 199-210, 2015.

SOUSA, F. J. P.; NEVES, W. F. das and ALARCON, O. E. Estudo da viabilidade de obtenção de isoladores elétricos a partir de resíduo de esmaltação. **Cerâmica**, v. 50, n.315, 2004.

SPINACÉ, M. A. S.; JANEIRO, L. G.; BERNARDINO, F. C.; GROSSI, T. A.; DE PAOLI, M. A. Poliolefinas Reforçadas com Fibras Vegetais Curtas: Sisal vs. Curauá. **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 168-174, 2011.

SPINACÉ, M. A.; FERMOSELI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A. Recycled polypropylene reinforced with curaua fibers by extrusion. **J. Appl. Polym. Sci.** 2009, v. 112, n. 6, p. 3686-3694.

STARK, N. S.; MATUANA, L. M.; CLEMONS, C. M. Effect of Processing Method on Surface and Weathering Characteristics of Wood-Flour/HDPE Composites. **J. App. Pol. Sci.**, v. 93, p. 1021-1030, 2004.

STOKKE, D. D.; GARDNER, D. J. Fundamental aspects of wood as a component of thermoplastic composites. **J Vinyl Additive Technol**, v. 9, n. 2, p. 96-104, 2003.

STUART, B. **Infrared spectroscopy fundamentals and applications**. New York: John Wiley and Sons, 2004.

SZELUGA, U.; KUMANEK, B.; TRZEBICKA, B. Synergy in hybrid polymer/nanocarbon composites. A review. **Composites: Part A**, v. 73, p. 204-231, 2015.

TAMRAKAR, S.; LOPEZ-ANIDO, R. A. Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p.3977-3988, 2011.

TAZI, M.; ERCHIQUI, F.; GODARD, F.; KADDAMI, H.; AJJI, A. Characterization of Rheological and Thermophysical Properties of HDPE–Wood Composite. **J. Appl. Polym Sci.**, v. 131, n. 13, 2014, doi: 10.1002/app.40495.

TEUBER, L.; MILITZ, H.; KRAUSE, A. Dynamic particle analysis for the evaluation of particle degradation during compounding of wood plastic composites. **Composites Part A**, v.84, p. 464–471, 2016.

TEUBER, L.; OSBURG, V-S.; TOPOROWSKI, W.; MILITZ, H.; KRAUSE, A. Wood polymer composites and their contribution to cascading utilisation, **J. Clean. Prod.**, v. 110, p. 9-15, 2016.

TISSERAT, B. *et al.* Effect of particle size, coupling agente and DDGS additions on Paulownia wood polypropylene composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 33, p. 1279–1293, 2014.

TOCCHETTO, M.R.L. 2009. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais**. Universidade Federal de Goiás. Cursos de Especialização em Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos e Líquidos.

TOMAK, E. D.; BAYSALB, E.; PEKER, H. The effect of some wood preservatives on the thermal degradation of Scots pine. **Thermochimica Acta**, v. 547, p. 76 – 82, 2012.

TORRES, A. A. U.; D'ALMEIDA, J. R. M.; HABAS, J-P. Avaliação do efeito de um óleo parafínico sobre o comportamento físico-químico de tubulações de polietileno de alta densidade. **Polímeros**, v. 20, n.5, p.331-338, 2010.

TUMULURU, J. S. Specific energy consumption and quality of wood pellets produced using high-moisture lodgepole pine grind in a flat die pellet mil. **Chemical Engineering Research and Design**. 2016. doi:10.1016/j.cherd.2016.04.007.

TURKU, I.; KARKI, T. Accelerated weathering of fire-retarded wood–polypropylene composites. **Composites Part A**, v. 81, p. 305–312, 2016.

VAIDYA, A. A.; GAUGLER, M.; SMITH, D. A. Green route to modification of wood waste, cellulose and hemicellulose using reactive extrusion. **Carbohydrate Polymers**, v. 136, p. 1238–1250, 2016.

VALLE, Cyro Eyer do. **Qualidade ambiental: ISO 14000**. 12. ed. São Paulo: SENAC São Paulo, 2012. 207 p.

VENTURA, A. M. F.M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **C. Tecn. Mat.[online]**, v. 21, n.3-4, p. 10-19, 2009.

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciênc. Florest.** [online], v. 25, n.1, p. 257-271, 2015.

VIDOR, F. L. R. **Avaliação da vida útil de postes de madeira de eucalipto em serviço em redes de distribuição de energia elétrica.** 2011. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontfícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VIDOR, F. R., PIRES, M., DEDAVID, B.A., MONTANI, P.D.B., GABIATTI, A., Inspection of wooden poles in electrical power distribution networks in southern Brazil. **IEEE Trans.Power Deliv.** v. 25, n.1, p. 479-484, 2010.

VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; TOLEDO, R.; SOUZA, S. D. C.; MONTEIRO, S. N. Porcelana elétrica com resíduo da serragem de rocha ornamental, parte 1: evolução microestrutural, propriedades físicas e mecânicas. **Matéria (Rio J.)**, v. 11, n.4. 2006.

VIVIAN, *et al.* Qualidade do tratamento preservativo em autoclave para a madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 445-453, dez. 2012.

WANG, C; PIÃO, C; LUCAS, C. Synthesis and characterization of superhydrophobic wood surfaces. **J. Appl. Polym. Sci.** v. 119, n. 3, p. 1667–1672, 2011.

WU Z.; HU, Y.; SHU, W. J. Effect of ultrafine zinc borate on the smoke suppression and toxicity reduction of a low-density polyethylene/intumescent flameretardant system. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 117, p. 443-440, 2010.

WU, Q.; CHI, K.; WU, Y.; LEE, S.; Mechanical, thermal expansion, and flammability properties of co-extruded wood polymer composites with basalt fiber reinforced shells. **Materials and Design**, v. 60, p. 334–342, 2014.

XU, N.; LI, S.; LI, Y.; XUE, Z.; YUAN, L.; ZHANG, J.; WANG, L. Preparation and properties of porous ceramic aggregates using electrical insulators waste. **Ceramics International**, v. 41, n. 4, p. 5807-5811, 2015.

YAMAJI, F. M.; BOUDELLE, A. Utilização da serragem na produção de compósitos plástico madeira. **Revista Floresta**, v. 39, n.1,p. 54-66, 2004.

YANG, TE-HSIN; YANG, TSU-HSIEN; CHAO, WEI-CHENG; LEU, SHAO-YUAN. Characterization of the property changes of extruded wood–plastic composites during year round subtropical weathering. **Construction and Building Materials**, v. 88, p. 159–168, 2015.

YAO, Z. T.; CHENB, T.; LIC, H. Y.; XIAB, M. S. YEB, Y.; ZHENG, H. Mechanical and thermal properties of polypropylene (PP) compositesfilled with modified shell waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 262, p. 212– 217, 2013.

YARGICOGLU, E. N.; SADASIVAN, B. Y.; REDDY, K.; SPOKAS, K. Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars. **Waste Management**, v.36, p. 256–268, 2015.

ZIMMERMANN, M. V. G; ZATTERA, A. J. Recycling and reuse of waste from electricity distribution networks as reinforcement agents in polymeric composites. **Waste Management**, v. 33, n. 7, p. 1667–1674, 2013.