



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DOS
MATERIAIS

GABRIELA CELSO MELO SOARES DE VASCONCELOS

DESENVOLVIMENTO DE ECOCOMPÓSITO DE POLIETILENO VERDE E
CORTIÇA PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Teresina – Piauí

2019

GABRIELA CELSO MELO SOARES DE VASCONCELOS

DESENVOLVIMENTO DE ECOCOMPÓSITO DE POLIETILENO VERDE E CORTIÇA
PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Piauí para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Área de Concentração: Materiais Conjugados e Poliméricos.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Tatianny Soares Alves
Coorientadora: Prof^ª. Dra. Renata Barbosa

Teresina – Piauí

2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco
Serviço de Processamento Técnico

V331d Vasconcelos, Gabriela Celso Melo Soares de.
Desenvolvimento de ecocompósito de polietileno
verde e cortiça para aplicação na construção civil /
Gabriela Celso Melo Soares de Vasconcelos. – 2019.
96 f.

Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) –
Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2019.
“Orientadora: Prof^a. Dra. Tatianny Soares Alves
Coorientadora: Prof^a. Dra. Renata Barbosa ”.

1. Polietileno. 2. Polietileno Verde. 3. Cortiça. 4.
Engenharia dos Materiais. I. Título.

CDD 668.423 4

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS – PPGCM

FOLHA DE APROVAÇÃO – DEFESA DE TESE

DISCENTE: GABRIELA CELSO MELO SOARES DE VASCONCELOS

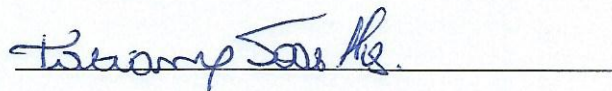
TÍTULO DO PROJETO: “DESENVOLVIMENTO DE ECOCOMPÓSITO DE POLIETILENO VERDE E CORTIÇA PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL”.

ORIENTADORA: Profa. Dra. Tatianny Soares Alves

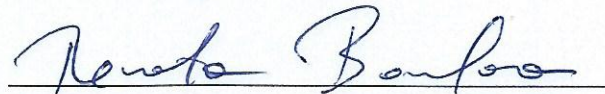
BANCA EXAMINADORA:

ASSINATURA

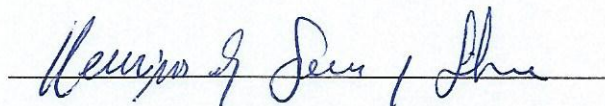
Profa. Dra. Tatianny Soares Alves – UFPI
(Presidente)



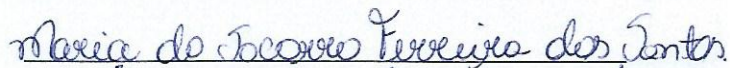
Profa. Dra. Renata Barbosa – UFPI
(Coorientadora)



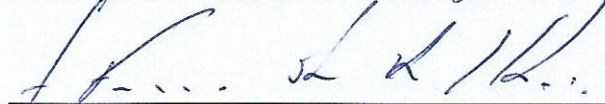
Prof. Dr. Heurison de Sousa e Silva – UFPI
(Examinador Interno)



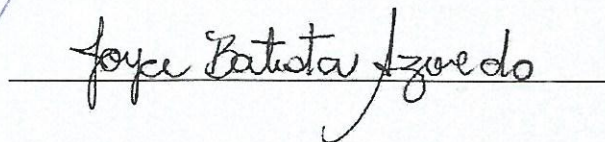
Profa. Dra. Maria do Socorro Ferreira dos Santos –
UFPI (Examinadora Externa ao Programa)



Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho – IFPI
(Examinador Externo à Instituição)



Profa. Dra. Joyce Batista Azevedo – UFRB
(Examinadora Externa à Instituição)



DATA DA AVALIAÇÃO: 20 de Novembro de 2019.

HORÁRIO: 08:30h

LOCAL: Auditório do PPG em Ciência e Engenharia dos Materiais/UFPI

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha querida mãe Teresa Marly pelo exemplo de amor e dedicação e ao meu marido Lucas Soares pelo apoio, incentivo e compreensão.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelas oportunidades que essa vida tão maravilhosa me oferece.

Aos meus pais, Ildemar Vasconcelos e Teresa Marly, pelo amor e incentivo.

Ao meu marido e grande amigo Lucas Soares pelo amor, dedicação, carinho e por me proporcionar tantos momentos de felicidade.

Às minhas irmãs Carolina Celso e Juliana Celso pelo companheirismo.

À Bárbara, grande amiga, pelo apoio no início, meio e fim desse trabalho.

A minha orientadora Prof^ª. Dra. Tatianny Soares Alves e Coorientadora: Prof^ª. Dra. Renata Barbosa pela colaboração, ensinamentos e por terem acreditado na minha capacidade.

Aos colegas Thainá, Felipe Fabrício, Gabriel Brasileiro, Arquimedes, Isaías, Layara Leite e Marcel pela assistência prestada na execução de testes e experimentos.

Ao Kelson, secretário do PPGCM, por sempre se mostrar solícito nos momentos em que precisei.

Ao Laboratório de Polímeros e Materiais Conjugados – LAPCON da Universidade Federal do Piauí por todo o suporte dado ao longo desses anos de desenvolvimento do trabalho.

Ao Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados – LIMAV pela colaboração nas análises no microscópio eletrônico de varredura e termogravimetria.

Ao Laboratório de Processamento de Polímeros da Universidade Federal de Campina Grande, em especial a Prof^ª. Dr^ª Laura Hecker e ao Técnico João Emídio Neto, pelo apoio durante o processamento de todos os compósitos.

Ao Laboratório de Acústica e Vibrações (LAVI) da Universidade Federal do Rio de Janeiro pela realização do ensaio de impedância acústica.

Ao Laboratório de Colaboração Estatística da Universidade Federal do Piauí, em especial, a Prof^ª Dr^ª Rita Idalino e seus orientandos, pelo suporte dado na análise estatística dos resultados.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da UFPI, pelo suporte.

Aos meus amigos e familiares, bem como a todos os meus professores que de alguma maneira contribuíram na minha formação.

Finalmente, a todos que de alguma forma colaboraram e me incentivaram na realização desse sonho.

RESUMO

Neste estudo, foram desenvolvidos ecocompósitos de polietileno verde de alta densidade (PEV), cortiça natural em pó (CP) (5, 10 e 15%) e compatibilizante a base de anidrido maleico (PEgMA) (5%) com o objetivo de avaliar o potencial desses materiais para aplicações na construção civil. Os compósitos foram produzidos em extrusora dupla rosca corrotacional e moldados via injeção. A caracterização foi dividida em três etapas. Inicialmente os compósitos foram avaliados por meio do comportamento mecânico, térmico e acústico, termogravimetria e morfologia. Em um segundo momento, foram avaliados quanto aos efeitos intemperismo natural sobre as propriedades morfológicas e mecânicas sob tração. Nesta etapa os ecocompósitos foram expostos à degradação abiótica na cidade de Teresina-PI durante dois distintos períodos de 90 dias: um considerado de altas precipitações pluviométricas e outro considerado seco, como forma de avaliar os efeitos das condições climáticas extremas. Por fim, foi avaliada a aplicação do material como placas de forro em protótipos de construções provisórias com intuito de estudar o desempenho do compósito quanto ao conforto térmico. Os resultados de termogravimetria mostraram que a cortiça apresentou estabilidade térmica para as condições de processamento aplicadas e quando adicionada aos ecocompósitos reduziu discretamente a estabilidade térmica dos sistemas quando ao polietileno. O uso do compatibilizante não afetou de forma significativa a estabilidade térmica e a temperatura de degradação dos compósitos. Os ecocompósitos produzidos apresentaram aspecto brilhoso, superfície homogênea e alteração da pigmentação original do polímero em virtude da adição da cortiça. A incorporação do agente de acoplamento foi responsável pelo aumento da intensidade do brilho e pelo escurecimento da tonalidade. Os valores de coeficiente de absorção sonora indicaram que os ecocompósitos são bons absorvedores de som entre 500 e 1200 Hz, em especial àqueles com maior percentual de cortiça. A incorporação do PEgMA reduziu a capacidade de absorção sonora dos ecocompósitos. A microscopia eletrônica de varredura das amostras não envelhecidas indicou que a incorporação de cortiça reduziu a capacidade de deformação, ocorrência amenizada nas amostras tratadas com agente de acoplamento e que, apesar da existência de vazios e aglomerados, foi possível observar boa dispersão da cortiça na matriz termoplástica. Após os períodos de exposições, as micrografias revelaram que não houve exposição da cortiça na superfície das amostras, no entanto, a alta incidência de radiação ultravioleta provocou alterações de cor na superfície, surgimento de fissuras e a perda de brilho dos ecocompósitos. Em relação às propriedades mecânicas das amostras não envelhecidas, os ecocompósitos compatibilizados apresentaram melhor resistência a tração. Para as amostras

envelhecidas durante 45 dias e 90 dias, em cada período de exposição, os resultados de resistência à tração e deformação elástica dos ecocompósitos não compatibilizados sofreram redução. Entretanto, a presença do PEGMA auxiliou na manutenção do desempenho mecânico. Os ecocompósitos utilizados nos protótipos apresentaram bom desempenho térmico, proporcionando diminuição da temperatura interna da estrutura construída, sendo uma proposta viável para aplicações na construção civil.

Palavras-chave: compósitos, cortiça, polietileno verde, envelhecimento natural, tubo de impedância, conforto térmico.

ABSTRACT

In this study, high-density green polyethylene (GHDPE), natural cork powder (CP) (5, 10 and 15%) and maleic anhydride-based compatibilizer (PEgMA) (5%) eco-composites were developed to evaluate the potential of these materials for civil construction applications. The composites were produced in twin screw extruder and injection molded. The characterization was divided into three stages. Initially the composites they were evaluated by mechanical, thermal and acoustic behavior, thermogravimetry and morphology. Subsequently, the effects of natural weathering on the morphological and mechanical properties under traction were evaluated. At this stage the eco-composites were exposed to the abiotic degradation test in the city of Teresina, Piauí, during two distinct 90-day periods: one considered of high rainfall and the other considered dry; as a means of assessing the effects of extreme weather conditions. Finally, the application of the material as ceiling tiles in prototypes of temporary buildings was evaluated in order to study the performance of the composite in terms of thermal comfort. The thermogravimetry results showed that cork presented thermal stability for the applied processing conditions and when added to eco-composites slightly reduced the thermal stability of the systems when compared to the pure matrix. The use of compatibilizer did not significantly affect the thermal stability and the degradation temperature of the composites. The eco-composites had a glossy appearance, homogeneous surface and alteration of the original polymer pigmentation due to the addition of cork. The incorporation of the coupling agent was responsible for the increase of the brightness intensity and the darkening of the shade. The sound absorption coefficient values indicated that eco-composites are good sound absorbers between 500 and 1200 Hz, especially those with higher cork percentage. The incorporation of PEgMA reduced the sound absorption capacity of eco-composites. Scanning electron microscopy of non-aged samples indicated that the incorporation of cork reduced the deformation capacity, occurrence reduced in samples treated with coupling agent and, despite the existence of voids and agglomerates, it was possible to observe good dispersion of cork in the thermoplastic matrix. After periods of exposure to natural weathering, micrographs revealed that there was no exposure of cork to the surface of the samples, but the incidence of ultraviolet radiation caused surface color changes, cracking and loss of brightness of eco-composites. Regarding the mechanical properties of the unexposed samples, the compatible eco-composites showed better tensile strength. For the samples aged for 45 days and 90 days, in each exposure period, the results of tensile strength and elastic deformation of non-compatible eco-composites were reduced. However, the presence of PEgMA helped to maintain mechanical performance.

The eco-composites used in the prototypes showed good thermal performance, reducing the internal temperature of the built structure, being a viable proposal for civil construction applications.

Keywords: composites, cork, green polyethylene, natural aging, impedance tube, thermal comfort.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação da Tese.....	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo Geral	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. Ecocompósito.....	5
2.1.1. Matriz renovável.....	6
2.1.2. Carga renovável.....	7
2.2. Polietileno e polietileno verde.....	9
2.3. Cortiça	11
2.3.1. Aplicações da cortiça em ecocompósitos	13
2.3.2. Agende de Acoplamento	14
2.4. Polímeros na construção civil	15
2.4.1. Conforto acústico.....	16
2.4.2. Degradação abiótica nos polímeros.....	21
2.4.3. Desempenho Térmico.....	24
2.5. Proposta de aplicação dos ecocompósitos.....	27
2.5.1. Coberturas	29
2.5.2. Diretrizes bioclimáticas	31
2.6. Revisão Bibliográfica específica.....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43

3.1. Materiais	43
3.1.1. Matriz polimérica	43
3.1.2. Cortiça	43
3.1.3. Agente de acoplamento	43
3.2. Métodos	43
3.2.1. Processo de preparação dos ecocompósitos	43
3.2.2. Caracterização dos ecocompósitos	45
3.2.2.1. Análise térmica dos ecocompósitos	46
3.2.2.2. Absorção sonora dos ecocompósitos	46
3.2.2.3. Degradação abiótica.....	48
3.2.2.4. Colorimetria	49
3.2.2.5. Microscopia óptica – MO dos ecocompósitos	50
3.2.2.6. Microscopia eletrônica de varredura – MEV dos ecocompósitos	50
3.2.2.7. Desempenho mecânico dos ecocompósitos	50
3.2.2.8. Análise estatística dos resultados.....	50
3.2.3. Proposta de aplicação para os ecocompósitos	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1. Análise Térmica da cortiça e respectivos ecocompósitos	54
4.2. Coeficiente de absorção sonora dos ecocompósitos	57
4.3. Degradação abiótica dos ecocompósitos.....	59
4.3.1. Condições climáticas	59
4.3.2. Análise visual	62
4.3.2.1. Colorimetria	63
4.3.3. Morfologia dos ecocompósitos.....	65
4.3.3.1. Microscopia Óptica.....	65
4.3.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura	67
4.3.4. Desempenho mecânico dos ecocompósitos.....	71

4.3.5. Análise Estatística	77
4.4. Proposta de aplicação dos ecocompósitos.....	79
5. CONCLUSÃO	82
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
REFERÊNCIAS	85

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática da estrutura do PEAD.	9
Figura 2 - Ciclo de vida do Polietileno Verde	10
Figura 3 - Representação esquemática da seção axial de sobreiro; (A) cortiça (tecido suberoso), (B) limite subero-felogênio, (C) felogênio, (D) entrecasca, (E) limite entrecasca-madeira, (F) madeira, (G) casca, (H) canais lenticulares, (I) área para produção de rolhas, (J) anel de crescimento anual	12
Figura 4 - Microscopia eletrônica de varredura da cortiça natural (a) seção radial (b) seção tangencial.....	12
Figura 5 - Reação de esterificação entre a cortiça e o PEGMA	15
Figura 6 – Campo auditivo dos seres humanos.	18
Figura 7 – (a) Esquema do processo de absorção sonora em materiais porosos. (b) Diagrama esquemático mostrando os mecanismos de consumo de energia de materiais de absorção sonora porosos.....	19
Figura 8 – Variação da absorção acústica em função da frequência de um material absorvente com diferentes graus de porosidade.....	20
Figura 9 - Faixas da distribuição relativa de energias do espectro eletromagnético	22
Figura 10 - Ilustração da degradação foto-oxidativa do PEAD.....	24
Figura 11 – Construção provisória executada em canteiros de obras tipo “barracão”	27
Figura 12 – Composição sintética da Tabela SINAPI (Data referência 10/08/2019)	28
Figura 13 – Insumo nº 11587 de forro PVC liso previsto na Composição analítica nº 932017 (Data referência 10/08/2019).....	29
Figura 14 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro	31
Figura 15 – Perfil da rosca utilizada.....	45
Figura 16 – Corpos de prova utilizados no ensaio de absorção acústica.....	45
Figura 17 – Sistema de medição: tubo de impedância, microfones, gerador de sinais, amplificador de potência, plataforma de aquisição e software de processamento	47
Figura 18 - Posição dos furos dos microfones no tubo de impedância	47
Figura 19 – Rack de exposição das amostras submetidas à Degradação abiótica.....	48
Figura 20 – Protótipo de construção provisória em canteiro de obras tipo “escritório”	51

Figura 21 – Montagem dos protótipos para análise de conforto térmico: (a) Protótipo do barracão; (b) instalação dos receptores do Termohigrômetro; (c) colocação das placas tipo forro; e (d) colocação das telhas.	52
Figura 22 – Análise termogravimetria da cortiça em pó (a) TGA e (b) DTG.	54
Figura 23 – Análise termogravimetria do PEV e dos ecocompósitos sem compatibilizante (a) TGA e (b) DTG.	55
Figura 24 - Análise termogravimetria do PEV e dos ecocompósitos com compatibilizante (a) TGA e (b) DTG.	55
Figura 25 – Coeficiente de absorção sonora do PEV e ecocompósitos.....	57
Figura 26 - Valores de IUUV máximo para a cidade de Teresina durante o ensaio de degradação abiótica (a) 1º período de exposição e (b) 2º período de exposição	61
Figura 27 – Corpos de prova da matriz e ecocompósitos não expostos ao intemperismo (0 dias) e após a exposição (45 e 90 dias): (a) 1º período e (b) 2º período.	63
Figura 28 – Valores RGB da matriz e dos ecocompósitos antes (0 dias) e após da exposição (45 e 90 dias): (a) 1º período e (b) 2º período de exposição.....	64
Figura 29 – Imagens de MO na superfície da amostra do PEV e seus ecocompósitos antes (0 dias) e após final da exposição à degradação abiótica (90 dias), no 1º e 2º período, com ampliações de 40X: (a) PEV; (b) PEV/5CP; (c) PEV/10CP; (d) PEV/15CP; (e) PEV/5CP/PEgMA; (f) PEV/10CP/PEgMA; e (g) PEV/15CP/PEgMA.	65
Figura 30 – MEV do PEV e ecocompósitos na superfície de fratura antes (0 dias) e após exposição a degradação abiótica (45 dias e 90 dias), com ampliação 300X: (a) PEV; (b) PEV/5CP; (c) PEV/10CP; (d) PEV/15CP; (e) PEV/5CP/PEgMA; (f) PEV/10CP/PEgMA; e (g) PEV/15CP/PEgMA.	67
Figura 31 – Curvas Tensão-deformação do PEV e dos ecocompósitos: (a) antes do envelhecimento natural; (b) Após 90 dias do 1º período; (c) Após 90 dias do 2º período.....	72
Figura 32 - Módulo de elasticidade do PEV e dos ecocompósitos antes e após ao envelhecimento natural.....	74
Figura 33 – Tensão de ruptura do PEV e dos ecocompósitos antes e após ao envelhecimento natural	76
Figura 34 – Tensão de escoamento do PEV e dos ecocompósitos antes e após ao envelhecimento natural	77
Figura 35 – Dispersão da média da (a) Força Máxima e (b) Deformação das amostras antes e ao final de 90 dias de exposição.	78

Figura 36 - Variação da temperatura nos protótipos e da estação meteorológica 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do PEAD	9
Tabela 2 - Influência dos constituintes da cortiça nas suas propriedades	13
Tabela 3 – Frequências audíveis.....	17
Tabela 4 - Estratégias de condicionamento propostas pela NBR 15220 - Parte3.	25
Tabela 5 – Densidade aparente e condutividade térmica de materiais.....	27
Tabela 6 – Resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico para cobertura de fibrocimento.....	30
Tabela 7 – Composição das amostras.....	44
Tabela 8 – Configuração dos microfones	48
Tabela 9 – Condições de moldagem das placas tipo “forro” a serem utilizadas nos protótipos	52
Tabela 10 - Características de degradação térmica das amostras de PEV e ecocompósitos.	56
Tabela 11 – Períodos de realização do ensaio de degradação e datas de retiradas das amostras para análises das amostras	59
Tabela 12 - Resumo das condições climáticas durante o ensaio de degradação abiótica na cidade de Teresina-PI.....	60
Tabela 13 - (a) Módulo de elasticidade; (b) Tensão de ruptura; e (c) Tensão de escoamento do PEV e dos ecocompósitos com e sem compatibilizante.....	71
Tabela 14 – Temperaturas máximas registradas no ambiente e nos protótipos	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - American Society for Testing and Materials
CP – Cortiça em pó
cps – ciclo por segundo
CaCO₃ – Carbonato de cálcio
CPTEC – Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos
DTG – Derivada da Termogravimetria
EP – European Patent
EPS – Poliestireno Expandido
FTIR – Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO - International Organization for Standardization
IUV – Índice Ultravioleta
KMnO₄ – Permanganato de Potássio
LAVI – Laboratório de Acústica e Vibrações
LIMAV – Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados
LAPCON – Laboratório de Polímeros Conjugados
MO – Microscopia Óptica
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR – Norma Brasileira
PA – Polímero de amido
PE – Polietileno
PEAD – Polietileno de alta densidade
PEgMA – Polietileno enxertado com anidrido maleico
PEV – Polietileno verde
PET – Politereftalato de etileno
PHA – Poli(hidroxialcanoato)
PHB – Poli(hidroxibutirato)
PP – Polipropileno
PT - Escritório Português de Patentes

PVA – Acetato de Polivinilo

PVC – Policloreto de vinila

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

TGA – Termogravimetria

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFPI – Universidade Federal do Piauí

UV – Ultravioleta

WO – World Intellectual Property Organization

Xan – Xantana

3D – três dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

C_T – Capacidade térmica

E_i – Energia sonora total incidente

E_r – Energia sonora refletida

E_a – Energia sonora absorvida

E_t – Energia sonora transmitida

R_T – Resistência térmica total

R_{si} – Resistência superfície interna

R_{se} – Resistência superfície externa

U – Transmitância térmica

ϕ – Atraso térmico

θ_i – ângulo da energia incidente

θ_r – ângulo da energia refletida

α – Coeficiente de absorção sonora

λ – Comprimento de onda ou condutividade térmica

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação da Tese

A indústria da construção civil é o segundo maior consumidor de termoplásticos no mundo, sendo superada apenas pelo setor de embalagens (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017), tendo em vista características relevantes dos materiais poliméricos: leveza, durabilidade, boas propriedades de isolamento térmico, resistência à umidade, além de serem produzidos em grande quantidade com baixo custo e permitirem maior versatilidade de aplicações quando comparado aos materiais convencionais (BIRON, 2007; COUSINS, 2002). Uma alternativa para aplicações de polímeros na indústria da construção de forma sustentável é por meio da produção de compósitos reforçados por fibras vegetais, pois apresentam vantagens em termos de custos, resistência, reciclabilidade e facilidade de manutenção (BAJWA; BAJWA; HOLT, 2015; FERNANDES; MANO; REIS, 2013).

Entretanto, boa parte dessas aplicações são externas e a estabilidade dos compósitos poliméricos de termoplásticos com fibras vegetais quando expostos ao ar livre é reduzida devido à radiação solar. A fotodegradação pode promover a fragilização da matriz e a rápida degradação dos componentes vegetais (celulose, hemicelulose, lignina e extrativos) do reforço, reduzindo a capacidade de transferência de esforços entre os componentes e consequentemente as propriedades mecânicas, além de alterar a aparência o produto (FEIST; HON, 1984; LUNDIN; FALK; FELTON, 2001; MATUANA; JIN; STARK, 2011). Fatores que contribuem para a redução de desempenho incluem a mudança de cristalinidade na fase da matriz, oxidação das superfícies dos compósitos e a degradação interfacial causada pela absorção de umidade e radiação ultravioleta (FABIYI et al., 2008; RATANAWILAI; TANEERAT, 2018; STARK; MATUANA, 2006).

Entre as características mais estudadas em compósitos poliméricos submetidos à radiação ultravioleta, natural ou acelerada, destacam-se as propriedades mecânicas, que influenciam diretamente na eficiência do material, e as alterações físicas, que influenciam na estética do produto. Matuana, Jin e Stark (2011) estudaram a influência da exposição à radiação ultravioleta de forma acelerada de compósitos de polietileno de alta densidade - PEAD e farinha de madeira e seus resultados apontaram descoloração, perda de componentes da madeira e aumento da rugosidade da superfície após o processo de exposição. Bajwa, Bajwa e Holt (2015) avaliaram o desempenho de ecocompósitos, constituídos de PEAD em pó, três tipos de biofibras

(carvalho, algodão e guaiúle), dois agentes de acoplamentos (NE 556-004 e TPW 243) e um lubrificante (TPW 113), submetidos à radiação ultravioleta acelerada (UV). Após o envelhecimento, foram observadas superfícies porosas, alterações da cor e superfícies ricas em biofibras expostas, bem como a redução das propriedades físicas, tendo o agente de acoplamento auxiliado na manutenção das propriedades mecânicas dos compósitos. Badji et al. (2017) investigaram alterações no aspecto visual, na topografia da superfície e das propriedades mecânicas de compósitos de PP e farinha de madeira expostos a condições naturais e artificiais de radiação UV. As análises revelaram que o envelhecimento induziu um branqueamento superficial, exposição de partículas de madeira e numerosas microfissuras.

O desempenho térmico e acústico dos compósitos poliméricos utilizados na construção civil também vem sendo alvo de avaliações e pesquisas. A Agência Internacional de Energia apresentou dados relevantes sobre as tendências de consumo de energia no mundo: entre os anos de 1984-2004 a energia primária aumentou 49% e as emissões de dióxido de carbono 43%, com um aumento médio anual de 2,0% e 1,8%, respectivamente (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008). Esses fatores implicam no aumento da temperatura média da Terra, que na última década foi elevada em 0,7°C (SARKAR; CHICHOLIKAR; RATHORE, 2015). Essa alteração de temperatura reflete no ambiente interno, externo e no entorno das construções, provocando aumento nos gastos com eletricidade e combustíveis, o que motiva a busca pela eficiência das construções e impulsiona a pesquisa na área de compósitos poliméricos (JUNIOR et al., 2017). O desempenho acústico é outro parâmetro que vem sendo estudado devido a poluição sonora, que é um dos problemas ambientais mais sérios em todo o mundo e responsável por diversos tipos de distúrbios, redução da eficiência do trabalho e da qualidade de vida (CAO et al., 2018). A utilização de materiais de absorção sonora nas construções, concreto, tijolo, metal, plástico, madeira e compósitos é uma das estratégias para reduzir o ruído e aumentar o conforto (KIM et al., 2015).

Um material alternativo para aplicação em compósitos poliméricos é a cortiça, pois apresenta aparência similar à madeira e pode ser aplicada com função de isolamento térmico, acústico e vibratório (paredes, tetos e pisos), forros, revestimento, rodapés, argamassas, juntas isolantes e de dilatação ou de compressão, dentre outros (FERNANDES et al., 2010; GIL, 2012). A matéria-prima, além de ser uma fonte renovável e biodegradável, é relevante para incorporação em compósitos (FERNANDES et al., 2014a) por ter baixa densidade, ser pouco permeável a líquidos e gases, ter boa compressibilidade e elasticidade, possuir baixo coeficiente

de condutividade térmica, ser resistente ao desgaste mecânico, à corrosão e ao fogo (FERNANDES et al., 2014a; PEREIRA; ROSA; M.A, 1987; SILVA et al., 2005).

O caráter sustentável de um compósito pode ser incrementado pela utilização de uma matriz polimérica verde que durante a sua síntese, processamento ou degradação produz menor impacto ambiental (BRITO et al., 2011). Um exemplo é o polietileno de alta densidade verde, desenvolvido e produzido a partir do monômero de etileno obtido através da desidratação do etanol oriundo da cana-de-açúcar. A sua composição é exatamente igual ao polietileno de matéria-prima não renovável, apresentando mesmo desempenho e características (BORONAT et al., 2015).

O maior desafio na produção de compósitos polímero-cortiça é promover uma eficiente ligação interfacial entre os componentes (FERNANDES et al., 2010). O caráter polar da cortiça tem uma compatibilidade baixa com matrizes poliméricas não polares, especialmente com matrizes constituídas de hidrocarbonetos como o polietileno, podendo reduzir a capacidade da matriz de transferir tensão para o agente reforçante através da interface, quando submetida a um esforço mecânico (BLEDZKI; GASSAN, 1996; FERNANDES et al., 2013). A incorporação de agentes de acoplamento, como por exemplo, polímeros funcionalizados contendo grupos de anidrido maleico ou ácido acrílico, e a modificação superficial da carga vegetal apresentam-se como estratégia eficaz para melhorar a adesão interfacial (FERNANDES et al., 2010, 2011; FERNANDES; MANO; REIS, 2013).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desse estudo foi desenvolver ecocompósitos de polietileno verde de alta densidade (PEV), cortiça em pó (CP) e compatibilizante polar baseado em anidrido maleico (PEgMA) e propor aplicação na construção civil;

1.2.2. Objetivos Específicos

Especificamente, este trabalho propôs:

- Avaliar os efeitos do intemperismo natural sobre o desempenho dos sistemas;

- Avaliar o comportamento térmico da cortiça e dos ecocompósitos por termogravimetria;
- Determinar os coeficientes de absorção sonora da matriz e dos ecocompósitos por meio do ensaio de impedância acústica;
- Avaliar a morfologia e o desempenho mecânico da matriz e dos ecocompósitos antes e após o processo de envelhecimento natural na cidade de Teresina-PI;
- Avaliar o nível de variabilidade dos compósitos por meio de técnicas estatísticas;
- Avaliar o efeito da concentração da cortiça e do compatibilizante; e
- Propor aplicação do material na construção civil e realizar análise de conforto térmico dos ecocompósitos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Ecocompósito

O termo compósito representa a junção de dois ou mais materiais com propriedades químicas, físicas e mecânicas diferentes, de tal forma que o sinergismo entre os componentes resulte num novo material com propriedades melhores do que os componentes individuais (JOSE et al., 2012; MATERIALS; CAMPBELL, 2010; ROWELL et al., 1997).

Os materiais compósitos são geralmente formados por duas fases distintas, uma contínua chamada de matriz e outra descontínua denominada reforço. A fase descontínua ou dispersa deve ser capaz de resistir aos esforços mecânicos transferidos por meio da matriz, que é responsável por envolver e proteger a carga. As características dos compósitos variam em função das propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (forma, tamanho, concentração, distribuição e orientação das partículas) (JOSE et al., 2012; KAW, 2005).

Nos compósitos particulados o reforço ou carga possuem dimensões que são aproximadamente as mesmas em todas as direções, podendo apresentar diferentes geometrias, mas devem estar distribuídas de forma homogênea (CAMPBELL, 2010). A carga pode atuar como enchimento diminuindo a quantidade da matriz e o custo da produção do compósito (JOSE et al., 2012). A matriz deve suportar a maior parte do esforço aplicado enquanto as partículas dispersas restringem a deformação plástica e potencializam a resistência mecânica (KAW, 2005). Nesse tipo de compósito o grau de reforço ou de melhoria do comportamento mecânico depende da interface matriz-partícula (carga). Assim, a área superficial de contato da carga com a matriz possibilita uma melhor interação entre fase contínua e descontínua (P MATHEW; OKSMAN; SAIN, 2005).

Nos compósitos onde a fase dispersa está na forma de uma fibra as propriedades esperadas são alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso (KAW, 2005; CAMPBELL, 2010). As fibras são caracterizadas pelo comprimento e muitas vezes pelo diâmetro da seção transversal. A relação entre estas grandezas (comprimento/diâmetro) é chamada de razão de aspecto, sendo muitas vezes considerada em sua classificação (CAMPBELL, 2010). Além do comprimento das fibras, outros fatores devem ser considerados como o arranjo ou disposição (transversal e/ou longitudinal), a concentração e a distribuição na matriz. Nesse tipo de compósito as fibras são os principais portadores de carga, enquanto a matriz as mantém na

posição e orientação desejadas, atuando como meio de transferência de tensão e protegendo-as de danos ambientais devido a temperatura, radiação, umidade elevadas e microorganismos (K. MALLICK, 2007).

Nos materiais compósitos geralmente a matriz é polimérica, oriunda de fontes fósseis, podendo ser termoplástica (Polipropileno - PP, Polietileno - PE, Policloreto de vinila - PVC, Politereftalato de etileno - PET) ou termorrígida (Epóxi, Poliéster ou Fenólica); e as cargas são partículas inorgânicas (talco, mica, argila, carbonato de cálcio) ou fibras sintéticas (carbono e de vidro) (FERNANDES et al., 2014a). Alguns pesquisadores vêm se aprofundando em práticas sustentáveis que visam substituir as matrizes e/ou cargas sintéticas por outras de fonte renovável.

Uma das práticas sustentáveis de maior destaque é o desenvolvimento de ecocompósitos, termo que surge na literatura com várias definições. Martínez Urreaga et al. (2015) definem como materiais no qual o reforço provém de fontes naturais, como por exemplo fibras à base de celulose. Boronat et al. (2015) o descrevem como aqueles em que pelo menos um dos componentes, quer a matriz quer o reforço, provém de recursos renováveis. Teixeira e César (2006) também consideram que o reforço pode ser oriundo de resíduos agroindustriais, florestais ou ainda de outros tipos, tais como escória mineral e plásticos reciclados, aumentando ainda mais a ecoeficiência do composto.

2.1.1. Matriz renovável

O material pode apresentar caráter de ecocompósito caso a matriz polimérica seja produzida a partir de matérias-primas de fontes renováveis como: milho, cana-de-açúcar, batata, trigo, beterraba, celulose, quitina; ou um óleo vegetal extraído de soja, girassol, palma ou outra planta oleaginosa (PRADELLA, 2006).

As fontes renováveis são assim conhecidas por possuírem um ciclo de obtenção mais curto quando comparado com fontes fósseis como o petróleo, que leva milhares de anos para se formar. Alguns fatores ambientais e socioeconômicos estão relacionados ao crescente interesse pelos biopolímeros, dentre eles os grandes impactos ambientais causados pelos processos de extração e refino utilizados para produção dos polímeros provenientes do petróleo, sua escassez e aumento do seu custo.

Entre os diversos tipos de biopolímeros são encontrados o poli(ácido lático) (PLA), um poliéster produzido pela fermentação do ácido lático e seguido de polimerização;

poli(hidroxicanoato) (PHA) produzido por fermentação direta de fonte de carbono por microrganismos ou em vegetais geneticamente modificados; polímeros de amido (PA) como o polissacarídeo natural modificado; xantana (Xan), polissacarídeos microbianos extracelulares produzidos pelo cultivo de *Xanthomonas campestris* em meio contendo carboidratos; poli(hidroxiacetato) (PHA), proveniente de fontes naturais renováveis ou sintetizados por bactérias; o polietileno verde (PE verde) e Policloreto de vinila verde (PVC verde), produzidos a partir do monômero eteno obtido através da desidratação do etanol oriundo da cana-de-açúcar (BORONAT et al., 2015; PRADELLA, 2006).

2.1.2. Carga renovável

O compósito também será considerado sustentável se a carga ou reforço for de origem renovável. Um destaque deve ser dado à utilização de material lignocelulósico em razão da enorme variedade de plantas disponíveis na biodiversidade, passíveis de serem aplicadas. Gandini e Belgacem (2008) estimaram que, em 2008 a biomassa vegetal mundial era cerca de 10^{13} ton e que a energia solar renova aproximadamente 3% dela por ano. Esses materiais correspondem à entrecasca de fibras, folhas ou fibras duras, sementes, frutas, madeira, palha de cereais e as outras fibras de grama (BRÍGIDA et al., 2010; MARINELLI et al., 2008).

A origem destes materiais pode ser tanto insumos virgens (cortiça, sisal, bananeira, algodão, juta, bucha, malva, madeira, linho, piaçava, cânhamo, bromélia, bambu), plantados para este fim específico, como pode ser de resíduos agroindustriais (bagaço de cana e de outros vegetais, casca do coco, casca do babaçu, abacaxi, papel, papelão, celulose, cascas e palha de cereais) ou de outras indústrias (TEIXEIRA; CÉSAR, 2006).

São vários os aspectos técnicos, além de considerações ecológicas, que promovem o interesse pelos materiais vegetais como suplemento ou substituição de reforços tradicionais em compósitos poliméricos: capacidade de resistir temperaturas de até 200°C, baixo custo, produção de resíduos de baixa toxicidade na incineração, não são abrasivas aos equipamentos de processo, apresentam boas propriedades mecânicas (peso x resistência) para aplicação de médio desempenho (BORONAT et al., 2015; CERQUEIRA; BAPTISTA; MULINARI, 2011; LUNDIN; FALK; FELTON, 2001; MORANDIM-GIANNETTI et al., 2012; MOTAUNG; ANANDJIWALA, 2015).

No geral os compósitos poliméricos reforçados com biomassa vegetal apresentam boas propriedades mecânicas de tração e impacto para aplicações de médio desempenho, tais como

divisórias, cestos, luminárias, etc. (DHAKAL et al., 2007). Em comparação com as fibras sintéticas as cargas na forma *in natura* apresentam propriedades mecânicas inferiores (A.K. BLEDZKI; GASSAN, 1996), no entanto, estas podem ser tratadas e utilizadas em proporções maiores por serem de baixo custo e renováveis fazendo com que os ecocompósitos alcancem parâmetros superiores aos iniciais.

O desempenho de qualquer compósito reforçado com fibras/partículas dependerá ainda da constituição, do grau de dispersão e interação entre carga e matriz (K. MALLICK, 2007). As superfícies de contato entre os componentes devem estar isentas de sedimentos (ceras e graxas), os quais impedem a formação de uma ligação eficiente na superfície das partículas, uma vez que a região interfacial é a principal responsável pela transferência da sollicitação mecânica da matriz para o reforço. A adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface poderá provocar o início de falhas, comprometendo o desempenho do compósito (FLORENTINO et al., 2011).

A fraca interação matriz/carga é a principal desvantagem do emprego de materiais vegetais em compósitos poliméricos devido ao fato de o reforço possuir natureza polar hidrofílica, ou seja, alta absorção de água, enquanto a matriz pode ter natureza apolar hidrofóbica (CARVALHO; CAVALCANTI, 2006). Portanto, muitos estudos têm sido realizados para melhorar essa aderência por meio da modificação da carga e/ou polímero utilizando métodos físicos ou químicos, capazes de melhorar a sua capacidade de intumescimento e modificar a sua microestrutura, textura da superfície, grupos químicos de superfície e resistência à tração influenciando positivamente na interação entre matriz e o polímero (BRÍGIDA et al., 2010; ROUT et al., 2001; SANCHEZ et al., 2010).

Métodos físicos e químicos são utilizados para modificar tanto a carga como a matriz polimérica. Os tratamentos físicos podem ser feitos por meio de aplicação de plasma ou tratamento térmico. Nos procedimentos químicos podem ser utilizados componentes silano, isocianatos, permanganato de potássio (KMnO_4), anidrido maleico, meio alcalino e etc. (SILVA et al., 2008; ANDRADE; NOBREGA, 2009). Para o melhoramento do reforço os mais utilizados são os métodos alcalinos, reações de acetilação e branqueamento (CARVALHO NETO et al., 2014).

Em relação à aplicação externa desses materiais, ou seja, utilização do material em ambientes de exposição a variações climáticas de luz e umidade, a incorporação de material lignocelulósico traz desvantagens caso a carga vegetal não esteja protegida pela matriz polimérica como a biodegradabilidade, absorção de umidade, causando inchaço, instabilidade

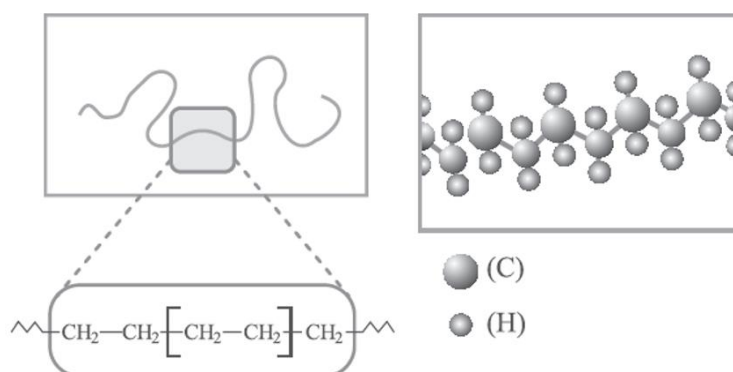
da superfície, fissuração da matriz, perda de integridade e da resistência estrutural do material (BAJWA; BAJWA; HOLT, 2015).

2.2. Polietileno e polietileno verde

Dentre os polímeros que podem ser utilizados como matriz no processamento de ecocompósitos destaca-se o Polietileno, polímero industrial de alto consumo e o segundo mais consumido no Brasil (ABIPLAST, 2016), por ser versátil, com baixa densidade, boa processabilidade (extrusão, injeção, moldagem por compressão), boas propriedades mecânicas, estabilidade térmica e baixo custo (FERNANDES; MANO; REIS, 2013).

O polietileno de alta densidade (PEAD) é um polímero termoplástico linear, semicristalino, que pode conter mais de 1000 grupos CH_2 na cadeia $[\text{CH}_2 - \text{CH}_2]_n$, como ilustrado na Figura 1. Por apresentar maior porcentagem de fase cristalina alguns autores, como por exemplo Visakh e Martinez (2015), ponderam que as regiões amorfas desse polímero são relativamente pequenas e o consideram cristalino com falhas e imperfeições uniformemente distribuídas. Dessa forma, as propriedades desse polímero podem ser acentuadamente influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina. A Tabela 1 apresenta as propriedades do PEAD.

Figura 1 - Representação esquemática da estrutura do PEAD.



Fonte: Coutinho, Mello e Santa maria (2003).

Tabela 1 – Propriedades do PEAD

Propriedades	PEAD
Temperatura de fusão (°C)	125 – 132
Densidade (g/cm ³)	0,94 – 0,97
Cristalinidade (% a partir densidade)	62 – 82
Cristalinidade (% a partir calorimetria)	55 – 77

Fonte: Adaptado de Doak (1986).

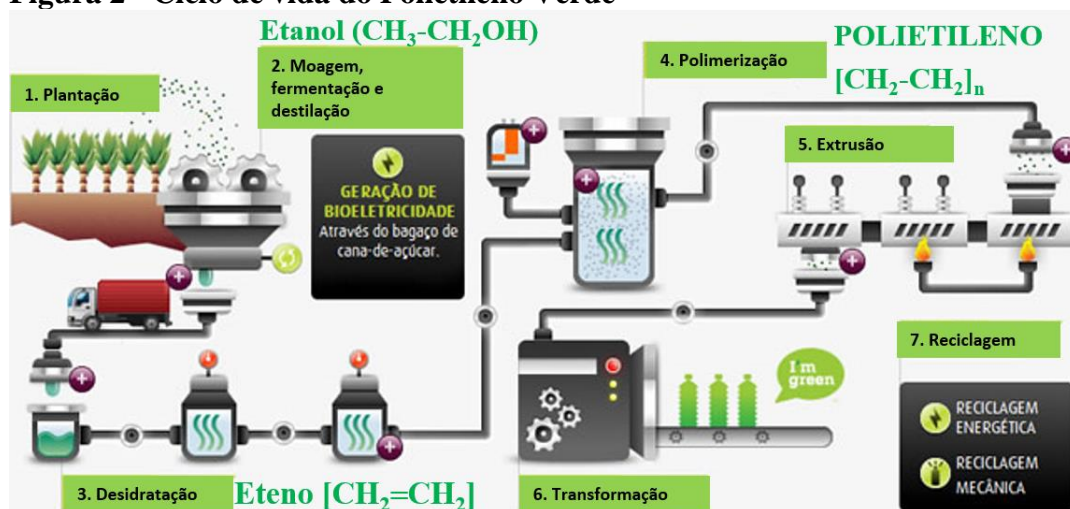
Entre as aplicações principais do PEAD estão diferentes segmentos da indústria de transformação de plásticos que envolvem técnicas de processamento de moldagem por sopro, extrusão e injeção (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). Esse termoplástico destaca-se por ser inerte a maioria dos produtos químicos comuns, ser parcialmente solúvel em todos os solventes em temperaturas abaixo de 60°C e não tóxico em condições normais (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

O polietileno pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como por exemplo da cana-de-açúcar, passando a denominado de polietileno verde. O termo verde é comumente utilizado para se referir a polímeros que durante a sua síntese, processamento ou degradação produzem menor impacto ambiental. Dessa forma, polímeros sintetizados a partir de matéria-prima proveniente de fontes renováveis também podem ser caracterizados como verdes (BRITO et al., 2011).

O polietileno verde de alta densidade é desenvolvido e produzido pela empresa petroquímica Braskem a partir do monômero de etileno obtido através da desidratação do etanol oriundo da cana-de-açúcar. A sua composição é exatamente igual ao polietileno de matéria-prima não renovável apresentando mesmo desempenho e características (BORONAT et al., 2015).

A utilização da cana-de-açúcar, na produção de polímeros, contribui na redução do aquecimento global por meio de absorção de CO₂ que veio originalmente da atmosfera e será novamente capturado pela cana-de-açúcar em safras posteriores, além da possibilidade de reaproveitamento dos subprodutos (bagaço) como fonte de energia (BRASKEM, 2017). A Figura 2 ilustra o ciclo de vida do Polietileno Verde.

Figura 2 - Ciclo de vida do Polietileno Verde



Fonte: Adaptado de BRASKEM (2017).

Segundo dados da Braskem (DE OLIVEIRA et al., 2016) para cada tonelada de polietileno verde produzido, uma média de 2,5 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) é removida da atmosfera, por meio da absorção pela plantação da cana-de-açúcar, ao invés de 2,5 toneladas de CO₂ serem liberadas pela produção do polietileno de matéria-prima fóssil, como a nafta petroquímica. Essa grande capacidade de reduzir os níveis de carbono da atmosfera se deve a três fatores: alta produtividade de cana-de-açúcar, utilizada como matéria-prima e fonte de energia; eficiência energética do etanol da cana-de-açúcar, que produz energia de fonte renovável nove vezes superior à energia fóssil; e a alta capacidade da molécula de polietileno de armazenar carbono (86% por peso) se comparada a outras resinas de base biológica.

2.3. Cortiça

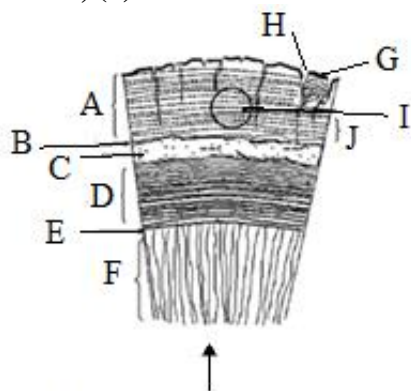
A cortiça é um material utilizado desde a Antiguidade, inicialmente como artefato flutuante e vedante. Atualmente a União Europeia é o maior produtor de cortiça, com mais de 80% da produção mundial, destacando-se Portugal com produção superior a 50% desse volume (GIL, 2012). Os subprodutos mais importantes da indústria dessa matéria-prima são a rolha e o pó da cortiça (FERNANDES et al., 2011; GIL, 2012; SILVA et al., 2005).

Este recurso de origem vegetal pode ser retirado do tronco e ramos dos sobreiros (*Quercus suber L*) periodicamente entre 9 e 12 anos de vida (GIL, 2012), após atingirem 25 cm de diâmetro (SILVA et al., 2005). O sobreiro é a única árvore cuja casca pode se regenerar após a colheita, sendo então um material totalmente renovável (FERNANDES et al., 2011). A cortiça é resultado de uma camada protetora de células mortas suberizadas, formadas a partir de tecido felogênio, tecido com capacidade de geração celular. Após a divisão celular as células não alcançam suas dimensões finais e seu interior continua a crescer e assim o tecido felogênio continua a engrossar e é responsável pelo aumento do perímetro da árvore (SILVA et al., 2005). A representação esquemática da seção axial de sobreiro pode ser observada na Figura 3.

Entre as suas características macroscópicas da cortiça estão: baixa densidade (média de 200 kg/m³), alta elasticidade, praticamente impermeável a líquidos e gases, baixa condutividade térmica e elétrica, alta absorção acústica e vibratória, inócuo, praticamente imputrescível, apresentando a capacidade de ser comprimida sem expansão lateral, além de ser renovável e biodegradável (GIL, 2012; PEREIRA; ROSA, 1987; SILVA et al., 2005). Microscopicamente, a cortiça é constituída de células no formato de prismas retangulares, principalmente pentagonal e hexagonal, semelhante a uma estrutura de favo de mel sem espaços vazios entre as células,

unidades fechadas, cujas membranas celulares possuem certo grau de impermeabilização e estão cheias de um gás semelhante ao ar, que ocupa cerca de 90% do volume. A cortiça possui ainda uma notável estabilidade química e biológica, e boa resistência ao fogo (PEREIRA; ROSA; M.A, 1987; GIL, 1998). A Figura 4 apresenta a estrutura celular da cortiça natural.

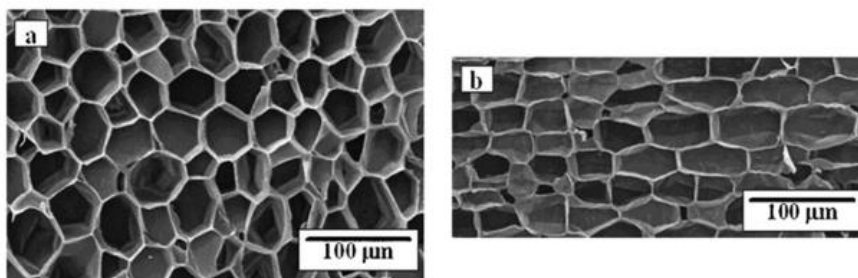
Figura 3 - Representação esquemática da seção axial de sobreiro; (A) cortiça (tecido suberoso), (B) limite subero-felogênio, (C) felogênio, (D) entrecasca, (E) limite entrecasca-madeira, (F) madeira, (G) casca, (H) canais lenticulares, (I) área para produção de rolhas, (J) anel de crescimento anual



Sentido do crescimento das árvores

Fonte: Silva et al. (2005).

Figura 4 - Microscopia eletrônica de varredura da cortiça natural (a) seção radial (b) seção tangencial



Fonte: Silva et al. (2005).

Com propriedades características anisotrópicas, a cortiça apresenta três principais direções definidas: radial (paralela ao raio da árvore), axial (direção vertical da árvore) e tangencial (perpendicular às outras duas). Para aglomerados de cortiça a anisotropia deixa de ser relevante dada a distribuição/orientação aleatória dos grânulos, o que é o caso da maior parte dos subprodutos de cortiça para a construção civil (GIL, 2012).

Assim como a madeira, a cortiça é um material lignocelulósico, no entanto, tem como principal componente químico das paredes celulares um poliéster alifático denominado de suberina, elemento não existente nas paredes celulares de madeira (PEREIRA; ROSA, 1987).

As membranas celulares são muito finas e desprovidas de canais de comunicação de célula a célula, formadas de suberina, lignina e celulose (SILVA et al., 2005).

As diversas características da cortiça estão diretamente relacionadas à sua estrutura e composição química. A Tabela 2 apresenta o teor médio dos constituintes da cortiça e a sua respectiva influência nas propriedades.

Tabela 2 - Influência dos constituintes da cortiça nas suas propriedades

Composto	Teor médio	Influência nas propriedades
Suberina	45 %	Compressibilidade e elasticidade
Lignina	27 %	Estrutura das paredes celulares
Polissacarídeos	12 %	Ligados a estrutura da cortiça
Ceróides	6 %	Repelem a água e contribuem para a impermeabilidade
Taninos	6 %	Cor e proteção/conservação do material
Cinzas	4 %	-

Fonte: Gil (1998).

2.3.1. Aplicações da cortiça em ecocompósitos

A cortiça, assim como as fibras naturais, tem sido cada vez mais utilizada como componente para o desenvolvimento de compósitos termoplásticos devido ao baixo custo da matéria-prima, sua biodegradabilidade, ser uma fonte renovável e as boas propriedades mecânicas e de isolamento térmico-acústico que podem ser conferidas ao material sem causar danos ambientais (BLEDZKI; GASSAN, 1996; FERNANDES; MANO; REIS, 2013).

Avanços em compósitos de base florestal apontam uma tendência de crescimento no uso de materiais lignocelulósicos como carga e/ou reforço em compósitos de plástico. O campo dos compósitos cortiça-polímero é um dos mais promissores para confecção de materiais melhorados com base no desenvolvimento sustentável, principalmente em aplicações onde a cortiça não poderia competir de forma isolada (FERNANDES; MANO; REIS, 2013).

A estética e a sensação de conforto ofertado pela cortiça são propriedades valorizadas em várias aplicações e a combinação com outros materiais pode promover aumento no seu desempenho. A construção civil é uma das indústrias que mais agrega produtos à base de cortiça, tais como isolantes térmicos, acústicos e vibratórios (paredes, tetos e pisos), tetos falsos, revestimento, rodapés, argamassas, juntas isolantes e de dilatação ou de compressão e outros (FERNANDES et al., 2010; GIL, 2012).

O maior desafio na produção de compósitos polímero-cortiça é promover boa ligação interfacial entre os componentes (FERNANDES et al., 2010). O caráter polar da cortiça tem

compatibilidade baixa com matrizes poliméricas não polares, especialmente com matrizes constituídas de hidrocarbonetos como o polietileno. Assim, a capacidade da matriz de transferir o estresse para a carga através da interface, quando submetido a esforço mecânico, é reduzida (BLEDZKI; GASSAN, 1996; FERNANDES et al., 2013).

Alguns estudos apresentaram estratégias de melhorar o desempenho mecânico de compósitos carga vegetal/matriz através de: (i) modificação química da carga vegetal (ABDALLAH et al., 2010; HUNG; CHEN; WU, 2012), (ii) uso de agente de acoplamento (ABDALLAH et al., 2010; FERNANDES et al., 2010, 2013, 2014b; FERNANDES; MANO; REIS, 2013; LUNDIN; FALK; FELTON, 2001), e (iii) produção de compósitos híbridos por meio do acréscimo de diferentes fibras naturais ou sintéticas (FERNANDES et al., 2013; FERNANDES; MANO; REIS, 2013; LUNDIN; FALK; FELTON, 2001).

A modificação química da cortiça pode limpar e modificar sua estrutura, reduzir a absorção de umidade e aumentar a rugosidade da superfície (FERNANDES et al., 2013). O uso de agente de acoplamento possibilita aumentar a compatibilidade e ligação interfacial entre matriz polimérica e componente disperso (FERNANDES; MANO; REIS, 2013). O desenvolvimento de compósitos híbridos, por meio da incorporação de fibras, proporciona uma combinação das vantagens dos componentes carga/fibra que faltam um no outro (FERNANDES et al., 2013).

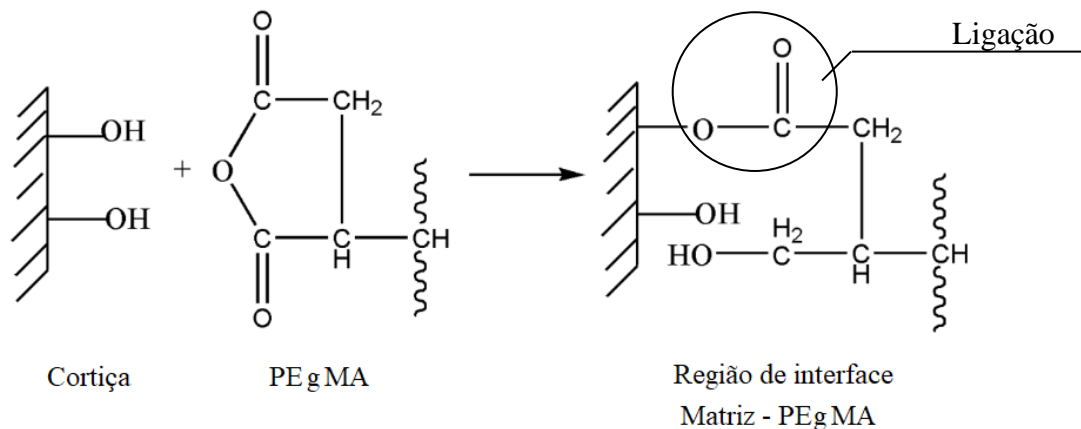
2.3.2. Agente de Acoplamento

A incorporação de agentes de acoplamento, como por exemplo, polímeros funcionalizados contendo grupos de anidrido maleico na composição apresentam-se como uma estratégia eficaz para melhorar a adesão interfacial até mesmo para teores de cortiça diferentes (FERNANDES et al., 2010, 2011; FERNANDES; MANO; REIS, 2013), proporcionando uma superfície hidrofóbica ao enchimento e aumentando a adesão com polímeros hidrofóbicos (BORONAT et al., 2015). A aplicação de agentes de acoplamento baseados em anidrido maleico se devem à sua fácil e econômica produção; e pelo excelente equilíbrio de propriedades a fim de preencher a interface entre espécies polares e não polares, ou seja, diversidade de ligações que podem existir simultaneamente em toda a interface e em diferentes graus (KEENER; STUART; BROWN, 2004).

O polietileno enxertado com anidrido maleico – PEgMA proporciona um desempenho superior em comparação a outros agentes de acoplamento de poliolefinas potenciais (KEENER;

STUART; BROWN, 2004). As interações entre os grupos anidrido do PEgMA e os grupos hidroxila da carga vegetal alteram a superfície do reforço permitindo molhabilidade pela matriz. A forte interação que ocorre entre carga e matriz com incorporação do agente de acoplamento é tanto de natureza física (ligação de hidrogênio) como química (ligação do tipo éster) que se forma entre as fibras de celulose e o agente de acoplamento. A cadeia do polietileno do compatibilizante se difunde no interior da matriz polimérica enquanto os grupos polares do anidrido maleico formam ligações covalentes com os grupos hidroxilas da carga (DOAN; GAO; MÄDER, 2006). A Figura 5 ilustra a reação de esterificação entre a cortiça e o PEgMA.

Figura 5 - Reação de esterificação entre a cortiça e o PEgMA



Fonte: Adaptado de Abdul majid, Ismail e Mat Taib (2014).

2.4. Polímeros na construção civil

A construção civil é o principal consumidor de transformados plásticos no Brasil, sendo responsável pelo consumo de 25,7% da produção nacional. Dentre as aplicações dos materiais poliméricos neste setor podemos encontrar tubos, cabos revestidos, conexões, esquadrias, revestimentos acústico e térmico (ABIPLAST, 2015), além de substituírem e complementarem materiais tradicionais como tijolos, concreto, metal, madeira e vidro.

O crescente uso de polímeros como material de construção nas últimas quatro décadas é devido a: disponibilidade de matéria-prima básica (petróleo, madeira, agricultura, silvicultura, resíduos de carvão etc.), conjunto de propriedades intrínsecas dos polímeros (leveza, estabilidade química, elasticidade etc.) e fácil metodologia de processamento tais como extrusão, formação térmica, moldagem por injeção, calandragem, fundição etc. (HALLIWELL, 2002). Entre as vantagens podemos citar a durabilidade e baixa necessidade de manutenção; disponibilidade em várias formas, cores e texturas exigindo pintura mínima ou nenhuma; são

resistentes à transferência de calor e à difusão de umidade, e não sofrem corrosão metálica ou ataque microbiano (PETERS, 2017).

Segundo Halliwell (2002) a indústria da construção civil enfrentará alguns desafios no próximo milênio e os materiais poliméricos podem ser uma alternativa para muitos deles: infiltrações, erosão química e ambiental, corrosão, necessidade de minimizar os custos, execução de estruturas portáteis, melhoramento do isolamento térmico e sonoro das estruturas, materiais e componentes com eficiência energética, aplicação de materiais ecológicos, reforços estruturais de monumentos históricos e outros.

Algumas propriedades devem ser consideradas ao especificar polímeros para aplicações na construção civil: mecânicas, térmicas e isolantes, resistência às intempéries, permeabilidade, inflamabilidade e impacto ambiental. As propriedades mecânicas definem limites de esforços suportados pelos compósitos como tensão de escoamento, tensão de ruptura e deformação. O estudo das propriedades térmicas define a faixa de temperatura sobre a qual o polímero retém suas propriedades úteis, enquanto as propriedades isolantes caracterizam o coeficiente de condutividade térmica e elétrica, que são geralmente baixos fazendo desses materiais bons isolantes. A durabilidade e resistência às intempéries determinam se o polímero é adequado para aplicações externas e quais aditivos podem ser incorporados na sua formulação. A permeabilidade mede a capacidade de transferência de gases e vapores através do polímero. A inflamabilidade dimensiona a velocidade ou tempo de queima, qualificando e quantificando os produtos gerados durante a combustão. O estudo de impacto ambiental permite comparar os danos causados à natureza e sociedade quando da utilização de polímeros sintéticos e de polímeros fabricados a partir de matérias-primas renováveis (HALLIWELL, 2002).

Os materiais compósitos, constituídos de polímeros e cargas vegetais, além de serem uma alternativa ecológica para diminuição de uso dos polímeros convencionais, apresentam uma combinação de propriedades não disponíveis em materiais tradicionais. Entre outras vantagens podemos citar leveza, resistência à corrosão, resiliência, translucidez e maior eficiência na construção em comparação com os materiais mais convencionais (HALLIWELL, 2002).

2.4.1. Conforto acústico

A poluição sonora é um dos problemas ambientais mais preocupantes do mundo, causando distúrbios do sono, interferência na fala, efeitos cardiovasculares, afetando a

eficiência do trabalho e a qualidade de vida dos seres humanos. Assim, reduzir o ruído aplicando materiais capazes de absorver ondas sonoras é essencial para diminuir os danos causados por esse fator (CAO et al., 2018; KIM et al., 2015; PROCEL, 2011).

O som é a sensação auditiva produzida por uma variação da pressão atmosférica a partir da vibração mecânica, que se propaga em forma de ondas, através de meio elástico e denso, e esse meio pode ser o ar, materiais sólidos e até mesmo líquidos, sendo a superfície vibrante chamada de Fonte Sonora. A vibração é transmitida na forma de ondas esféricas, que produzem uma pequena variação periódica da pressão atmosférica. A propagação e a variação periódica em forma de ondas, tem características determinadas: frequência (F), velocidade de propagação (c) e comprimento de onda (λ) (PROCEL, 2011). Onde:

F - Número de ciclos que a onda sonora completa em um segundo é denominado de cps ou Hertz (Hz), que nos dá a sensação de graves (baixas frequências) e agudos (altas frequências);

c - Velocidade de propagação do som. No ar é 340 m/s; e

λ - Distância entre frentes de máxima energia.

O sistema auditivo humano não responde de modo linear aos estímulos que recebe, mas de forma logarítmica. Os sons de baixa frequências são percebidos como sons graves e as altas frequências como sons agudos, podendo variar de 20 a 20.000Hz para uma pessoa jovem com audição normal. As frequências inaudíveis são classificadas como infrassons quando estão abaixo do limite da audição, aproximadamente 20 Hz, e de ultrassons quando estão acima da capacidade auditiva humana, em torno de 20.000 Hz (PROCEL, 2011). A Tabela 3 apresenta as frequências audíveis.

Tabela 3 – Frequências audíveis

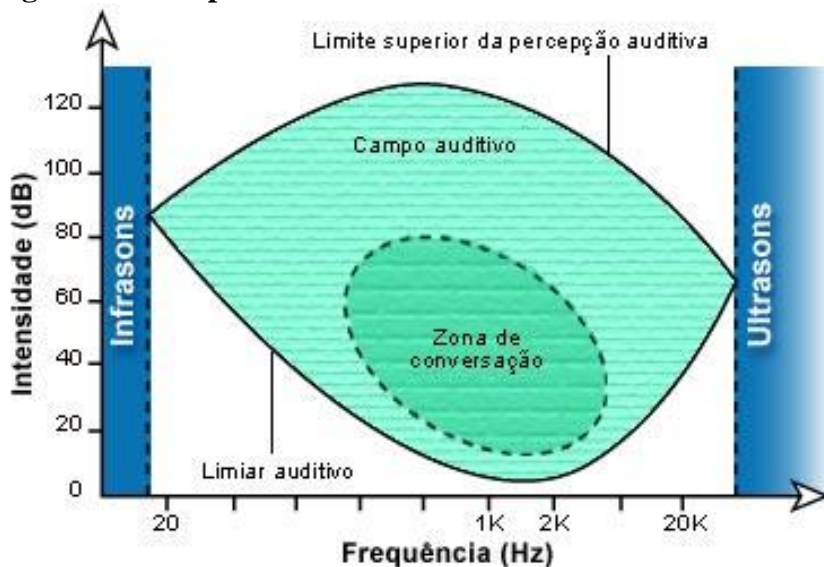
Infrassons (Hz)	Frequências audíveis (Hz)			Ultrassons (Hz)
0 - 20	Graves	Médios	Agudos	> 20000
	20 - 400	400 - 1600	1600 - 20000	

Fonte: PROCEL (2011).

A escala decibel permite avaliar o nível de intensidade sonora e é usada para estabelecer faixas de operação acústica dentro da zona de conforto humana. O valor de 0 dB corresponde ao nível sonoro audível mínimo (na frequência 3 kHz), enquanto 160 dB chega a ser tão intenso que pode perfurar instantaneamente o tímpano de uma pessoa. Os níveis sonoros confortáveis

para seres humanos estão relacionados com a frequência e podem ser vistos na região delimitada em azul na Figura 6 (LIMA, 2016).

Figura 6 – Campo auditivo dos seres humanos.



Fonte: <http://www.cochlea.org/po/som/campo-auditivo-humano>. Acesso em: 10 de set. 2019.

O controle das reflexões sonoras no ambiente melhora a inteligibilidade, o que torna essencial o controle de ruídos, sons considerados desagradáveis. Uma das alternativas é a aplicação de materiais com bom desempenho acústico nas edificações. Esse desempenho depende basicamente de dois fenômenos acústicos: absorção e transmissão sonora (PROCEL, 2011).

A absorção acústica ocorre quando parte da energia sonora incidente sobre determinada superfície não é refletida para o ambiente do qual são provenientes. Os materiais de absorção sonora disponíveis podem ser divididos em duas categorias: ressonantes e porosos. Os últimos são utilizados em abundância pois combinam propriedades de leveza, absorção em ampla faixa de frequência e alta capacidade de absorção sonora. São classificados como espuma ou fibrosos, e podem ser compostos por canais, rachaduras ou cavidades que permitem as ondas sonoras entrarem nos materiais, assim a energia acústica é dissipada pela perda térmica, causada pelo atrito das moléculas de ar com as paredes dos poros, e por meio da perda viscosa, provocada pela viscosidade do fluxo de ar dentro dos materiais (CAO et al., 2018; MAMTAZ et al., 2016). Dentre esses materiais, as espumas absorventes são constituídas por estruturas celulares conectadas entre si, característica que propicia consumo de energia e dotam os materiais porosos com ampla faixa de frequência para absorção sonora (BERARDI; IANNACE, 2015; MAMTAZ et al., 2016).

O mecanismo de absorção sonora dos materiais porosos é semelhante ao de outros materiais. Quando as ondas atingem o meio ocorrem três tipos de transformações: reflexão, absorção e transmissão. A Figura 7a apresenta esse processo de conservação de energia sonora, que pode ser considerada a soma da energia refletida, absorvida e transmitida (BUJOREANU et al., 2017).

$$E_i = E_r + E_a + E_t$$

Equação 1

Onde:

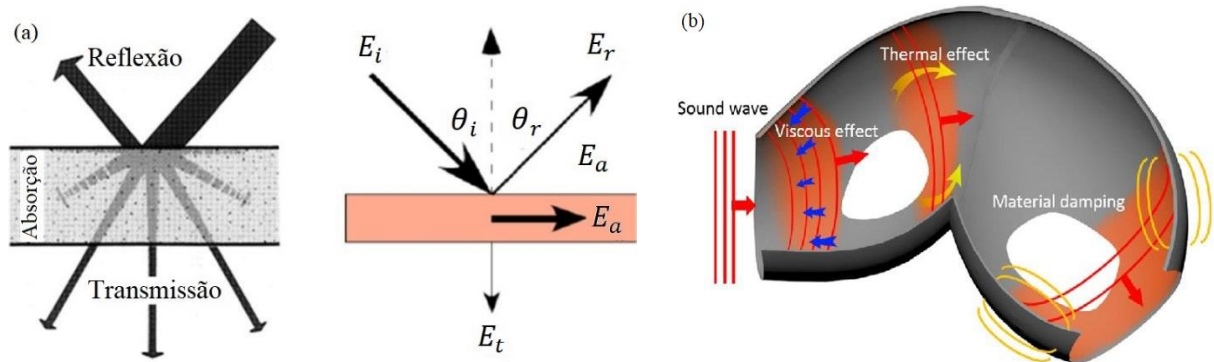
E_i é a energia sonora total incidente;

E_r é a energia sonora refletida;

E_a é a energia sonora absorvida; e

E_t é a energia sonora transmitida.

Figura 7 – (a) Esquema do processo de absorção sonora em materiais porosos. (b) Diagrama esquemático mostrando os mecanismos de consumo de energia de materiais de absorção sonora porosos



Fonte: (a) Adaptado de Bujoreanu et al. (2017); (b) Rahimabady et al. (2017).

A capacidade de dissipação sonora dos materiais pode ser quantificada pelo coeficiente de absorção sonora α , parâmetro mensurado em tubo de impedância ou câmara de reverberação. Esse coeficiente varia entre 0,01 e 1, indicando a quantidade de energia sonora que o material absorve em cada reflexão, por frequência, normalmente em 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz. É descrito como a razão entre a energia sonora absorvida e a energia total incidente (CAO et al., 2018; PROCEL, 2011):

$$\alpha = 1 - \frac{E_r + E_t}{E_i} = \frac{E_a}{E_i}$$

Equação 2

Onde:

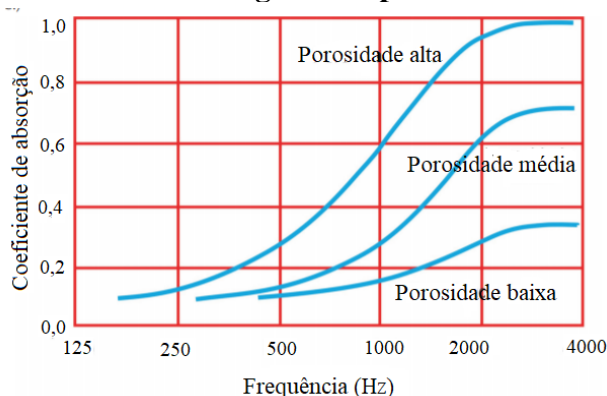
$\alpha = 0,01$ significa absorção de 1% da energia do raio sonoro, e devolução de 99% para o ambiente.

$\alpha = 1,00$ significa absorção de 100% da energia do raio sonoro, e devolução de 0% para o ambiente.

Segundo Peng et al. (2015) e Rahimabady et al. (2017) o consumo de energia sonora em materiais porosos segue principalmente os três princípios: (1) as moléculas de ar vibram e são friccionadas contra as paredes dos poros, levando à conversão da energia sonora em calor e em seguida são dissipadas; (2) quando as ondas sonoras longitudinais penetram nos materiais porosos, o ar nos poros é periodicamente comprimido e liberado, resultando no consumo de energia durante o processo de transformação de energia; (3) a energia sonora seria convertida em energia mecânica e térmica através da ressonância das paredes dos poros (Figura 7b). Dessa forma, existem três critérios importantes para que um material poroso seja bom absorvedor sonoro: (1) os materiais devem consistir em um número considerável de poros (como cavidades, canais ou interstícios); (2) os poros devem ter o tamanho adequado e interconectados entre si para a propagação das ondas sonoras; e (3) devem existir canais contínuos entre os poros internos e a superfície externa dos materiais (ARENAS; CROCKER, 2010).

A maior absorção sonora dos materiais porosos se produz nas altas frequências (sons agudos). Quanto maior a porosidade do material, maior será a absorção dos sons agudos. A absorção dos sons graves e médios depende de grandes espessuras do material, o que na prática dificilmente é aplicado (PROCEL, 2011). A Figura 8 apresenta a variação da absorção em função da frequência de um material absorvente com diferentes graus de porosidade.

Figura 8 – Variação da absorção acústica em função da frequência de um material absorvente com diferentes graus de porosidade



Fonte: PROCEL (2011).

2.4.2. Degradação abiótica nos polímeros

O processo de degradação de polímeros é resultado de reações químicas que podem ser intra ou intermoleculares, responsáveis pela alteração das características inerentes dos polímeros, tais como: flexibilidade, resistência elétrica, aspecto visual, resistência mecânica e dureza (LUCAS et al., 2008; BRANDALISE, 2008; DE PAOLI, 2009).

O estudo da durabilidade e resistência às intempéries determina se o polímero é adequado para aplicações externas, e quais aditivos devem ser incorporados à sua formulação (HALLIWELL, 2002). A degradação e o envelhecimento dos polímeros dependem de vários fatores abióticos e acontecem de acordo com os processos de: cisão de ligações na cadeia principal ou em grupos laterais, reticulação, auto-oxidação, eliminação ou substituição de cadeias laterais, reações intramoleculares e despolimerização. As reações podem ter origem mecânica, térmica e química (termo-oxidativa, fotodegradação e foto-oxidação) (HALLIWELL, 2002; LUCAS et al., 2008).

O estudo das causas dos mecanismos de degradação é de fundamental importância para estimar a durabilidade e resistência dos materiais poliméricos. Dentre os fatores relevantes estão: esforços mecânicos, radiação solar e transformação química (LUCAS et al., 2008).

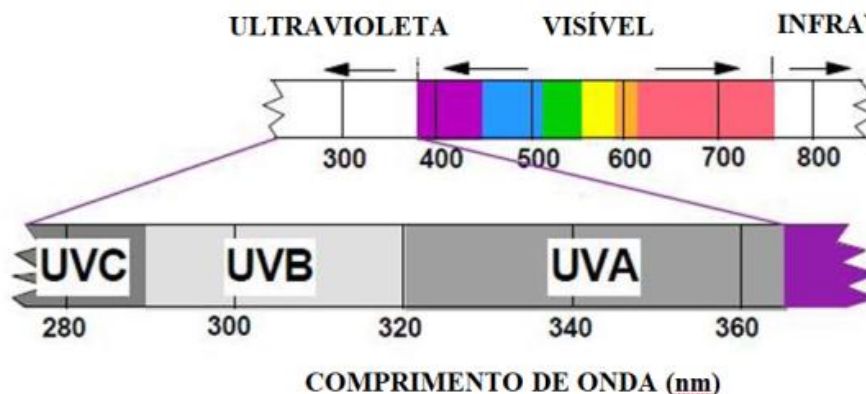
Os esforços mecânicos aplicados sobre os materiais expostos às intempéries podem ser forças de compressão, tensão e/ou cisalhamento oriundos de causas diversas como, por exemplo, no momento da instalação do material, correntes de ar e chuvas. (LUCAS et al., 2008).

A exposição de polímeros à radiação solar promove a fotodegradação, consistindo na tendência natural da maioria desses materiais de sofrer uma reação gradual com oxigênio atmosférico na presença de luz. O mecanismo envolve a absorção da luz UV, que leva à geração de radicais livres. Em seguida, ocorre um processo de auto-oxidação que leva à eventual desintegração do plástico (AMMALA et al., 2011).

A região do ultravioleta - UV pode ser subdividida em três faixas de comprimento de onda: UV-A de 315 – 400nm, UV-B de 290 a 315nm e UV-C abaixo de 290 nm conforme ilustrado na Figura 9. A faixa UV-B é considerada a mais agressiva para os polímeros (BRANDALISE, 2008). A luz ultravioleta, emitida na faixa de 280 a 400 nm, representa aproximadamente 5% da radiação total que alcança a superfície da terra e sua radiação tem efeitos prejudiciais tanto em polímeros naturais, como também em polímeros sintéticos (KATANGUR; PATRA; WARNER, 2006). A degradação ao ar livre de polímeros ocorre principalmente devido a absorção de radiação UV da luz solar com energias variando de 300 a

450kJ/mol. De forma resumida, a degradação pode ocorrer quando a quantidade de energia absorvida excede a energia de ligação de um polímero (KATANGUR; PATRA; WARNER, 2006) dando início ao mecanismo de formação de radicais livres, que resulta na modificação química e na redução do peso molecular (SOUSA et al., 2006).

Figura 9 - Faixas da distribuição relativa de energias do espectro eletromagnético



Fonte: Mercola (2008).

A transformação química se deve a ação de poluentes atmosféricos, oxigênio (degradação oxidativa) e água (degradação hidrolítica) que podem interagir com os polímeros alterando suas propriedades. O oxigênio é a principal substância estudada em termos de degradação, pois ataca ligações covalentes produzindo radicais livres levando a reações de cisão de cadeia e/ou reticulações (LUCAS et al., 2008). Fenômenos que envolvem reações com o oxigênio atmosférico na presença de luz e/ou calor são conhecidos como degradações foto-oxidativas e termo-oxidativas, respectivamente (AMMALA et al., 2011; ELENÍ et al., 2009) e são os principais meios de envelhecimento natural dos polímeros quando expostos ao intemperismo (YAKIMETS; LAI; GUIGON, 2004).

Para compósitos poliméricos com aplicações externas a fotodegradação também depende do tipo de polímero, sua composição e estrutura sobre as condições de exposição (YAKIMETS; LAI; GUIGON, 2004). O efeito sinérgico das condições climáticas pode ser considerado o fator agravante para a degradação dos polímeros.

As alterações provocadas nos polímeros aparecem na superfície e com exposição contínua se estendem para as camadas internas, podendo ser caracterizadas por alteração de cor na superfície, formação gradual de fissuras, diminuição da transparência, formação de bolhas, alterações na forma ou tamanho, mudanças nas propriedades mecânicas, elétricas ou na solubilidade (HALLIWELL, 2002; HUNG; CHEN; WU, 2012). Tais mudanças estão quase

sempre associadas aos processos de cisão de cadeia e, em alguns casos, ocorrem também reticulações (WANASEKARA; CHALIVENDRA; CALVERT, 2011).

Os polímeros baseados em poliolefinas, como por exemplo o polietileno, são resistentes à hidrólise e por isso são caracterizados por possuir degradação lenta (JAKUBOWICZ, 2003). O polietileno por ser um polímero semicristalino tem suas propriedades acentuadamente influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina (VISAKH; MARTINEZ, 2015).

A presença de fase cristalina torna o PEAD impermeável a O_2 e H_2O limitando a degradação química e levando as reações de degradação a ocorrerem predominantemente nas regiões amorfas e a serem controladas pela difusão de O_2 nesta região (LUCAS et al., 2008; STARK; MATUANA, 2004). Enquanto a cisão de cadeia ocorre na fase amorfa do polímero, a reticulação induzida pela radiação UV ocorre em regiões cristalinas imperfeitas (SHEA, 2001). A radiação UV causa a produção de alguns grupos polares como C=, C=O, C-O-C, OH, COOH e como consequência ocorre a redução do peso molecular, acompanhada de rompimento, reticulação e/ou ramificação da cadeia polimérica (YANG et al., 2005).

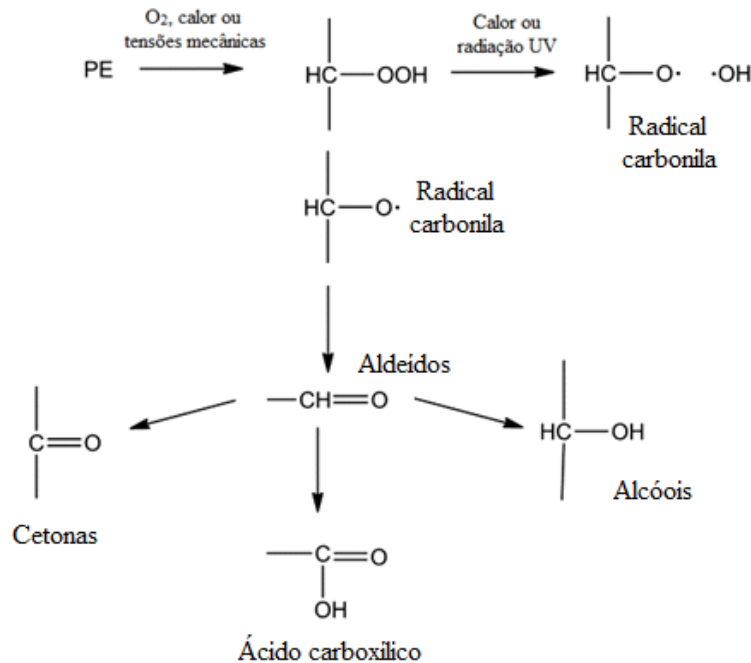
A Figura 10 apresenta alguns dos produtos do polietileno formados como resultado do processo de fotodegradação (AMMALA et al., 2011). O ponto de partida para a fotodegradação pode ser a formação de um grupo hidroperóxido (-CH-OOH), resultado do processo de foto-oxidação durante aplicação de tensões de cisalhamento, como por exemplo, esforços ocasionados no processo de extrusão, o qual é foto e termicamente instável. Este se decompõe em radicais carbonilas que atuam nos processos de reação de cadeia polimérica (WILES; SCOTT, 2006). A presença de grupos carbonilas, presentes nas carboxilas ou ácidos carboxílicos, ésteres, aldeídos, entre outros, é um indicativo de degradação oxidativa, indicando que o material ainda está vulnerável a outras degradações, uma vez que esses grupos são sensíveis a luz (WHITE; TURNBULL, 1994).

A degradação abiótica de polímeros pode ser investigada por meio dos métodos de envelhecimento natural, no qual o material fica exposto diretamente à luz solar, ou envelhecimento artificial, no qual é simulada a radiação solar utilizando fontes geradoras de radiação UV e ciclos de umidade (FERREIRA, 2007).

A técnica de envelhecimento natural expõe as amostras às condições reais por determinado período e deve ser acompanhada de alguns cuidados a serem tomados, como por exemplo, a escolha correta do local de exposição, pois este deve representar o ambiente de interesse devendo-se evitar períodos de sombreamento a qualquer hora do dia (ASTM D1435-

12). O ensaio deverá ser realizado segundo as normas ASTM D5272-08, ASTM D1435-12 e requisitos de práticas G7/G7M-13.

Figura 10 - Ilustração da degradação foto-oxidativa do PEAD



Fonte: Adaptado de AMMALA et al. (2011).

2.4.3. Desempenho Térmico

O desempenho térmico de uma edificação é determinado pelo balanço de trocas térmicas entre o meio externo e o interno, ou seja, pela quantidade de calor recebida e perdida pela edificação. Essas trocas ocorrem em função da radiação solar incidente, do potencial de ventilação natural, da orientação solar e dos ventos, da forma da edificação, dos materiais de revestimento de paredes e cobertura, entre outros. Uma forma de avaliar esse desempenho é o grau de satisfação do usuários quando essas edificações são submetidas a condições normais de exposição (SANTOS; SILVEIRA, 2013).

Os materiais utilizados nas construções podem ser fatores determinantes das condições ambientais dos espaços internos, pois controlam as trocas térmicas entre o meio externo, em função da radiação solar e das temperaturas externas; e interno, nos edifícios condicionados naturalmente (SANTOS; SILVEIRA, 2013).

São três as propriedades que controlam essas trocas: a resistência térmica das superfícies, a inércia térmica da construção e a absorção ou reflexão da radiação solar pelas

superfícies externas da edificação; o que deixa claro que o desempenho térmico de uma edificação depende do uso de materiais nas paredes externas e na cobertura adequados ao clima da região a fim de minimizar os gastos com climatização artificial dos ambientes internos (GIVONE, 1997).

Visando reduzir o consumo de energia das edificações e proporcionar conforto térmico muitos países desenvolveram regulamentações sobre eficiência energética das mesmas. Essa relação entre consumo de energia e conforto térmico vem sendo objeto de estudo da arquitetura bioclimática, área apontada como uma solução adequada para proporcionar equilíbrio desses fatores nas construções, pois edificações bioclimáticas são projetadas com elementos construtivos adequados as condições climáticas do local (BILÉSIMO; RAMPINELLI; MARCELINO, 2018; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016).

No Brasil, a NBR 15220 propõe o zoneamento bioclimático do país em oito áreas e para cada uma delas há um conjunto de estratégias sugeridas. A Tabela 4 apresenta estratégias de conforto térmico propostas pela norma.

Tabela 4 - Estratégias de condicionamento propostas pela NBR 15220 - Parte3.

Estratégia	Detalhamento
A	O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio.
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
D	Caracteriza a zona de conforto térmico (a baixas umidades).
E	Caracteriza a zona de conforto térmico.
F	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
G e H	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica no período de verão pode ser amenizada através da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.
H e I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.

K	O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.
L	Nas situações em que a umidade relativa do ar foi muito baixa e a temperatura do ar estiver entre 21°C e 30°C, a umidificação do ar proporcionará sensações térmicas mais agradáveis. Essa estratégia pode ser obtida através da utilização de recipientes com água e do controle de ventilação, pois esta é indesejável por eliminar o vapor proveniente de plantas e atividades domésticas.

Fonte: ABNT (2005) – Parte 3.

O isolamento térmico é conhecido por desempenhar um papel vital na economia de energia, reduzindo a taxa de transferência de calor (BINICI; AKSOGAN, 2015). Os materiais considerados isolantes térmicos podem controlar o fluxo de calor de três maneiras: isolamento reflexivo, resistivo e capacitivo. O isolamento resistivo é feito a partir de materiais com baixos valores de condutividade térmica, a maior parte possuindo ar incorporado no seu interior em forma de pequenas células de ar separadas por finas membranas inorgânicas (vermiculita, silicato de cálcio etc.), orgânicas (cortiça, poliuretano, poliestireno etc.) e metálicas; ou em forma de fibras sintéticas (lã de rocha, lã de vidro etc.) ou naturais (celulose, algodão, madeira etc.) (AL-HOMOUD, 2005; SZOKOLAY, 2004; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2004).

De acordo com a ABNT (2005) os materiais são classificados como isolantes térmicos por apresentarem baixa densidade e baixa condutividade térmica. A condutividade térmica (λ) é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se observa um fluxo de calor constante, com densidade de 1W/m², quando submetido a um gradiente de temperatura de 1K/m. Quando os valores de λ são menores que 0,1 W/mK o material pode ser considerado isolante.

A medição da condutividade térmica de um material pode ser determinada pelo princípio da placa quente protegida, no qual os dois lados de um material são expostos a uma diferença de temperatura, havendo troca de calor por condução e a intensidade do fluxo de calor passa a depender da condutividade térmica e da espessura do material (ABNT, 2005). Esse parâmetro depende da densidade e representa a capacidade de um material de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo (AL-HOMOUD, 2005). A Tabela 5 apresenta a densidade e condutividade térmica de alguns materiais.

Os dados da Tabela 5 indicam que a cortiça, matéria-prima utilizada nesse estudo, apresenta condutividade térmica similar aos dos materiais sintéticos considerados isolantes térmicos (lã de rocha, lã de vidro, poliestireno expandido, poliestireno extrudado e espuma de poliuretano), no entanto, neste trabalho ela será misturada ao polietileno verde, que apresenta coeficiente $\lambda=0,40$, valor maior que o do PVC, $\lambda=0,20$, material a ser substituído. Assim, como

não foi medido λ para os ecocompósitos desenvolvidos, esse trabalho irá comparar o conforto térmico proporcionado, por meio das medições de temperaturas internas, para cada tipo de material.

Tabela 5 – Densidade aparente e condutividade térmica de materiais.

Material	Densidade (kg/m ³)	λ (W/mK)
Lã de rocha	20-200	0,045
Lã de vidro	10-100	0,045
Poliestireno expandido moldado	15-35	0,040
Poliestireno extrudado	25-40	0,035
Espuma rígida de poliuretano	30-40	0,030
Cortiça	140-170	0,040 – 0,045
Aglomerado expandido de cortiça	100-120	0,035 – 0,070
Borrachas sintéticas, poliamidas, poliésteres, polietilenos	900-1700	0,40
Polimetacrilicos de metila (acrílicos) policloreto de vinila (PVC)	122-1400	0,20
Placas de Fibrocimento	1800-2200	0,95
	1400-1800	0,65

Fonte: Adaptado de ABNT (2005) e PEREIRA; PEREIRA (2007).

2.5. Proposta de aplicação dos ecocompósitos

Considerando as vantagens dos materiais propostos para o desenvolvimento do ecocompósito, bem como a intenção de aplicação do mesmo na construção civil, a proposta deste trabalho é desenvolver placas modulares para utilização como forro em construções provisórias “tipo barracão” dentro de canteiro de obras. A Figura 11 apresenta modelo de construção provisória executada em canteiros de obras tipo “barracão”.

Figura 11 – Construção provisória executada em canteiros de obras tipo “barracão”



Fonte: <http://construtorvirtual.com.br/instrucao-de-trabalho-piso-do-barracao-modulado/>. Acesso em: 10 de set. 2019.

A proposta partiu do pressuposto de que os órgãos públicos que elaboram orçamentos e executam obras e serviços de engenharia com recursos dos orçamentos da União obrigatoriamente fazem uso do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI como ferramenta para estimar o preço dos serviços (Art. 6º do Decreto nº 7.983 de 08 de abril de 2013).

O banco de preços do SINAPI é atualizado pela Caixa Econômica Federal e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e por força do decreto, atualmente, é utilizado nacionalmente. Nele podem ser encontrados mais de 11 mil itens e composições de serviços, entre eles custos que abordam construções provisórias em canteiro de obras, àquelas que tem vida útil com período igual ao cronograma de execução da obra, ou seja, são instaladas no início e desinstaladas ao final dos serviços, podendo ser do tipo escritório, almoxarifado, refeitório, sanitário, vestiário, depósito, guarita e outros. A Figura 12 apresenta alguns desses serviços previstos no SINAPI.

Figura 12 – Composição sintética da Tabela SINAPI (Data referência 10/08/2019)

SINAPI - SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL 1 30 de 608

PCI.817.01 - CUSTO DE COMPOSIÇÕES - SINTÉTICO DATA DE EMISSÃO: 15/08/2019 23:54:39

ENCARGOS SOCIAIS DESONERADOS: 86,16% (HORA) 49,47% (MÊS) DATA REFERÊNCIA TÉCNICA: 10/08/2019

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UNIDADE	ORIGEM DE PREÇO	CUSTO TOTAL
VÍNCULO.....: CAIXA REFERENCIAL				
0001	CONSTRUCAO DO CANTEIRO			
92235	FECHAMENTO DE CONSTRUÇÃO TEMPORÁRIA EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA E=1 0MM, COM REAPROVEITAMENTO DE 2X.	M2	CR	49,65
93206	EXECUÇÃO DE ESCRITÓRIO EM CANTEIRO DE OBRA EM ALVENARIA, NÃO INCLUSO MOBILIÁRIO E EQUIPAMENTOS. AF_02/2016	M2	AS	726,81
93207	EXECUÇÃO DE ESCRITÓRIO EM CANTEIRO DE OBRA EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA, NÃO INCLUSO MOBILIÁRIO E EQUIPAMENTOS. AF_02/2016	M2	AS	657,76
93208	EXECUÇÃO DE ALMOXARIFADO EM CANTEIRO DE OBRA EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA, INCLUSO PRATELEIRAS. AF_02/2016	M2	AS	514,35
93209	EXECUÇÃO DE ALMOXARIFADO EM CANTEIRO DE OBRA EM ALVENARIA, INCLUSO PRA TELEIRAS. AF_02/2016	M2	AS	589,21
93210	EXECUÇÃO DE REFEITÓRIO EM CANTEIRO DE OBRA EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA, NÃO INCLUSO MOBILIÁRIO E EQUIPAMENTOS. AF_02/2016	M2	AS	361,18

Fonte: http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_654. Acesso em: 11 de set. 2019.

Em todas as composições de construções provisórias para canteiros de obras do SINAPI é possível verificar a previsão de instalação de forro em PVC como insumo e parte do preço total. A descrição desse insumo pode ser vista na Figura 13.

As construções provisórias foram escolhidas como alvo desse estudo por serem adotadas nacionalmente, ou seja, se previstas em orçamento devem ser executados em todas as regiões do país conforme descrito no SINAPI. No entanto, dependendo da região na qual os serviços forem realizados as especificações previstas nas composições podem não favorecer as condições de trabalho dos agentes envolvidos na construção civil.

Figura 13 – Insumo nº 11587 de forro PVC liso previsto na Composição analítica nº 932017 (Data referência 10/08/2019)

SINAPI - SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL 1

140 de 3271

PCI.818.01 - CUSTOS DE COMPOSIÇÕES ANALÍTICO

DATA DE EMISSÃO:13/08/2019 01:02:55

ENCARGOS SOCIAIS DESONERADOS: 86,16%(HORA) 49,47%(MÊS)

ABRANGENCIA: NACIONAL

DATA REFERENCIA TECNICA: 10/08/2019

VÍNCULO : CAIXA REFERENCIAL

I	11587 FORRO DE PVC LISO, BRANCO, REGUA DE 10 CM, ESPESSURA DE 8 MM A 10 MM (COM M2	CR	0,9938000	55,28	54,93
---	--	----	-----------	-------	-------

COLOCACAO / SEM ESTRUTURA METALICA)

Fonte: http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_654. Acesso em: 11 de set. 2019.

A instalação de forro em PVC nos canteiros de obras pode ser um desses exemplos. O material apresenta inúmeras vantagens como durabilidade, rapidez na instalação, resistência a umidade, facilidade de limpeza, variedades de cores e estilo e baixo preço, no entanto, o material tem baixa capacidade de isolamento acústico e térmico. Assim, se utilizado na região do Sul do Brasil, na qual as temperaturas são baixas e necessitam até de aquecimento solar, o forro tipo PVC pode satisfazer as condições de trabalho, ao contrário da sua utilização na região Nordeste, onde podem ser encontradas altas temperaturas, como por exemplo em Teresina-PI onde as temperaturas médias máximas estão entre 33 a 36°C, o que resulta na necessidade de refrigeração mecânica e conseqüentemente no aumento de consumo de energia.

Dessa forma, para fins de aplicação, a presente tese propôs a construção de protótipo de construção provisória, com o intuito de sugerir a substituição do forro em PVC, previsto na composição do SINAPI, pelo ecocompósito desenvolvido, analisando o desempenho térmico e outras vantagens que o material pode vir a apresentar. Dentre os barracões previstos no SINAPI esse trabalho adotará o tipo “escritório”, considerando este ser o local no canteiro de obras a ser ocupado em maior tempo quando comparado aos demais. Como referência será utilizada a composição nº 93207 (Figura 12).

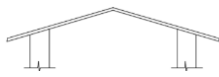
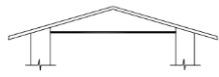
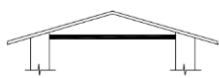
2.5.1. Coberturas

A cobertura é o elemento de uma edificação mais exposto à radiação solar, em razão de sua posição quase horizontal. Nos climas quentes e úmidos esse elemento deve isolar sem armazenar calor, ou seja, deve ter pequena massa térmica, devendo ser composta pelo conjunto do telhado e o forro, ambos de materiais leves e de preferência com ático ventilado (SANTOS; SILVEIRA, 2013).

Neste trabalho o protótipo proposto é formado por uma cobertura de telha fibrocimento, conforme especificação do SINAPI, material que apresenta alto coeficiente de condutividade

térmica $\lambda=0,65-0,95$ (Tabela 5), o que desfavorece o desempenho térmico nessas construções, apesar de provisórias. A Tabela 6 apresenta outras características térmicas de uma cobertura de telha fibrocimento com e sem forro.

Tabela 6 – Resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico para cobertura de fibrocimento

Cobertura	Descrição	R_T ($m^2.K/W$)	U ($W/m^2.K$)	C_T (J/K)	ϕ (horas)
	Cobertura de telha de fibrocimento sem forro Espessura da telha: 0,7cm	0,217	4,60	11	0,2
	Cobertura de telha de fibrocimento com forro de madeira Espessura da telha: 0,7cm Espessura da madeira: 1,0cm	0,500	2,00	25	1,3
	Cobertura de telha de fibrocimento com forro de concreto Espessura da telha: 0,7cm Espessura do concreto: 3,0cm	0,444	2,25	77	2,6

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

Sendo:

R_T - Resistência térmica total, somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna R_{si} e externa R_{se} ;

R_{si} - Resistência superficial interna, Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção;

R_{se} - Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção o.

U - Transmitância térmica ou Coeficiente global de transferência de calor, inverso da resistência térmica total;

C_T - Capacidade térmica, quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema;

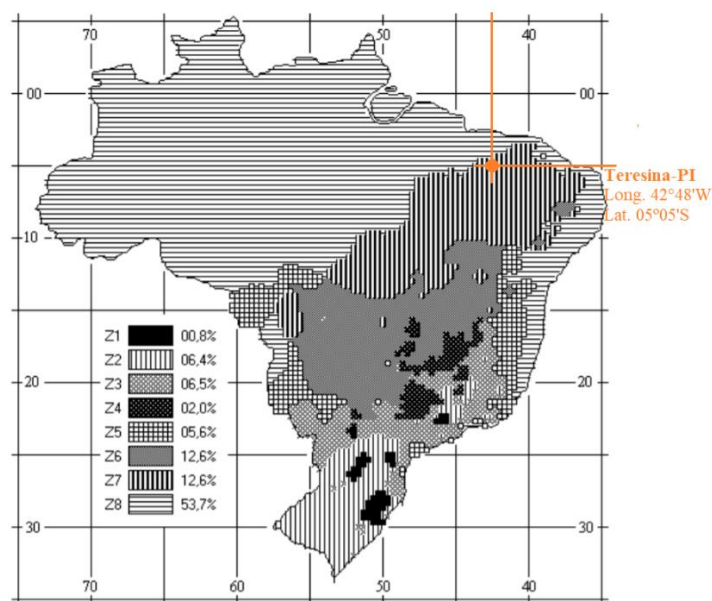
ϕ - Atraso térmico, tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor, relativamente baixo.

2.5.2. Diretrizes bioclimáticas

A cidade de Teresina situa-se a 05°05' de latitude sul e 42°48' de longitude oeste, dentro da macrorregião do meio-norte do Estado. O clima da região caracteriza-se por ter duas estações bem distintas. Durante o primeiro semestre o clima é quente e úmido, com a média das temperaturas máximas entre 30 a 32°C e umidade relativa média entre 75 a 85%. As chuvas são concentradas neste período, nos meses de dezembro a maio. No segundo semestre, praticamente não há precipitações, o clima é quente e seco, com temperaturas médias máximas entre 33 a 36°C e umidade relativa do ar entre 55 a 65%. Há elevada escassez de corrente de ar, cerca de 40% das horas do ano, e os ventos são fracos, com velocidade média de 1,4 m/s e direção predominante sudeste (SANTOS; SILVEIRA, 2013). No mapa de zoneamento bioclimático brasileiro proposto pela NBR-15220 a cidade de Teresina-PI está situada na região bioclimática Z7.

A Figura 14 apresenta a localização da cidade de Teresina no mapa bioclimático.

Figura 14 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro



Fonte: Adaptado de ABNT (2005) – Parte 3.

As diretrizes de projeto recomendadas para a região de Teresina-PI são: fazer uso de ventilação seletiva, uso de vegetações que podem conduzir e administrar as correntes de ventos; técnicas de resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento, materiais que absorvem uma boa quantidade de calor durante o dia e liberam este calor lentamente à noite.

2.6. Revisão Bibliográfica específica

A seguir são apresentados alguns dos estudos relevantes tomados como base para a consolidação desta pesquisa.

No intuito de comparar compósitos constituídos de fibras comerciais com compósitos reforçados com cortiça Fernandes et al. (2011) incorporaram cortiça em pó (50%) à matrizes termoplásticas de polipropileno – PP e polietileno de alta densidade – PEAD, e estabilizante térmico por meio do processo de pultrusão. Os corpos de prova foram moldados por compressão a fim de produzir placas para aplicações na construção civil como revestimento de pisos e móveis. O material foi caracterizado por meio de ensaios de resistência à flexão e ao impacto, dureza, estabilidade dimensional (absorção d'água e espessura) e desempenho térmico e acústico, a fim de comparar os ecocompósitos com produtos comercialmente disponíveis (painéis de fibra de média e alta densidade, MDF e HDF, respectivamente). Quando comparados aos compósitos com fibra de madeira os compostos de cortiça apresentaram melhor estabilidade dimensional, menor absorção de água e melhor desempenho acústico. Para os aspectos de dureza e resistência ao fogo foram identificados comportamentos similares ao material com fibras de madeira, confirmando então a vantagem da cortiça como retardadora do fogo nos materiais compósitos termoplásticos. No entanto, apresentaram resistência mecânica inferior. Segundo os autores, o material processado mostrou-se uma boa opção para revestimentos de pisos e sistemas de construção, sendo necessária a adoção de estratégias de reforço para melhorar a rigidez e a resistência para aplicações específicas.

O uso de compatibilizantes é uma estratégia de reforço mecânico dos compósitos. Sua incorporação altera a relação carga/matriz e pode promover melhorias das propriedades mecânicas. Fernandes et al. (2010) adicionaram cortiça em pó (50%) de diferentes origens do sobreiro (pó da camada mais externa, pó da camada de cortiça, pó das fibras de alta densidade e pó de cortiça misturado com pó das fibras de alta densidade) à materiais termoplásticos (polietileno, polipropileno e mistura de poliolefinas recicladas), por meio do processo de pultrusão. Como compatibilizantes foram utilizados dois agentes de acoplamento à base de anidrido maleico, um para o polietileno e outro para polipropileno. A moldagem foi realizada por compressão no formato de placas com alta estabilidade dimensional. Os autores realizaram ensaios de densidade (cortiça e compósito no formato de pellets), umidade, microscopia eletrônica de varredura, microscopia ótica, propriedades térmicas e propriedades mecânicas. A microscopia eletrônica comprovou boa dispersão da cortiça em pó nos pellets e nas amostras

moldadas por compressão. A utilização de agente de acoplamento a base de anidrido maleico (2%) foi responsável pela melhoria da resistência à tração e do módulo de elasticidade. A origem do pó da cortiça não influenciou de forma significativa nos resultados de desempenho mecânico. A combinação de polímero reciclado a base de poliolefinas com pó da camada de cortiça obteve o menor desempenho mecânico. A cortiça atuou ainda como agente de nucleação aumentando a cristalinidade na maior parte dos compósitos. Os resultados apresentados mostraram que pó de cortiça e poliolefinas podem ser aplicados para produzir compósitos com alto teor de carga.

Fernandes et al. (2013) estudaram a influência da incorporação de fibras vegetais em compósitos de PEAD, pó de cortiça (50%) e fibras curtas de coco (5 e 10% distribuídas de forma aleatória) por meio de processamento em extrusora dupla rosca e moldagem por compressão. A motivação seria desenvolver material em formato complexo que suportasse resistência a tração. O uso do compatibilizante a base de polietileno enxertado com anidrido maleico – PEgMA em teor de 2% permitiu a obtenção de um composto híbrido mais homogêneo, uma melhor interação fase/matriz e aumentou em 47% a resistência à tração e 27% o módulo de elasticidade quando comparado ao compósito de cortiça e sem fibra de coco. A estratégia viabilizou a formação de compostos híbridos nos quais os componentes naturais somam até 54% em peso da mistura.

Em outra pesquisa Fernandes, Mano e Reis (2013) utilizaram como estratégias de reforço a incorporação de agente de acoplamento e fibras curtas de sisal *in natura* e tratadas em meio alcalino com solução de NaOH para promover melhor adesão carga-matriz. Os pesquisadores misturaram PEAD, 40% de cortiça em pó, 10% de fibras de sisal distribuídas aleatoriamente *in natura*/tratadas e agente de acoplamento a base de anidrido maleico (2%) em extrusora dupla rosca. Os corpos de prova foram moldados por compressão e avaliados quanto às propriedades mecânicas e morfologia. A incorporação de 10% de fibra de sisal e 2% de agente de acoplamento foi responsável pela melhora das propriedades de tração e flexão. A avaliação morfológica comprovou a melhora na adesão interfacial entre matriz, partícula de cortiça e fibra. No ensaio de flexão a incorporação de fibras tratadas e a presença de gente de acoplamento elevou as propriedades mecânicas em termos de Módulo de Elasticidade (33%) e resistência ao alongamento (98%).

Alguns estudos utilizaram também agentes de acoplamento obtidos a partir de recursos naturais em compósitos de cortiça, tais como suberina e lignina. No trabalho de Fernandes et al. (2014b), biocompósitos foram desenvolvidos utilizando cortiça em pó (20%) e PEAD. Os

autores isolaram a suberina e lignina da cortiça através de uma despolimerização alcalina e aplicaram como agente de acoplamento da mistura (teores de 2% e 4%, respectivamente). O peróxido de benzoíla foi utilizado como agente iniciador. Os novos compósitos foram caracterizados por meio dos ensaios de estabilidade dimensional, morfologia, propriedades térmicas e mecânicas. Os resultados foram comparados com compósitos que utilizaram compatibilizantes a base de anidrido maleico (2%) em sua composição. As composições que utilizaram agente de acoplamento apresentaram propriedades mecânicas mais elevadas, menor absorção de água e menor variação de espessura. A suberina atuou como plastificante melhorando a dispersão da cortiça, promovendo benefícios antioxidantes e flexibilidade; enquanto a lignina atuou como agente de acoplamento, diminuindo a deformação máxima e aumentando o módulo e resistência à tração em 39% e 48%, respectivamente. O aumento do teor de lignina teve forte influência na melhora da estabilidade térmica do material, mas não influenciou nos resultados de propriedades mecânicas positivamente.

Também foram encontradas patentes referentes a fabricação de painéis laminados (PT 106468, EP 1634696 A1 e WO 2017164757) envolvendo termoplásticos, cortiça e madeira.

A patente PT 106468 apresentou metodologia de fabricação de painéis laminados impermeáveis para aplicação em pavimentos, paredes e forros, que possuam uma camada estrutural de material de base celulósica e/ou de cortiça para formação de um pavimento.

A patente EP 1634696 A1 divulgou um elemento para piso com várias camadas, compreendendo um núcleo de madeira resistente a compressão e uma camada de revestimento constituído de policloreto de vinila espumado. Abaixo da camada de madeira está disposta uma camada de cortiça com espessura entre 1,0 e 3,0 mm.

A patente WO 2017164757 A1 apresentou um processo de preparação de placas a serem utilizadas como núcleo de revestimento na construção civil, podendo ser constituída por cortiça em grânulos (10-64%) e polietileno em grânulos (36-90%) e moldados por termoprensa podendo alcançar entre 3-5mm de espessura.

Em outros trabalhos, os autores produziram biocompósitos totalmente sustentáveis, utilizando matriz renovável (Polietileno verde ou Biopolietileno) e fases dispersas naturais.

Castro, Ruvolo-Filho e Frollini (2012) desenvolveram compósitos a partir de polietileno verde, fibras de curauá (5, 10, 15 e 20%) e o agente de acoplamento polibutadieno hidroxilado (5%). Os processamentos foram realizados em misturador interno/extrusora dupla rosca e a moldagem por compressão/injeção. As amostras foram analisadas via morfologia, análise térmica e propriedades mecânicas e em função das diferentes técnicas de processamento. A

análise térmica identificou que a matéria-prima vegetal é estável para processamento até 260°C e que a temperatura de decomposição dos compósitos é menor em relação à matriz termoplástica em virtude da incorporação do material lignocelulósico. A presença das fibras melhorou as propriedades de resistência à flexão e módulo de elasticidade do polietileno. A incorporação do compatibilizante melhorou a adesão na interface fibra/matriz aumentando a tenacidade. O tipo de processamento foi um parâmetro importante no desenvolvimento do compósito. Na análise, a metodologia de processamento por extrusora dupla rosca e moldagem por injeção proporcionou resultados melhores de resistência ao impacto.

Kuciel, Jakubowska e Kuźniar (2014) processaram biocompósitos totalmente sustentáveis ao misturar biopolietileno e outras quatro cargas em teor de 25%: farinha de madeira, pó ultrafino de celulose, fibras picadas de cânhamo e micropartículas de tufo mineral. Os pesquisadores processaram as amostras em extrusora dupla rosca e moldaram por injeção. Os materiais foram avaliados quanto às propriedades físicas, mecânicas (tração e flexão) e térmicas. A resistência a tração e flexão aumentaram com o incremento das cargas, principalmente para farinha de madeira e fibra de cânhamo (aproximadamente 2,4 vezes) em comparação com o biopolietileno. A resistência à tração para todos os sistemas não apresentou alteração significativa, enquanto a resistência à flexão sofreu um aumento de 170% com adição dos preenchimentos. O ensaio de absorção de água indicou que a adição de material lignocelulósico causou notável aumento nesse parâmetro, com destaque para as fibras de cânhamo (aumento de 5% em peso após 240 dias). As principais vantagens encontradas foram baixa densidade, aumento do módulo de elasticidade e resistência à deformação, propriedades térmicas melhoradas e estabilização dentro da faixa de temperatura de aplicação. Os autores sugeriram que as vantagens oferecidas predispõem esses materiais para aplicações estruturais de contato limitado com umidade e ambientes aquáticos. A composição com farinha de madeira apresentou-se mais vantajosa em relação as propriedades mecânicas, resistência a deformação no calor e estabilização das propriedades em temperaturas baixas e elevadas, ao mesmo tempo, foi a composição que mais sofreu alterações dimensionais quando submetida ao ensaio de absorção de água. Para aplicações que exigem uma menor rigidez os sistemas compostos de pó ultrafino de celulose e micropartículas de tufo mineral também podem ser satisfatórios, pois as composições preservam o alto alongamento à ruptura, menor absorção de água e são mais fáceis de processar do que os demais sistemas (fácil alimentação, mistura mais homogênea e rápida cristalização).

Boronat et al. (2015) desenvolveram compósitos de polietileno verde - PE verde e casca de ovo de galinha, em substituição à carga inorgânica de carbonato de cálcio (CaCO_3) comumente utilizada. Foram utilizados três tipos de agentes de acoplamento: o isopropóxido de titânio (IV) 80%, o trimetoxissilano (98%) e o dipropóxido de bis (dietil citrato) de zircônio (IV) (86%). A avaliação foi dividida em duas etapas: i. avaliação do melhor desempenho do agente de acoplamento através de seis combinações distintas, PE verde puro, PE verde com CaCO_3 comercial (20%), PE verde com casca de ovo (20%) sem aditivos, PE verde com casca de ovo (20%) com aditivos de silano/titanato/zirconato (0,7%); ii. avaliação da influência do teor da carga nas propriedades através de composições de PE verde, casca de ovo (0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%) e aditivo titanato (0,7%). Os compósitos foram processados em extrusora dupla rosca e moldados por injeção. A caracterização dos compósitos foi realizada a partir de análises mecânicas, térmicas e reológicas. Para a primeira etapa o ensaio de fluorescência de Raios-x apontou que o CaCO_3 da casca do ovo, apesar das impurezas, é quimicamente similar ao produto comercial. A análise térmica apontou que o uso do titanato aumenta a faixa de temperatura de trabalho e reduz a energia necessária para fundir o compósito. Todos os compósitos com casca de ovo apresentaram módulo de tração mais elevado em comparação ao PE puro, sendo mais pronunciado para os compósitos com casca de ovo tratada com silano (aumento de 20%) e titanato (aumento de 19%). A adição desse tipo de carga, independente da carga ser natural ou artificial e tratada ou não, diminuiu a resistência à tração devido à má adesão entre as fases do compósito. O alongamento à ruptura é efetivamente reduzido com adição da carga confirmando a falta de compatibilidade dos componentes. Em relação ao ensaio de flexão, este apresentou o composto com casca de ovo tratada com titanato com maior aumento a resistência a tração (26,93%) em relação ao PE puro. Como resultado da primeira etapa, os pesquisadores apontaram o titanato como agente de acoplamento de melhor desempenho por potencializarem propriedades térmicas, diminuição da temperatura de fusão e aumento da temperatura de degradação. Na segunda etapa os autores observaram que o acréscimo do teor de carga diminuiu a entalpia, enquanto a temperatura de fusão não foi alterada. No entanto, a temperatura de degradação aumenta com a quantidade de enchimento. Em relação às propriedades mecânicas o módulo de flexão e módulo de elasticidade aumentaram com a adição do conteúdo, 88% e 65%, respectivamente. A resistência à tração, assim como o alongamento à ruptura, diminuiu com o aumento da carga devido à falta de compatibilidade entre os componentes. O teor da carga aumenta a viscosidade podendo dificultar processamentos que funcionam com baixas taxas de cisalhamento.

Com o intuito de aprofundar a investigação no comportamento de absorção sonora de compósitos poliméricos e cargas vegetais podemos citar os estudos de Karky et al. (2019), Kim et al. (2015) e Xu et al. (2018).

Kim et al. (2015) estudaram propriedades acústicas de compósitos constituídos de PEAD, argila, carbonato de cálcio e farinha de madeira, destacando a densidade superficial da área e rigidez das amostras como os principais fatores que influenciam na propriedade de isolamento sonoro de compósitos poliméricos reforçados. Foram desenvolvidas as seguintes combinações: PEAD/carbonato de cálcio (0, 20 e 40%); PEAD/argila (0, 4 e 8%); PEAD/farinha de madeira (10%)/carbonato de cálcio (0, 20 e 40%); e PEAD/farinha de madeira (10%)/argila (0, 4 e 8%). As amostras foram processadas em extrusora dupla rosca e moldadas por compressão, resultando em placas de 29mm de diâmetro e 9mm de espessura. Foram realizados ensaio de flexão, impacto e absorção sonora em tubo de impedância. Os valores de absorção sonora aumentaram com a adição de cargas, no entanto, com um alto teor de carga (por exemplo, 40% carbonato de cálcio), a rigidez diminuiu e levou a redução dos valores de absorção sonora.

Xu et al. (2018) estudaram propriedades de absorção sonora de compósitos constituídos de grânulos de borracha de pneu reciclado, serragem de fibras de painéis de madeira de alta densidade, pellets de PEAD e PEgMA nas proporções 18, 40, 42 e 5%, respectivamente. Após mistura o material foi moldado por prensa com diâmetro 30 ou 100mm e espessura 5mm. As amostras foram perfuradas com furadeira elétrica, com aberturas de 1 mm a 6 mm de diâmetro dispostas uniformemente em um padrão homocêntrico e com taxa de perfuração geral de 3, 6 e 9%. O coeficiente de absorção sonora foi medido por meio de tubo de impedância, na forma um ressonador Helmholtz, seguindo a norma ISO 10534-2. Os autores verificaram que os painéis perfurados têm altos coeficientes de absorção sonora e ampla largura de banda, especialmente em frequências inferiores a 1000 Hz. Em frequências mais altas, o tamanho do furo aparentemente não mostrou influências evidentes, enquanto as maiores taxas de perfuração produziram maiores coeficientes de absorção sonora.

Karky et al. (2019) desenvolveram compósitos sustentáveis de amido de batata reforçados com polpa de beterraba (1, 20, 30 e 40%) a fim de aplicações de isolamento de paredes e pisos em construções. Os autores misturaram pellets de polpa de beterraba saturada com amido de batata em pó e aqueceram em autoclave por 30 min até a formação de grânulos, posteriormente foram compactados por um pistão de madeira e congelados a -80°C. O coeficiente de absorção sonora foi medido em tubo de impedância na faixa de frequências de

50 Hz a 6,4 kHz. Três amostras de 9,9 cm de diâmetro e 4 cm de espessura e três amostras de 2,9 cm de diâmetro e 4 cm de espessura foram testadas para cada fórmula. As propriedades mecânicas foram estudadas por meio do teste de compressão e flexão. Os resultados demonstraram que os compósitos podem ser bons absorvedores sonoros, chegando a alcançar coeficiente de absorção entre 0,6 e 0,8, especialmente em frequências médias e altas, e esse potencial depende do teor de fibras e da umidade. A resistência à compressão aumentou linearmente com a relação de peso amido/polpa de beterraba até atingir 0,52MPa e 30% na deformação a compressão. Os resultados obtidos mostraram que o aumento da quantidade de amido, utilizado como ligante, diminuiu a porosidade do compósito, mas aumentou a condutividade térmica e as propriedades mecânicas.

Ao pesquisar sobre desempenho térmico, a literatura apresenta aplicações de cortiça e resíduos vegetais em compósitos para a construção civil.

Cherki et al. (2014), em uma tentativa de aprimorar as propriedades de isolamento térmico do gesso e propor um material para aplicação em forros e revestimento de paredes, misturaram gesso à cortiça granular de 4 tamanhos (2,5-5mm/5-6,3mm/6,3-8mm/8-12,5mm). A combinação foi moldada por prensa em placas de 100x100x20mm e submetida ao método de caracterização de placa quente transitória assimétrica. Os resultados mostraram que o composto é três vezes mais isolante e duas vezes mais leve que o gesso. Os coeficientes de condutividade térmica foram menores para os compósitos com grãos maior de cortiça.

Junior et al. (2017) desenvolveram compósitos poliméricos a base de amido termoplástico, PEgMA e fibra de curauá (10, 20 e 30%). O material foi caracterizado quanto às suas propriedades estruturais, térmicas e morfológicas. O compósito foi aplicado em blocos cerâmicos submetidos a luz solar e o comportamento térmico foi monitorado por termografia por infravermelho. Os autores concluíram que a capacidade de armazenar calor do compósito era diretamente influenciada pela porcentagem de fibras existentes, promovendo ganhos significativos de temperatura com o teor de fibra, 2°C para amostras com 10 e 20% e 3,2°C para amostras com 30% de fibra, comprovando o potencial dos compósitos em aplicações de revestimento.

Bakatovich, Davydenko e Gaspar (2018) estudaram placas de isolamento térmico produzidas a base de resíduos agrícolas vegetais: palha de centeio, palha de cevada, palha de trigo, palha de aveia, palha de arroz, resíduos de haste de linho e casca de arroz; e três tipos de ligantes (vidro líquido, emulsão de PVA e látex). Os materiais foram misturados e moldados por prensagem a 0,2-0,4 MPa. As placas preparadas com palha de centeio/fibras de linho/vidro

líquido como aglutinante apresentam as melhores características físicas e mecânicas devido à formação da estrutura compósita ideal do material a partir de duas fibras de diferentes tamanhos e formas. Os resultados de testes em larga escala com um sistema de isolamento térmico ventilado confirmaram a eficácia de placas de palha de centeio/linho, indicando a possibilidade de utilizá-las em edifícios no período frio e, assim, reduzir as emissões de dióxido de carbono na atmosfera.

Estudos acerca da degradação abiótica em compósitos de biopolietileno e cortiça não foram encontrados. No entanto, podemos citar algumas referências que abordaram os efeitos da exposição ultravioleta (acelerada e natural) de materiais compostos de polietileno petroquímico e cargas naturais.

Lundin, Falk e Felton (2001) avaliaram por meio das propriedades mecânicas os efeitos da exposição ultravioleta - UV acelerada (artificial) em compostos termoplásticos com fibras naturais para fins de aplicação na construção em coberturas. Os pesquisadores elaboraram compósitos a partir de polietileno de alta densidade - PEAD, farinha de madeira (50%), fibra de cânhamo (50%) e alguns aditivos: antioxidante, agente de acoplamento de polietileno enxertado com anidrido maleico e estabilizante UV. As amostras foram moldadas por injeção e montadas em um rack dentro de um meteorômetro com altos níveis de radiação UV e ciclos de umidades que simulam efeitos da luz solar e de chuva durante um período de exposição de 2.000h. O módulo de elasticidade e a tensão de ruptura foram medidos antes e após a exposição. Para a formulação de PEAD puro, o módulo de elasticidade aumentou (64%) e a tensão de ruptura diminuiu após a exposição. A justificativa desse aumento é por conta do aumento da cristalinidade ocasionado pela foto-oxidação e reticulação das cadeias. Na composição PEAD e aditivos não houve alteração significativa nas propriedades mecânicas. Para as formulações de PEAD, aditivos e cargas foi observado um aumento significativo da rigidez, 8,90 vezes para fibras de cânhamo e 5,91 vezes para partículas de madeira. A exposição ao envelhecimento acelerado dessas composições promoveu perda da rigidez: 42% para fibra de cânhamo e 33% para farinha de madeira. Tal redução foi explicada pela quebra da fibra/partícula e/ou da quebra da ligação fibra/polímero devido à alteração de umidade. A tensão de ruptura aumentou com incorporação de fibras de cânhamo (3,4 vezes) e farinha de madeira (2,6 vezes). No entanto, após o período de exposição houve uma perda nessas propriedades de 24% para cânhamo e 20% para farinha de madeira. A exposição ainda foi responsável pela diminuição da resistência a tração para a composição de PEAD sem aditivos. Para a composição de PEAD e aditivos não houve alteração significativa.

Muasher e Sain (2006) estudaram a degradação abiótica de compósitos poliméricos de madeira e a eficácia de diferentes estabilizantes de luz baseados em amina (HALS) e absorventes de ultravioleta – UVA na mudança da cor. Os compósitos foram constituídos de farinha de madeira (40%), polietileno de alta densidade - PEAD (57,5%), agente de acoplamento polietileno linear de baixa densidade (2,5%), cinco tipos de HALS (0,15%) e dois tipos de UVA (0,2%). Além dos aditivos individuais em cada composição, foram processadas três composições com combinações de HALS e UVA totalizando 10 sistemas. As amostras foram misturadas, fundidas, granuladas e moldadas por injeção. Após a moldagem por injeção, as amostras foram esmeriladas para remover o excesso da camada de polímero formada durante o processo de moldagem expondo uma camada mais uniforme. A exposição foi realizada no telhado de um edifício na Universidade de Toronto (Canadá) no período de 1º de agosto de 2004 a 1º de dezembro de 2004, totalizando 2000 horas. Os períodos de retiradas foram de 250, 500, 1000 e 2000 horas. As amostras foram caracterizadas por análise de cor e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier. Os resultados indicaram que o intemperismo provoca desbotamento da cor e amarelamento. Os autores sugerem que os compósitos sofreram duas reações após a exposição: i. oxidação da lignina que leva a formação da estrutura cromofórica de paraquinona, dominante nas primeiras 250h; e ii. a redução das estruturas de paraquinona para as hidroquinonas, o que leva ao branqueamento. O HALS foi considerado o mais efetivo no controle da perda de cor e do amarelamento a longo prazo. A adição do UVA benzotriazol combinado com HALS mostrou grande sinergismo do controle da perda de cor.

A exposição de ecocompósitos de polietileno à radiação UV natural também foi estudada por Hung, Chen e Wu (2012). Os autores misturaram polietileno de alta densidade – PEAD (40%) e fibras de bambu (60%) tratadas em meio alcalino por acetilação. A tentativa foi de modificar quimicamente fibras naturais para diminuir a hidrofobicidade e aumentar a resistência às intempéries da lignocelulose. Os compostos foram moldados por compressão e caracterizados através do envelhecimento natural (período de 1080 dias), análise térmica, análise mecânica (flexão), infravermelho por transformada de Fourier, medição de cor e resistência ao mofo. A exposição foi realizada no Campus da Universidade Nacional Chung Hsing em Taiwan no período de novembro de 2007 a novembro de 2010. A análise da cor demonstrou que o bambu não modificado é mais suscetível à foto oxidação do que o tratado quimicamente. Em relação ao teste de flexão os pesquisadores não encontraram alterações significativas antes do envelhecimento para compósitos com e sem tratamento da fibra. No entanto, após o período total de degradação abiótica os valores de módulo de elasticidade e

ruptura tiveram redução significativa. Ainda assim, a redução para os compósitos tratados foi menor, correspondendo a 93% do módulo de ruptura e 91% do módulo de elasticidade dos valores anteriores ao envelhecimento, do que para os compósitos não tratados, 82% e 64%, respectivamente. A análise de infravermelho mostrou que ocorreu cisão de cadeia da matriz independente do grau de acetilação durante todo o período de exposição sugerindo então que o tratamento químico não melhorou significativamente a estabilidade à luz do material. A cristalinidade aumentou comprovando que a acetilação das fibras de bambu promoveu eficiência ao composto. Em relação à absorção de água e inchaço os compósitos sem tratamento apresentaram acréscimo de 19% e 4%, respectivamente após 24h de imersão. Em contrapartida, os compósitos acetilados apresentaram valores inferiores a 5% e 2%, respectivamente. Em se tratando de resistência ao mofo, índice que varia de 0 (superfície livre de microrganismos) a 10 (superfície infestada de microrganismo) foi encontrado, ao final de 1080 dias, o valor 9 para os compósitos não modificados. Esse fenômeno foi atribuído à remoção por lixiviação de fibras de bambu mofadas da superfície do compósito. Os autores concluíram que a resistência ao mofo está relacionada à quantidade de polímero da superfície, quanto maior a quantidade de polímero maior a resistência. As amostras modificadas não sofreram alterações significativas ao final do período de exposição. Os resultados indicaram que as resistências à durabilidade e à decomposição dos biocompósitos de bambu podem ser melhoradas através da acetilação do reforço e que estudos futuros devem se concentrar na estabilidade de cor durante o envelhecimento natural.

Bajwa, Bajwa e Holt (2015) também exploraram o desempenho de ecocompósitos submetidos à radiação ultravioleta acelerada (UV). Os compostos foram constituídos de polietileno de alta densidade – PEAD em pó, três tipos de biofibras (madeira de carvalho, resíduo e haste de algodão ou bagaço de guaiúle), dois agentes de acoplamentos e um lubrificante. As fibras (49,5% ou 50%, dependendo da presença de agente de acoplamento) foram misturadas a poliolefina (39,5% ou 40%), lubrificantes (6%), talco mineral (4%) e agente de acoplamento (1%). As combinações foram processadas em uma extrusora monorosca. As variáveis meteorológicas do envelhecimento artificial adotadas foram exposição UV e ciclos de umidade no período de 2200 horas. A análise pós-envelhecimento foi realizada através da microscopia eletrônica de varredura – MEV, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier - FTIR, propriedades ópticas, absorção d'água, ensaio de flexão, ensaio de compressão, ensaio de impacto e estabilidade térmica. A análise fractográfica permitiu visualizar algumas alterações após a exposição: superfície maçante e porosa, alteração da cor

castanha avermelhada para bege calcário e superfície rica em biofibras expostas. A baixa dose de agente de acoplamento (1%) mostrou ser ineficaz no controle de degradação superficial. A medida de mudança de cor evidenciou a fotodegradação dos compósitos sendo mais pronunciada para os sistemas com algodão. A absorção d'água aconteceu de forma variada sendo 12% para sistemas com 50% fibras de carvalho, 19,6% para sistemas com 25% de fibra de carvalho e 25% de resíduos de algodão, mostrando a alta afinidade com água dos resíduos de algodão. As fibras de guaiúle mostraram-se menos suscetível à água, exatamente por possuir material resinoso em sua composição. A rigidez, resistência, propriedades de impacto e o coeficiente de expansão térmica linear dos biocompósitos foram reduzidos após a degradação abiótica. O uso dos agentes de acoplamentos melhorou e ajudou a manter as propriedades mecânicas dos materiais.

Entre outras aplicações da cortiça em compósitos para a engenharia podemos citar o trabalho de Brites et al. (2017) que teve como objetivo otimizar a combinação cortiça e polietileno de alta densidade-PEAD para utilização em impressoras 3D, facilitando a criação de design e produtos de decoração por engenheiros, arquitetos e designers. Os autores misturam o PEAD às cargas (pó de cortiça natural, 15 e 30%, ou resíduos de cortiça oriundos de revestimento de piso, 15, 30 e 50%) e polietileno enxertado com anidrido maleico (5%) por meio do processo de extrusão. As amostras foram moldadas através de injeção. Os pesquisadores analisaram a influência do teor de carga nas propriedades morfológicas, físicas e mecânicas dos compósitos realizando os ensaios de densidade, microscopia óptica, molhabilidade, análise térmica e ensaios de tração. Os resultados de densidade sugeriram uma diminuição da densidade média com o aumento da cortiça de 15% para 30%. Na análise da microscopia óptica os compósitos de cortiça em pó pura apresentaram melhor distribuição da carga na matriz devido a menor densidade dessas partículas em comparação a cortiça residual e conseqüentemente uma quantidade volumétrica maior de carga na mistura. A heterogeneidade da distribuição da cortiça na matriz polimérica contribuiu para os elevados desvios padrão nos ângulos de contacto dos compósitos, dificultando a compreensão da real influência da adição de cortiça. No entanto, as amostras com resíduos de cortiça apresentaram menor molhabilidade do que os de cortiça pura. A análise térmica mostrou que os resíduos de cortiça e cortiça pura em pó podem ser processados com polímeros como o PEAD. Em termos de propriedades mecânicas, com a adição de cortiça, todos os compósitos apresentaram um aumento da resistência à tração e uma diminuição da tensão de ruptura.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Matriz polimérica

O polímero utilizado como matriz polimérica foi o polietileno verde de alta densidade, grade SHA7260, densidade 0,955 g/cm³ e índice de fluidez 20 g/10 min (temperatura 190 °C e massa 2,16 kg), fornecido pela Braskem. Nesse trabalho, denominado de PEV.

3.1.2. Cortiça

A carga vegetal utilizada como reforço da matriz polimérica foi a cortiça em pó (CP) com granulometria 74 µm e densidade variando entre 65 e 85 (g/l), fornecida pela Empresa Corticeira Paulista/SP.

3.1.3. Agente de acoplamento

O agente de acoplamento adotado foi o polietileno de alta densidade enxertado com anidrido maleico, de nome comercial Orevac® 18507, densidade 0,954 g/cm³, índice de fluidez 5 g/10 min (temperatura 190 °C e massa 2,16 kg) e temperatura de fusão 128 °C fornecido pela Arkema Innovative Chemistry, e nesse estudo designado de PEgMA.

3.2. Métodos

3.2.1. Processo de preparação dos ecompósitos

Os percentuais dos constituintes dos compósitos foram definidos com base na literatura existente de compósitos de poliolefinas/matéria-prima vegetal. Segundo Campbell (2010), compósitos particulados geralmente possuem teor de carga na faixa de 40-50% em volume devido a dificuldades de processamento e fragilidade. Diversas pesquisas são direcionadas a compósitos preenchidos com alto teor de carga: 25% nos trabalhos de Kuciel, Jakubowska e Kuźniar (2014), 40% em compósitos desenvolvidos por Fernandes, Mano e Reis (2013) e 50%

em outros trabalhos de Fernandes et al. (2010, 2011, 2013). No entanto, Fernandes et al. (2014a), ao misturar cortiça e polipropileno (PP), identificaram melhoria da rigidez do material com pequenas quantidades de carga (5 %) e que o aumento desse teor reduziu a tensão de ruptura devido a incompatibilidade entre as fases.

Com base nestes estudos, foram adotados para essa pesquisa teores de 5, 10 e 15 % de cortiça em pó.

A utilização de agente de acoplamento a base de anidrido maleico também foi baseada em fundamentos da literatura em pesquisas de Fernandes et al. (2010, 2011, 2013, 2014b), Fernandes, Mano e Reis (2013) e Keener, Stuart e Brown (2004); nas quais os resultados apontaram que esse tipo de compatibilizante foi responsável pela melhoria das propriedades mecânicas em compósitos poliméricos. Assim, o teor do agente de acoplamento adotado para este estudo foi de 5 %.

Dessa forma, a cortiça em pó (CP) foi previamente seca em estufa à 80 °C por 24 horas, e em seguida foi misturada ao polietileno verde de alta densidade (PEV) e ao compatibilizante polar (PEgMA), por meio de tamboreamento nas proporções indicadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição das amostras

Amostras	PEV (% em peso)	CP (% em peso)	PEgMA (% em peso)
PEV	100	-	-
PEV/5CP	95	5	-
PEV/10CP	90	10	-
PEV/15CP	85	15	-
PEV/5CP/PEgMA	90	5	5
PEV/10CP/PEgMA	85	10	5
PEV/15CP/PEgMA	80	15	5

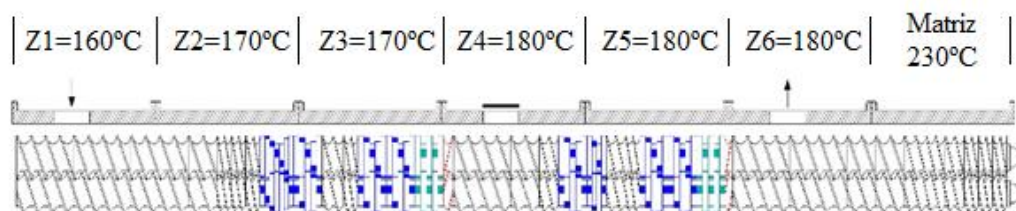
Fonte: Autoria própria (2015).

As composições foram processadas em extrusora dupla rosca corrotacional modular, marca NZ, modelo SJ-20, com diâmetro de 22 mm, L/D=38 e fator de forma 1,48. A rosca utilizada era composta por duas seções de mistura intensiva formada por blocos de malaxagem, como apresentado na Figura 15. As temperaturas das zonas de aquecimento da extrusora Z1, Z2, Z3, Z4, Z5 e Z6 e da matriz foram, respectivamente: 160, 170, 170, 180, 180, 180 e 230 °C, e a velocidade de rotação da rosca de 250 rpm.

Após o processo de extrusão, os compósitos foram granulados no formato de pellets e acondicionados em estufa para secagem à temperatura de 80°C por um período de 24 horas. Os corpos de prova para ensaios de tração foram moldados com as dimensões padronizadas pela

norma ASTM D 638 em injetora modelo FLUIDMEC, sob as seguintes condições: temperaturas das zonas de aquecimento Z1 e Z2 foram respectivamente 210 e 200°C, tempo de injeção 4s e tempo de resfriamento 35s.

Figura 15 – Perfil da rosca utilizada



Fonte: ALVES (2012).

Toda a etapa de processamento foi realizada no Laboratório de Processamento de Polímeros da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

As amostras utilizadas no ensaio de absorção acústica foram confeccionadas no Laboratório de Polímeros Conjugados – LAPCON, da Universidade Federal do Piauí, conforme a Norma ASTM 1050, em moldes especificamente confeccionados com 45 mm de diâmetro e 18 mm de espessura, via processo de compressão em termoprensa hidráulica, modelo MH-08-MN, da MH Equipamentos Ltda., aplicando uma prensagem de 1,5 tonelada, sob uma temperatura de 180°C por 8 minutos. A Figura 16 apresenta os corpos de provas moldados para ensaio de absorção acústica.

Figura 16 – Corpos de prova utilizados no ensaio de absorção acústica



Fonte: Autoria própria (2018).

3.2.2. Caracterização dos ecocompósitos

A metodologia de análise foi dividida em três etapas: a primeira correspondeu à caracterização dos compósitos por meio de termogravimetria e ensaio de absorção acústica. Em um segundo momento e por ter como proposta a aplicação na construção civil, os ecocompósitos desenvolvidos foram submetidos a dois ciclos de exposição ao intemperismo e

posteriormente avaliados quanto a possíveis alterações morfológicas e de desempenho mecânico sob tração. A terceira etapa consistiu na aplicação de algumas composições dos ecocompósitos em protótipos para simulação do efeito da presença de cortiça sobre o conforto térmico em caso de aplicação em estruturas temporárias em canteiros de obras.

3.2.2.1. Análise térmica dos ecocompósitos

A análise térmica dos compósitos foi realizada via termogravimetria (TGA) com o objetivo de avaliar a variação da massa da cortiça, da matriz e dos ecocompósitos em função de temperatura programada. O estudo permitiu investigar também a atuação da cortiça como barreira de calor uma vez que estudos relataram que esta matéria-prima pode promover estabilidade térmica ao compósito devido aos seus constituintes naturais, suberina e lignina (FERNANDES et al., 2014b).

As análises de termogravimetria foram realizadas sob atmosfera de argônio com fluxo de 100 ml/min, taxa de aquecimento de 10°C/min e com variação térmica de 30°C a 600°C, em equipamento de marca SDT Q600 V 20.9 Build 20, do Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados – LIMAV, da Universidade Federal do Piauí – UFPI.

3.2.2.2. Absorção sonora dos ecocompósitos

Foram medidos os coeficientes de absorção sonora da matriz polimérica e dos ecocompósitos PEV/5CP, PEV/10CP, PEV/15CP, PEV/5CP/PEgMA e PEV/10CP/PEgMA. O procedimento adotado para medição foi baseado na Norma ASTM 1050, que normatiza a medição dos coeficientes de absorção de incidência normal medidos em um tubo de impedância pelo método de dois microfones.

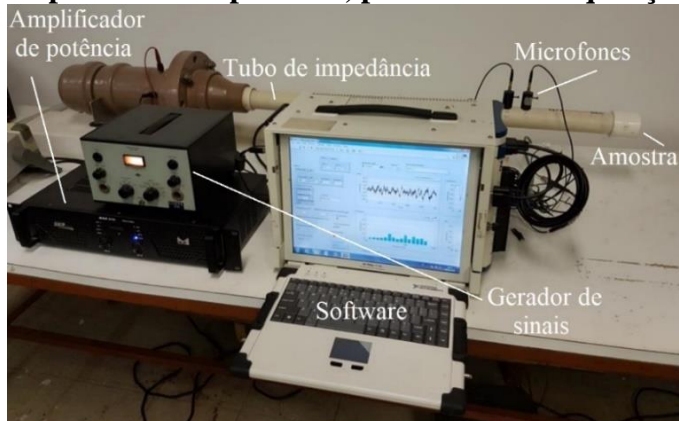
As amostras cilíndricas foram cuidadosamente montadas na extremidade do tubo de impedância e na extremidade oposta foi instalada a fonte sonora responsável pela geração das ondas planas, sendo as pressões sonoras resultantes medidas pelos dois microfones localizados na parede lateral do tubo. Os cálculos dos coeficientes normais de absorção de incidência para o material acústico foram realizados processando uma matriz de dados complexos a partir da função de transferência medida usando o sistema de análise de frequência digital.

A Figura 17 apresenta o equipamento utilizado, assim como todos os aparelhos utilizados na medição: gerador de sinais B&K tipo 1405, amplificador de potência SKP MAX

310, microfones BSWA MPA416 1/4”, plataforma de aquisição e processamento PXI 8106 e o software de processamento LabVIEW.

O tubo de impedância foi projetado e construído no Laboratório de Acústica e Vibrações (LAVI) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

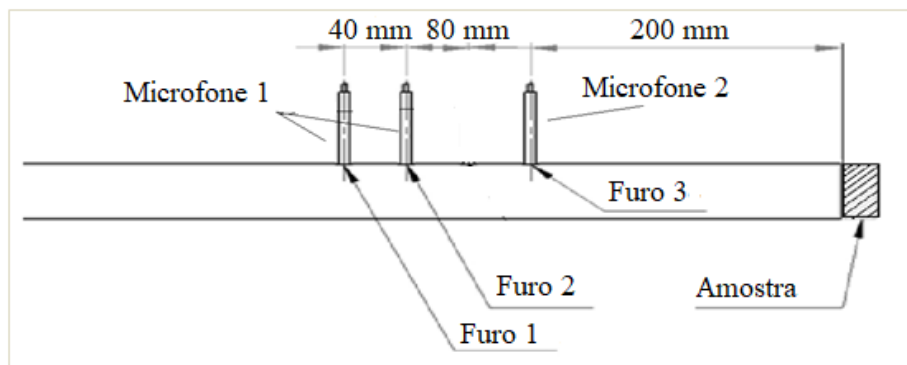
Figura 17 – Sistema de medição: tubo de impedância, microfones, gerador de sinais, amplificador de potência, plataforma de aquisição e software de processamento



Fonte: LAVI – Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ (2018).

Para cada composição foram realizadas medições em três amostras distintas e para cada amostra duas medições em configurações diferentes dos microfones. Em cada configuração, foi alterada a distância entre os microfones mantendo constante a distância entre a amostra e o microfone mais próximo, como mostrado na Figura 18. As configurações são detalhadas na Tabela 8, assim como as frequências de corte sugeridas pela Norma ASTM 1050.

Figura 18 - Posição dos furos dos microfones no tubo de impedância



Fonte: LAVI – Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ (2018).

Tabela 8 – Configuração dos microfones

Configuração do microfone 1	Distância entre microfones (mm)	Distância entre o microfone 2 e a amostra (mm)	Frequência de corte inferior (Hz)	Frequência de corte superior (Hz)
14	120	200	28	1140
24	80	200	42	1715

Fonte: LAVI – Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ (2018).

3.2.2.3. Degradação abiótica

O ensaio foi realizado na cidade de Teresina, dentro do Campus Ministro Petrônio Portella da Universidade Federal do Piauí (UFPI), em área cercada e monitorada pela estação meteorológica Automática de A312 - Teresina/PI, com raio de alcance de 150 km.

Os corpos de provas foram expostos ao intemperismo natural, em dois períodos climáticos distintos para a região, durante 90 dias. O primeiro período, considerado chuvoso e de temperaturas mais amenas, entre 06/02/2017 e 07/05/2017, e o segundo período, regionalmente denominado de “B-R-O/BRÓ”, que tem como característica temperaturas mais elevadas e menores índices de umidade relativa entre 04/09/2017 e 03/12/2017. As coletas das amostras para ensaios mecânicos e avaliação morfológica foram realizadas no 45° e 90° dias de cada período e os resultados foram comparados aos corpos de provas que não sofreram exposição solar.

As amostras foram fixadas sobre um rack de apoio com inclinação de 5° em relação ao solo, como mostrado na Figura 19, de acordo com as normas ASTM D5272-08, ASTM D1435-12 e requisitos de práticas G7/G7M-13.

Figura 19 – Rack de exposição das amostras submetidas à Degradação abiótica



Fonte: Autoria própria (2017).

A cidade de Teresina, capital do Piauí, estado da região Nordeste, está próxima à linha do Equador, a 5°5' de latitude sul e a 42°43' de longitude oeste de Greenwich, com altitude média de 70 m. O clima na região é classificado, conforme Köppen-Geiger, como megatérmico e subúmido, com inverno seco e verão chuvoso, correspondendo ao clima tropical continental, por se localizar afastada da faixa litorânea. As condições climáticas são marcadas pelo forte contraste entre a estação seca, no inverno, e as precipitações concentradas no verão. As temperaturas médias anuais elevadas variam entre 26 e 28°C. A umidade relativa do ar média anual é de 70%, mas no período chuvoso é em média 85% e nos meses mais secos, 55% (SANTOS; SILVEIRA, 2013). Teresina é classificada como uma das cidades mais quentes do Brasil, chegando a atingir temperaturas superiores a 40 °C. Os ventos na cidade são fracos e de baixa intensidade com velocidade média aproximada de 1,4 m/s, com vários períodos de calmarias (ausência de ventos) em cerca de 40% das horas do ano, além de baixa nebulosidade, o que contribui para a elevada incidência de radiação solar durante todo o ano.

Devido as condições climáticas serem distintas em cada localização geográfica, é de extrema importância o conhecimento desses parâmetros para se compreender o efeito dos mesmos na degradação das amostras (ANDRADY et al., 1998; JACQUES, 2000). Diante disso, durante a exposição das amostras à degradação abiótica foram monitoradas as temperaturas diárias (°C), a umidade relativa do ar (%) e os níveis de precipitação (mm) da região de exposição, sendo utilizados os dados coletados a cada uma hora pela estação meteorológica A312 localizada em Teresina/PI, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Também foi monitorado o índice de radiação ultravioleta (IUV), com dados fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A fim de observar os efeitos da degradação abiótica nos sistemas foram realizadas caracterizações morfológicas e mecânicas das amostras antes e após a exposição ao envelhecimento natural.

3.2.2.4. Colorimetria

Para confirmar os aspectos visuais que tratam de alteração de cores entre as amostras não expostas e expostas após 45 e 90 dias, os autores realizaram ensaio de Colorimetria utilizando um analisador de cor portátil ACR-1023 da Instrutherm, equipado com um sensor externo de geometria de medição de cor de 45°/0°, ou seja, a amostra foi iluminada em 45 graus

na superfície e a luz refletida medida em 0 grau. As medições obtidas nas escalas RGB, vermelho, verde e azul (red, green e blue), de 0 a 1023, foram registradas.

3.2.2.5. Microscopia óptica – MO dos ecocompósitos

As análises foram realizadas no Laboratório de Polímeros e Materiais Conjugados - LAPCON da Universidade Federal do Piauí – UFPI - PI utilizando o microscópio óptico Leica Microsystems MD500 com câmera de captura ICC 50E. Foram capturadas imagens por modo reflexão com ampliações de 40X (500 μ m) na superfície dos corpos de prova antes e após a etapa de envelhecimento.

3.2.2.6. Microscopia eletrônica de varredura – MEV dos ecocompósitos

As análises foram realizadas no Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados – LIMAV da Universidade Federal do Piauí – UFPI - PI em equipamento FEI Quanta FEG 250 acoplado com EDS Apollo XSDD, sob tensão de 10 KV. As imagens foram capturadas com ampliações 300X correspondendo à superfície de fratura por tração, estando todas as amostras revestidas por uma fina camada de ouro por meio da metalizadora Quorum Q150R ES.

3.2.2.7. Desempenho mecânico dos ecocompósitos

O desempenho mecânico foi analisado por meio da determinação do módulo de elasticidade, tensão de escoamento e limite de resistência à tração, mensuradas de acordo com a norma ASTM D 638 em uma máquina de ensaios universal da EMIC, modelo DL 30000, do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Piauí – UFPI - PI. Os testes foram realizados à temperatura ambiente, com uma célula de carga de 50 kN e velocidade de 50 mm/min. Os resultados reportados correspondem a média e desvio padrão calculados a partir de 5 amostras por composição.

3.2.2.8. Análise estatística dos resultados

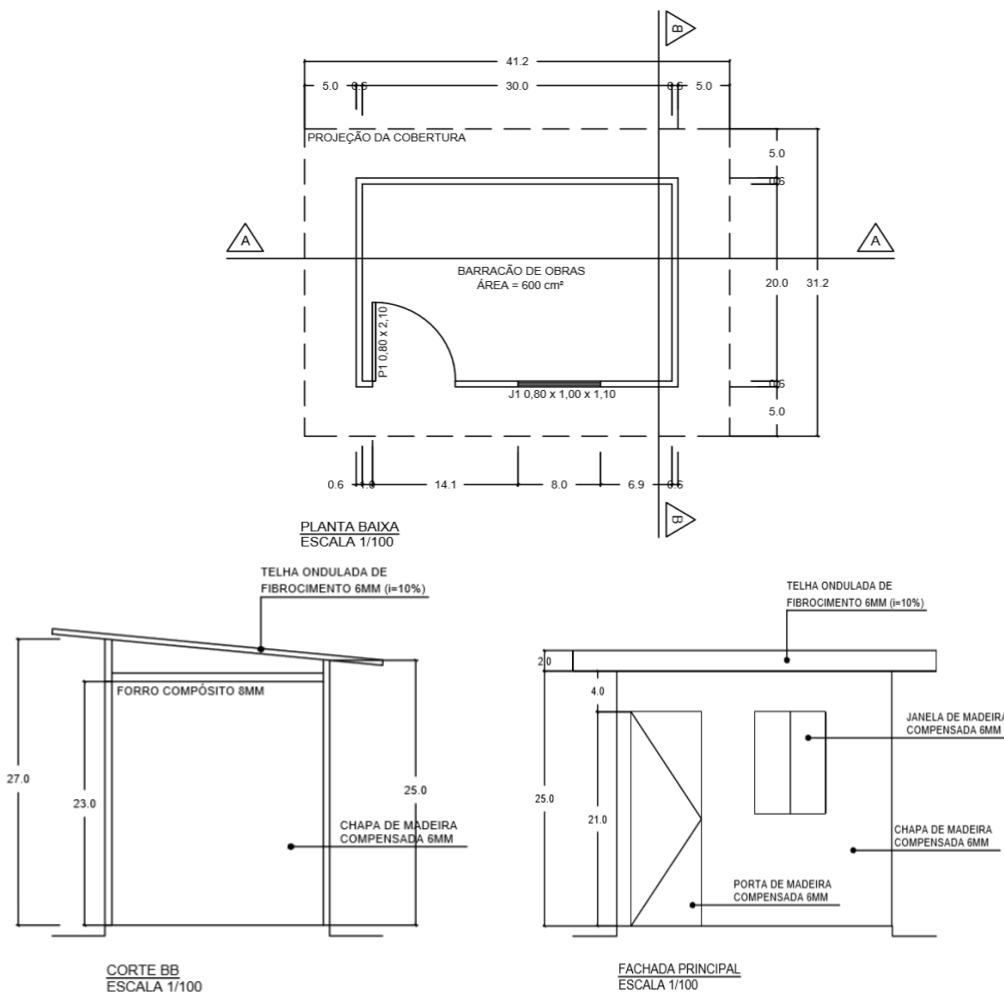
As variações das propriedades mecânicas, antes e após o envelhecimento natural, foram analisadas por meio de gráficos de dispersão utilizando a ferramenta estatística do software R.

A metodologia foi aplicada pelo Laboratório de Colaboração Estatística – LCE da Universidade Federal do Piauí – UFPI e considerou os resultados das amostras não envelhecidas e das amostras envelhecidas ao final de 90 dias para o 1º e 2º período de exposição ambiental.

3.2.3. Proposta de aplicação para os ecocompósitos

Com o propósito de aplicação dos ecocompósitos desenvolvidos em substituição de forros a base de PVC comercial nas construções provisórias previstas no SINAPI, foram projetados protótipos de barracão conforme especificações apresentadas na composição nº 93207: paredes em chapa de madeira compensada, telhamento com telha ondulada de fibrocimento e esquadrias em madeira. A Figura 20 apresenta dimensões do modelo desenvolvido.

Figura 20 – Protótipo de construção provisória em canteiro de obras tipo “escritório”



Fonte: Autoria própria (2018).

No total foram montados protótipos com quatro tipos de placas para forro: PVC, PEV, PEV/5CP e PEV/15CP, a fim de se comparar condições extremas de concentração de cortiça, baixa e alta. A placa de PVC foi adquirida no comércio conforme especificação do SINAPI (Figura 13), com espessura 8mm e cortada com as dimensões 30x20cm. As placas da matriz e dos ecocompósitos foram moldadas com dimensões 15x20cm e espessura de 8mm, a partir de pellets, por meio de uma termoprensa hidráulica modelo MH-08-MN da MH Equipamentos Ltda. do Laboratório de Polímeros e Materiais Conjugados – LAPCON da Universidade Federal do Piauí - UFPI. A Tabela 9 apresenta as condições de moldagem das placas.

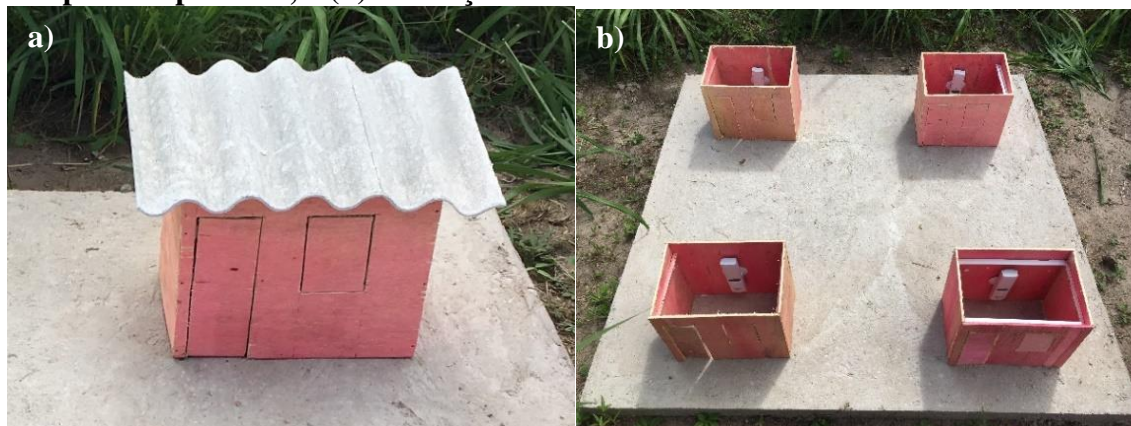
Tabela 9 – Condições de moldagem das placas tipo “forro” a serem utilizadas nos protótipos

Amostra	Pressão (t)	Temperatura de prensagem (°C)	Tempo de prensagem (min)	Tempo sem pressão (min)
PEV	3,0	180	8,5	-
PEV/5CP	3,0	180	9,0	3,0
PEV/15CP	3,0	180	16,0	5,0

Fonte: Autoria própria (2018).

Os protótipos foram instalados em uma base de concreto, na cidade de Teresina, no Campus Ministro Petrônio Portella da Universidade Federal do Piauí (UFPI), por um período de 72 horas (28/06/2018 a 30/06/2018). A região escolhida foi a mesma onde foi realizada a avaliação da degradação abiótica. Em cada protótipo foi instalado um sensor, responsável por medir e transmitir dados de temperatura interna para um termohigrômetro, modelo Klima Logger, marca TFA-Germany, fornecido pelo Centro de Tecnologia – CT da Universidade Federal do Piauí – UFPI. A Figura 21 apresenta a montagem dos protótipos.

Figura 21 – Montagem dos protótipos para análise de conforto térmico: (a) Protótipo do barracão; (b) instalação dos receptores do Termohigrômetro; (c) colocação das placas tipo forro; e (d) colocação das telhas.





Fonte: Autoria própria (2018).

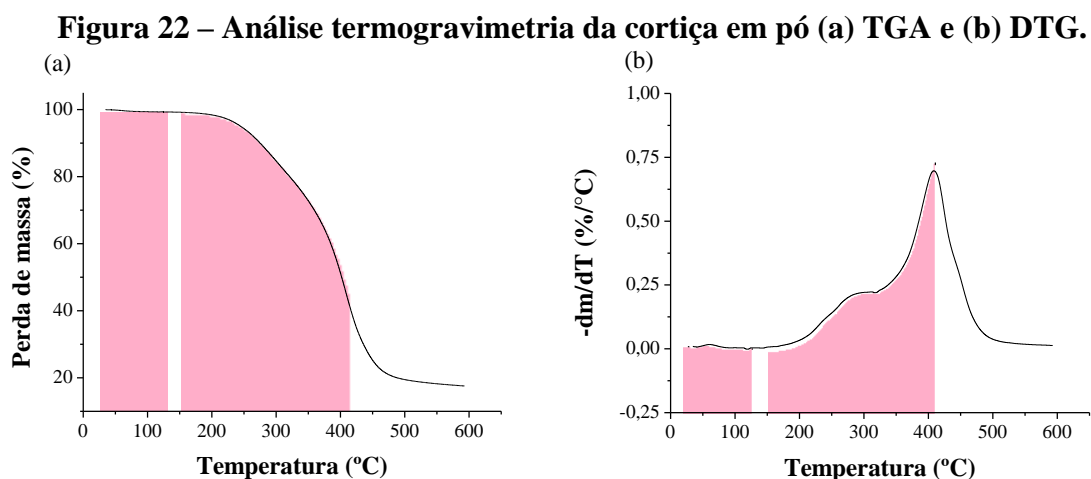
As medições da estação e do termohigrômetro foram realizadas a cada 60 e 15 minutos, respectivamente, e foram armazenadas em seus respectivos dataloggers. Por fim, os dados foram comparados, visando avaliar a diferença entre as temperaturas interna e externa, para cada tipo de placa e determinação de possíveis variações. Neste sentido, foi possível analisar o desempenho térmico nos protótipos frente à amplitude térmica do ambiente em seu entorno, comparando os resultados dos ecocompósitos com o PEV e PVC comercial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Térmica da cortiça e respectivos ecocompósitos

Foram analisadas as temperaturas que correspondem ao início e ao fim dos processos de degradação dos constituintes das amostras, bem como a temperatura em que a velocidade de reação é máxima, também denominada de temperatura de pico.

A análise termogravimétrica da cortiça foi realizada para determinar as etapas de degradação da carga vegetal e determinar a melhor condição de processamento. As curvas de TGA e DTG da cortiça em pó são apresentadas na Figura 22.



Fonte: Autoria própria (2017).

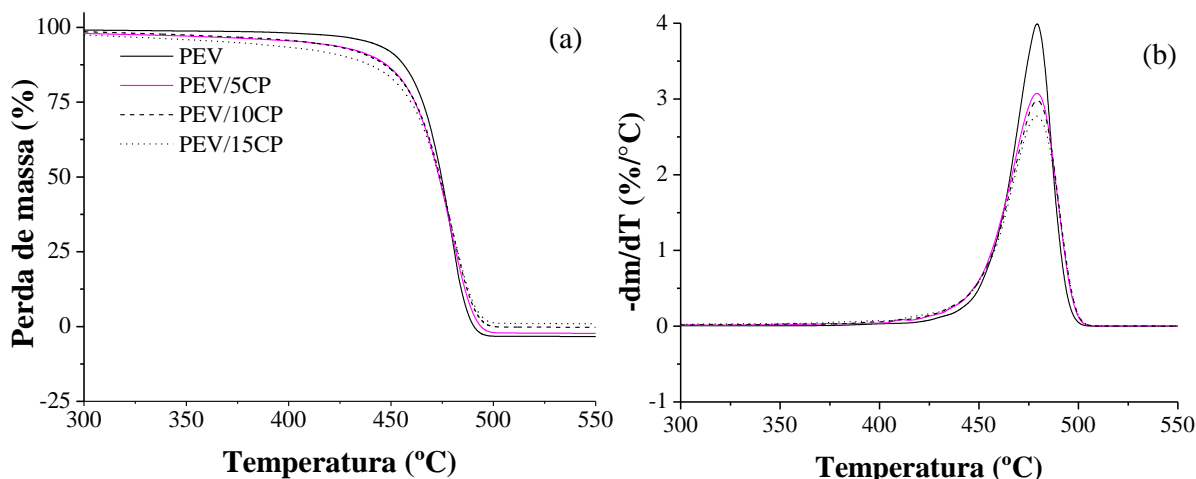
De acordo com os dados obtidos é possível observar que a degradação térmica da cortiça ocorre em duas etapas: a primeira etapa de perda de massa, com percentual de 0,68, ocorre entre 25°C e 125°C devido à perda de moléculas de água. Índices mais significativos de perdas de massa ocorreram a 278,44°C e 409,10°C, 19,09% e 62,65% respectivamente, conforme termogramas apresentados na Figura 22. Os resultados corroboram com a literatura, indicando estabilidade térmica da cortiça nas condições aplicadas no processamento dos ecocompósitos (FERNANDES et al., 2011, 2014b; ROSA; A. FORTES, 1988).

Fernandes et al. (2014b) realizaram análise de degradação térmica dos principais constituintes da cortiça, lignina e suberina, e identificaram que a degradação de ambos ocorre de forma independente. Em seus estudos, a suberina exibe boa estabilidade térmica até 260°C, seguido de perda de massa progressiva, atingindo 45% em 338°C e 87% em 494°C, e a lignina apresenta uma pequena perda a 193°C associada às estruturas monoméricas da lignina

resultante da extração. No entanto, a decomposição máxima da lignina ocorre em 515°C devido à sua estrutura aromática complexa, confirmando maior resistência térmica que a suberina.

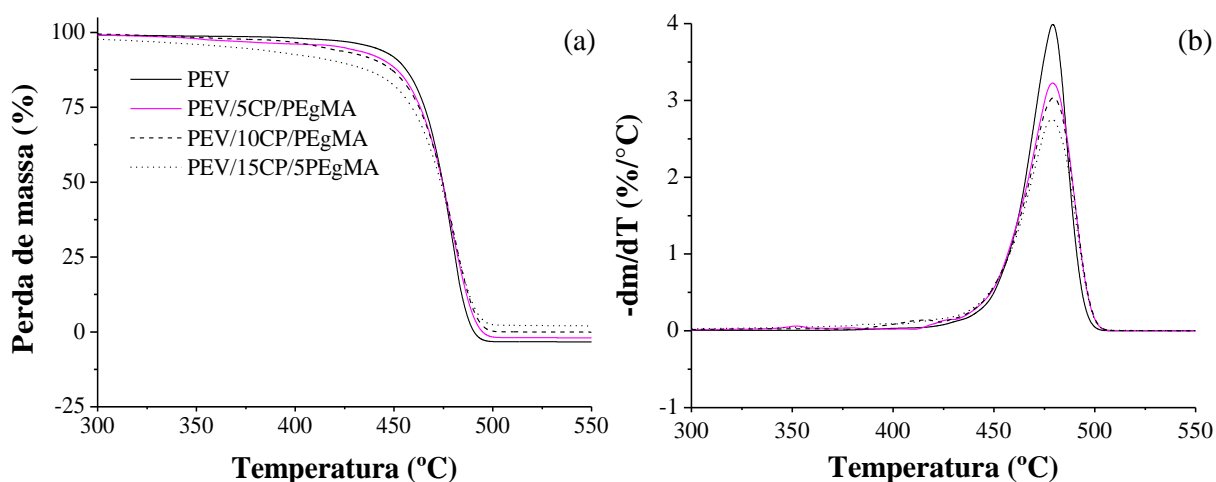
A análise da degradação térmica da matriz polimérica e dos ecocompósitos pode ser observada nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Análise termogravimetria do PEV e dos ecocompósitos sem compatibilizante (a) TGA e (b) DTG.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 24 - Análise termogravimetria do PEV e dos ecocompósitos com compatibilizante (a) TGA e (b) DTG.



Fonte: Autoria própria (2017).

Em relação à degradação dos ecocompósitos, as curvas de TGA apresentaram uma discreta perda de massa entre a temperatura ambiente e 100°C. Apesar do polímero não apresentar umidade residual, quando combinado a uma carga vegetal, os compósitos com

cortiça podem apresentar uma perda de massa nessa região em torno de 0,6-0,7% (FERNANDES et al., 2011) devido a umidade da carga vegetal não ser totalmente eliminada a 100°C (ROSA; A. FORTES, 1988).

De acordo com os comportamentos obtidos foi possível observar que a degradação térmica do polímero e dos ecocompósitos ocorreu em um único estágio de decomposição, com discretas variações de temperatura inicial, indicando que o processo degradativo teve como agente predominante o comportamento térmico da matriz. Resultados semelhantes foram obtidos por ESSABIR et al. (2013b).

A Tabela 10 detalha as características do processo de decomposição térmica, apresentando as temperaturas inicial (T_{onset}), final (T_{endset}) e temperatura de pico (T_{pico}).

Tabela 10 - Características de degradação térmica das amostras de PEV e ecocompósitos.

Amostras	T_{onset} (°C)	T_{endset} (°C)	T_{pico} (°C)	Massa _{residual} (%)
PEV	462	488	479,31	-
PEV/5CP	458	491	479,27	-
PEV/10CP	454	493	479,37	-
PEV/15CP	455	492	479,07	-
PEV/5CP/PEgMA	458	492	479,12	-
PEV/10CP/PEgMA	456	493	479,58	-
PEV/15CP/PEgMA	454	493	478,81	1,864

Fonte: Autoria própria (2018).

As temperaturas de início de degradação dos ecocompósitos evidenciam uma estabilidade térmica ligeiramente inferior ao PEV. A incorporação e o aumento do teor da carga no material foram responsáveis por essa redução, sendo as amostras com 5% de cortiça, PEV/5CP e PEV/5CP/PEgMA, menos instáveis termicamente. Resultado semelhante foi encontrado por Castro, Ruvolo-Filho e Frollini (2012), que ao desenvolverem compósitos de PEV/fibras de curauá (5, 10, 15 e 20%)/polibutadieno hidroxilado (5%), identificaram que as temperaturas de decomposição dos compósitos foram menores em relação à matriz termoplástica em virtude da incorporação do material lignocelulósico. Em outras pesquisa, Kuciel, Jakubowska e Kuźniar (2014) misturaram biopolietileno à outras quatro cargas: farinha de madeira, fibras picadas de cânhamo, micropartículas de tufo mineral e pó ultrafino de celulose (teor de 25% em peso), e observaram que as três primeiras cargas promoveram ligeira diminuição do ponto de fusão dos compósitos. E por fim, Essabir et al. (2013a), ao reforçarem

polipropileno com partículas de casca de noz de argan, identificaram que a adição da carga vegetal reduziu a estabilidade térmica do material.

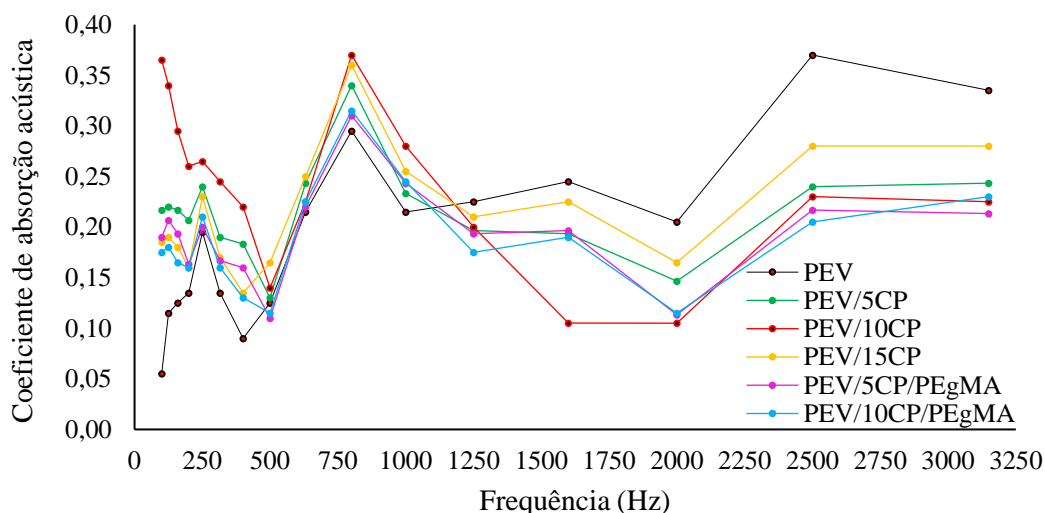
A estabilidade térmica e a temperatura de degradação dos compósitos tratados com PEGMA não foram afetadas de forma significativa. Essabir et al. (2013b) observaram comportamento similar em biocompósitos de polipropileno reforçado com partículas de casca de amêndoas.

Ao final do processo de decomposição das amostras, que ocorreu nas temperaturas T_{endset} indicadas na Tabela 10, foi observado que o polímero puro e as amostras PEV/5CP, PEV/10CP, PEV/15CP, PEV/5CP/PEGMA, PEV/10CP/PEGMA se desintegraram totalmente, enquanto que o ecocompósito PEV/15CP/PEGMA apresentou valor residual de massa de 1,864%.

4.2. Coeficiente de absorção sonora dos ecocompósitos

A Figura 25 representa o coeficiente de absorção sonora do PEV e dos ecocompósitos sob as frequências de 0 a 3150 Hz.

Figura 25 – Coeficiente de absorção sonora do PEV e ecocompósitos.



Fonte: Autoria própria (2018).

Após análise dos resultados ficou evidente que o coeficiente de absorção sonora é dependente do percentual de carga inserido na composição. O PEV apresentou um perfil de absorção sonora maior em frequências mais altas (0,379 em 2500 Hz), enquanto todos os

ecocompósitos apresentaram coeficientes maiores que a matriz em frequências baixas e médias, até 1000 Hz, com destaque as composições com maior teor de cortiça: PEV/10CP (0,370) e PEV/15CP (0,360). Valores estes 25 e 22%, respectivamente, superior ao obtido para a matriz pura no mesmo ponto de frequência (800 Hz). A melhoria da capacidade de absorção das amostras pode ser atribuída a alta porosidade da cortiça, visto que a maioria das ondas sonoras incidentes é absorvida e transformada em energia térmica reduzindo a reverberação (SILVA et al., 2005). Koizumi, Tsujiuchi e Adachi (2002) explicaram também que o aumento do teor de carga vegetal por unidade de área, aumenta a densidade da amostra e a perda de energia das ondas sonoras devido ao aumento do atrito da superfície, o que eleva o desempenho da absorção sonora. A melhoria do coeficiente de absorção sonora em baixas frequências também pode ser justificada segundo os estudos de Mamtaz et al. (2016) e Swift, Bris e Horoshenkov (1999).

Para Mamtaz et al. (2016), fatores como tamanho do grão, a densidade aparente e a espessura da camada das cargas vegetais influenciam diretamente na capacidade de absorção acústica em baixas frequências. Swift, Bris e Horoshenkov (1999) relacionam o aumento do coeficiente de absorção em baixa frequência com o tamanho do grão, afirmando que a resistividade do fluxo é diretamente proporcional à área de superfície interna do material compósito granular, enquanto a área de superfície interna é inversamente proporcional ao tamanho do grão. Eles confirmaram que um material granular com tamanho < 2mm contribui para o aumento do fluxo de resistividade levando a um desempenho de absorção acústica mais alto. Assim, considerando o parâmetro “tamanho do grão” e que nesse estudo a cortiça possui granulometria de 74µm, pode-se dizer que o material vegetal foi responsável pela elevação do desempenho de absorção acústica, contribuindo significativamente para a dispersão do som dentro do material e resultando numa maior capacidade de absorver ondas sonoras em baixa frequência (LIMA, 2016).

A partir de 1250 Hz os ecocompósitos apresentaram perda da capacidade de absorção sonora. A justificativa para redução em frequências maiores pode ser atribuída à espessura adotada de 18 mm nas amostras. De acordo com as diretrizes gerais dos fenômenos de absorção dentro de um material poroso, um longo processo dissipativo de viscosidade e condução térmica entre o ar e o material absorvente dentro do compósito melhora a absorção. Dessa forma, a absorção sonora pode ser aprimorada com o aumento da espessura da amostra (MAMTAZ et al., 2016). Berardi e Iannace (2015) apresentaram uma revisão de literatura das propriedades acústicas em algumas cargas naturais em seu estado bruto, dentre elas a cortiça, e os resultados apresentaram, para as amostras de aglomerado de cortiça com 10cm de diâmetro e 3cm de

espessura, coeficientes de absorção insignificante nas frequências baixas e médias devido ao tamanho dos grãos, e resultados de até $\alpha=0,9$ em 1600 Hz, o que apontou a necessidade de adotar maiores espessuras de painéis de cortiça a fim de obter maior capacidade de absorção sonora.

Também foi possível observar que praticamente em todas as frequências a incorporação do compatibilizante não propiciou melhorias nessa propriedade. O fato pode ser justificado pela presença do PEGMA, capaz de aumentar a adesão entre as fases, reduzindo a porosidade do material e diminuindo o atrito interno desfavorecendo a absorção acústica pelos compósitos modificados. Este resultado corrobora com o estudo de Karaky et al. (2019), que ao desenvolverem compósitos sustentáveis de amido de batata reforçados com polpa de beterraba (1, 20, 30 e 40%), a fim de propor aplicações em revestimento de isolamento em paredes e pisos nas construções, perceberam que o aumento da quantidade de amido, utilizado como ligante, provocou diminuição da porosidade do compósito e diminui a capacidade de absorção sonora.

É importante destacar ainda que, mesmo apresentando coeficiente inferior ao do PEV em frequências mais altas, a amostra PEV/15CP apresentou ainda o maior coeficiente dentre todos os compósitos (0,280).

4.3. Degradação abiótica dos ecocompósitos

4.3.1. Condições climáticas

O ensaio de degradação abiótica das amostras produzidas foi conduzido em duas etapas no ano de 2017, conforme Tabela 11 e os parâmetros climáticos monitorados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 – Períodos de realização do ensaio de degradação e datas de retiradas das amostras para análises das amostras

Período I: 06/02/2017 a 07/05/2017		Período II: 04/09/2017 a 03/12/2017	
1ª retirada (45º dia)	2ª retirada (90º dia)	3ª retirada (45º dia)	4ª retirada (90º dia)
23/03/2017	07/05/2017	19/10/2017	03/12/2017

Fonte: Autoria própria (2017).

Após análise dos dados coletados, foi observado no primeiro período, considerado quente e úmido, e no segundo período, considerado quente e seco, o registro de elevadas temperaturas: 34,6°C no dia 06/02/2017 e 39,1°C no dia 21/10/2017. Segundo Yang et al.

(2005) e Andrady et al. (1998), temperaturas elevadas são um dos fatores responsáveis por intensificar a degradação e a redução da durabilidade dos produtos poliméricos, e por influenciar na velocidade das reações foto-oxidativas (VALADEZ; VELEVA, 2004).

Tabela 12 - Resumo das condições climáticas durante o ensaio de degradação abiótica na cidade de Teresina-PI.

Semana	1º Período - 06/02/2017 a 07/05/2017					2º Período - 04/09/2017 a 03/12/2017				
	Temperatura média (°C)		IUV Máx	Precipitação (mm)	Umidade relativa média (%)	Temperatura média (°C)		IUV Máx	Precipitação (mm)	Umidade relativa média (%)
	Máx	Mín				Máx	Mín			
1	32,5	24,0	11,90	137,20	72,5	37,8	18,1	11,50	0,00	48,5
2	30,7	22,9	12,30	123,20	79,5	37,5	19,5	12,00	0,00	49,5
3	32,1	23,1	11,70	26,00	74,4	37,9	20,1	12,40	0,00	51,5
4	32,1	23,0	11,70	86,00	76,6	39,0	20,5	12,00	0,00	49,0
5	32,1	23,0	11,60	87,00	76,8	38,4	22,3	12,30	0,00	49,5
6	31,0	23,0	12,90	64,00	78,6	38,4	23,8	12,50	0,00	52,0
7	32,1	23,1	12,30	32,40	75,8	39,1	22,4	12,40	0,60	49,5
8	33,0	23,2	11,00	57,20	73,4	39,0	22,8	12,50	0,00	48,5
9	32,7	23,3	11,00	15,80	74,4	38,3	22,0	12,10	0,00	48,5
10	32,4	23,2	9,80	1,20	77,1	37,6	23,8	12,00	0,60	54,0
11	32,4	23,5	10,70	30,60	75,6	37,8	22,8	11,80	1,40	51,0
12	32,7	23,8	9,30	45,40	74,6	37,8	23,7	11,90	13,4	55,5
13	32,5	23,4	10,50	62,00	73,6	37,4	22,5	11,60	0,00	50,0

Fonte: INMET, 2017; Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DIDSA) do Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.

A presença de água no ambiente também pode ser responsável pela ocorrência de degradações em um material, seja por processos físicos ou químicos, acelerando as reações de oxidação e facilitando a penetração da luz nos compósitos (STARK, 2006; STARK; MATUANA, 2006; STARK; MATUANA; CLEMONS, 2004). A água pode chegar à superfície das amostras expostas ao intemperismo de diversas maneiras: em forma de precipitação, pela umidade relativa do ar ou pela água formada na superfície do material como orvalho ou condensação (JACQUES, 2000).

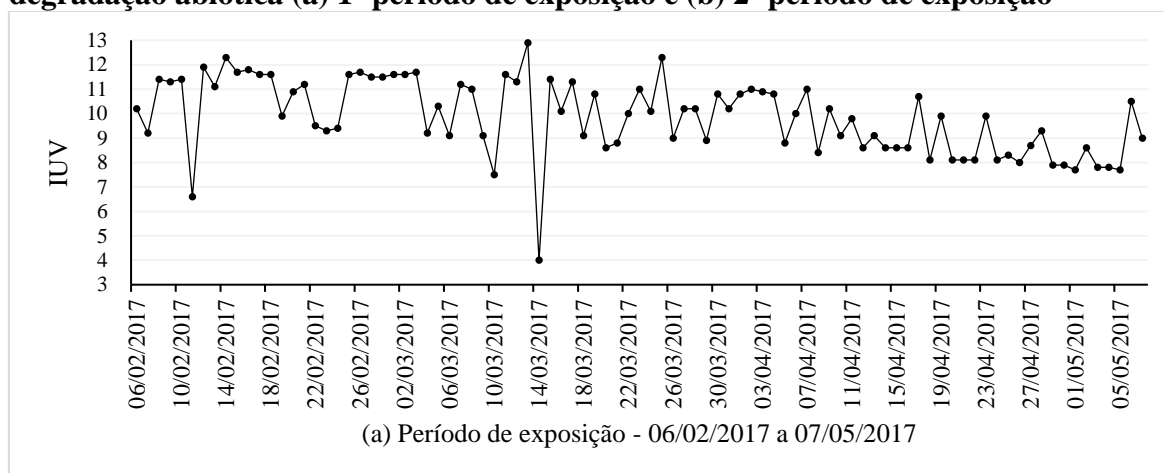
Na cidade de Teresina a umidade relativa tem como característica variar ao longo do ano, com o primeiro semestre caracterizado por valores altos de umidades e o segundo semestre mais seco. Durante o período de exposição das amostras, foi observado que a primeira etapa apresentou umidade elevada em média de 75,6%, alcançando máxima de 92%, enquanto a segunda etapa foi bastante seca, com um valor médio de umidade de 51%.

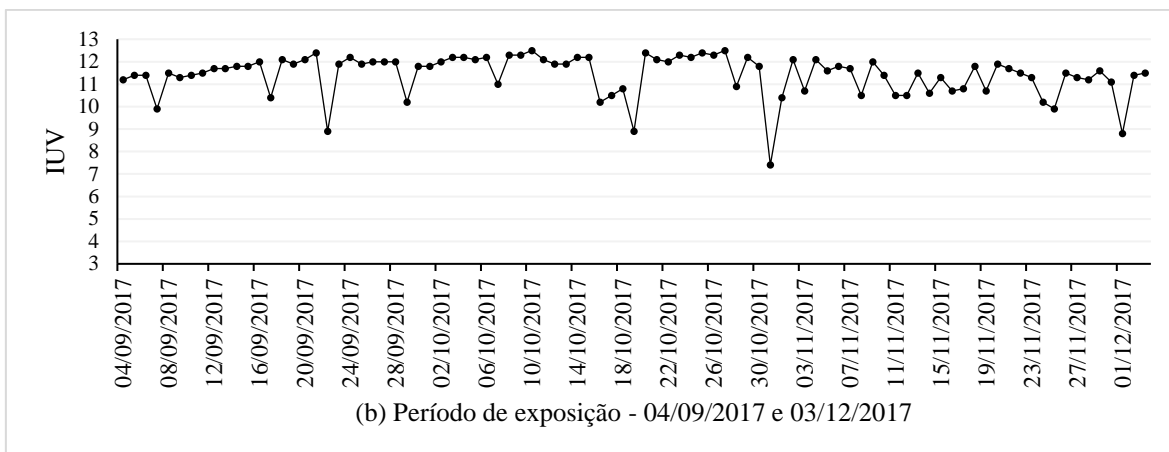
Os níveis de precipitação indicaram para o primeiro período de análise um volume total de 768 mm, com um volume de 543,20 mm registrado até a primeira retirada das amostras no dia 23/03/2017. O segundo período foi caracterizado por escassez de chuva, com apenas 0,6mm nos meses de setembro e outubro e um total concentrado de 15,4mm no mês de novembro, indicando que no primeiro intervalo as amostras sofreram de forma mais acentuada com a ação da água precipitada.

Por estar localizada entre os trópicos e por ser caracterizada pela baixa nebulosidade, a cidade de Teresina é atingida diariamente por elevadas intensidades de radiação solar, parâmetro responsável pela iniciação dos processos de degradação abiótica nos materiais poliméricos e na carga vegetal (JACQUES, 2000; MATUANA; JIN; STARK, 2011). Uma forma de determinar a intensidade de radiação ultravioleta é por meio do Índice Ultravioleta (IUV), um número inteiro que pode ser representado em categorias de intensidades: menor que 2 é considerado baixo; entre 3 e 5, moderado; entre 6 e 7, alto; entre 8 e 10, é muito alto e maior que 11 é extremo (CPTEC-INPE, 2017). Os valores apontam que nos dois períodos avaliados foram registrados altos índices de radiação ultravioleta - IUV, atingindo níveis extremos de 12,5.

A Figura 26 apresenta de forma mais detalhada os índices de radiação durante os períodos estudados.

Figura 26 - Valores de IUV máximo para a cidade de Teresina durante o ensaio de degradação abiótica (a) 1º período de exposição e (b) 2º período de exposição





Fonte: Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DIDSA) do Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

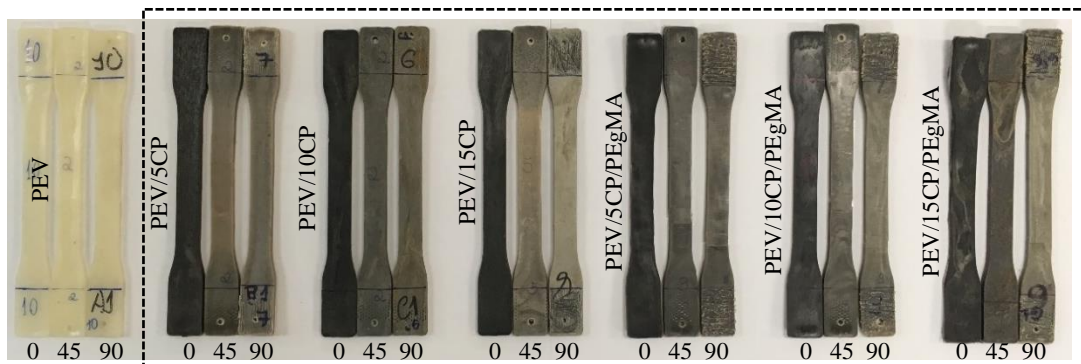
A partir da análise da Figura 26, pode-se observar que as amostras sofreram intensa incidência de radiação UV, com a ocorrência de índices classificados como “muito alto” ou “extremo” em 90% dos dados coletados no primeiro semestre e 99% no segundo semestre.

4.3.2. Análise visual

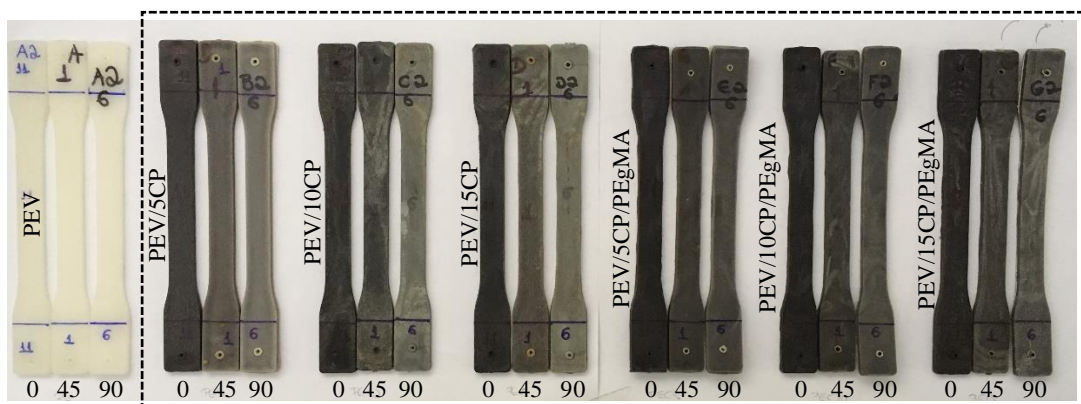
Anteriormente às análises de MO e MEV, o polímero e os respectivos ecocompósitos foram visualmente avaliados. De uma maneira geral, as amostras apresentaram boa dispersão das partículas de cortiça na matriz, tonalidade homogênea e bom acabamento superficial, tendo a cortiça alterado a cor inicial. Amostras modificadas com PEGMA apresentaram melhor acabamento superficial e tonalidade mais escura, sugerindo que o agente de acoplamento alterou a molhabilidade do sistema e promoveu uma melhor ligação interfacial entre carga e matriz. Resultados semelhantes foram observados por Fernandes, Mano e Reis (2013) ao desenvolverem compósitos poliméricos híbridos com cortiça e fibra de sisal. A Figura 27 apresenta as amostras de corpo de prova da matriz e ecocompósitos não expostas ao intemperismo e após exposição durante 45 e 90 dias.

Figura 27 – Corpos de prova da matriz e ecocompósitos não expostos ao intemperismo (0 dias) e após a exposição (45 e 90 dias): (a) 1º período e (b) 2º período.

(a)



(b)

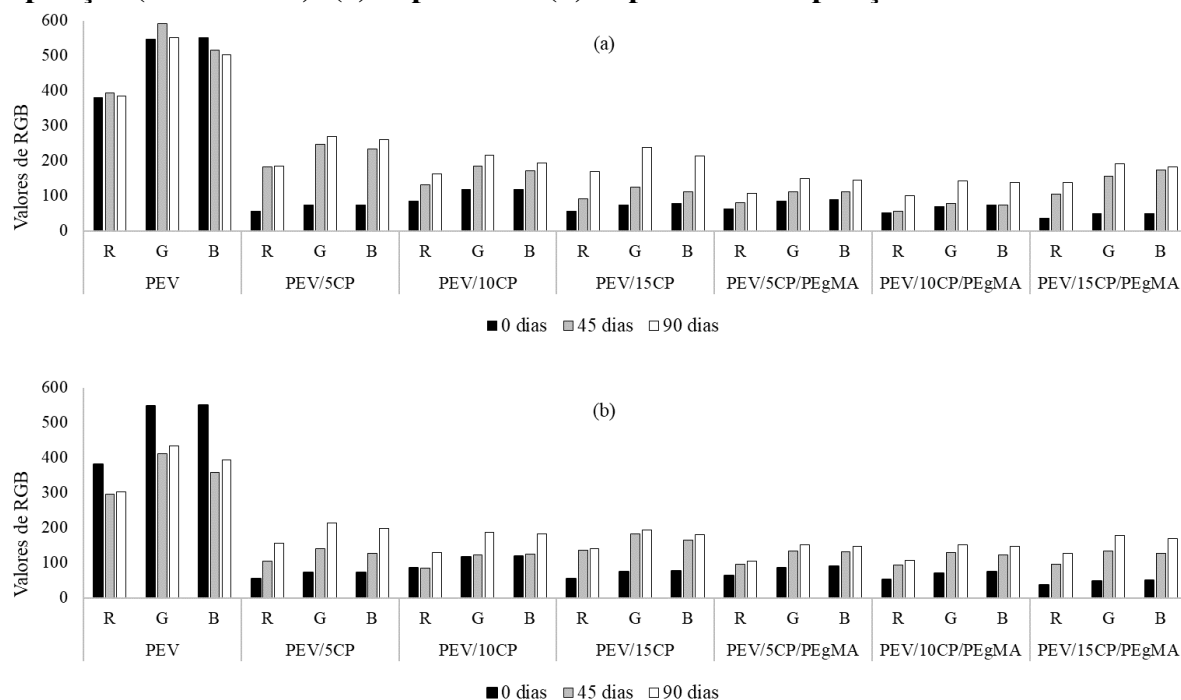


Fonte: Autoria própria (2017).

4.3.2.1. Colorimetria

As medições dos parâmetros de cores e os efeitos da exposição aos raios UV são apresentados na Figura 28 para a escala RGB. Após os períodos de exposição verificou-se que a degradação abiótica causou alterações distintas. As amostras de PEV envelhecidas no período chuvoso manteve sua tonalidade, enquanto após o período seco as mesmas amostras escureceram e os ecocompósitos, em ambos os períodos, apresentaram clareamento. A descoloração pode ser atribuída à fotodegradação da cortiça e do PEV, por diferentes mecanismos, após a exposição à luz ultravioleta. O principal fator que contribuiu para esse processo é a presença de grupos cromóforos tanto no polímero quanto na lignina da cortiça, responsáveis pela absorção da luz ultravioleta (UV) e por intensificar a fotodegradação da amostra (FEIST; HON, 1984; MATUANA; JIN; STARK, 2011; PANDEY et al., 2017; ANDRADY et al., 1998; FABIYI et al., 2008).

Figura 28 – Valores RGB da matriz e dos ecocompósitos antes (0 dias) e após da exposição (45 e 90 dias): (a) 1º período e (b) 2º período de exposição.



Fonte: Autoria própria (2019).

A cortiça tem um teor médio de lignina de 27 % (GIL, 2012) que, quando degradado, gera produtos solúveis em água, levando à formação de grupos cromóforos funcionais, tais como ácidos carboxílicos, quinonas e radicais hidróperóxidos (BADJI et al., 2017; FEIST; HON, 1984). Desta forma, a absorção da luz UV inicia reações fotoquímicas nas superfícies de cortiça gerando radicais livres que causam degradação da lignina e foto-oxidação da celulose e hemicelulose, e efetivamente causando descoloração (FEIST; HON, 1984; PANDEY, 2005).

No caso do PEV, o polímero contém grupos cromóforos como resíduos catalíticos, grupos hidróperóxidos e carbonila introduzidos durante sua síntese, processamento e armazenamento. Estes grupos absorvem a energia UV e inicia reações fotoquímicas que causam degradação e levam ao craqueamento das ligações (GRUM, 2008). A difusão de oxigênio no polietileno controla sua fotodegradação, causando tensões que podem iniciar e propagar fissuras na superfície, levando ao branqueamento e perda de propriedades mecânicas (YAKIMETS; LAI; GUIGON, 2004).

As alterações de cor das amostras contendo agente compatibilizante foram menos intensas do que as observadas nas composições sem o PEgMA. Resultados semelhantes foram obtidos por Ndiaye et al. (2008) em seu estudo sobre a durabilidade de compósitos de madeira à base de PEAD/PP e agente de acoplamento. Os autores concluíram que a adição de

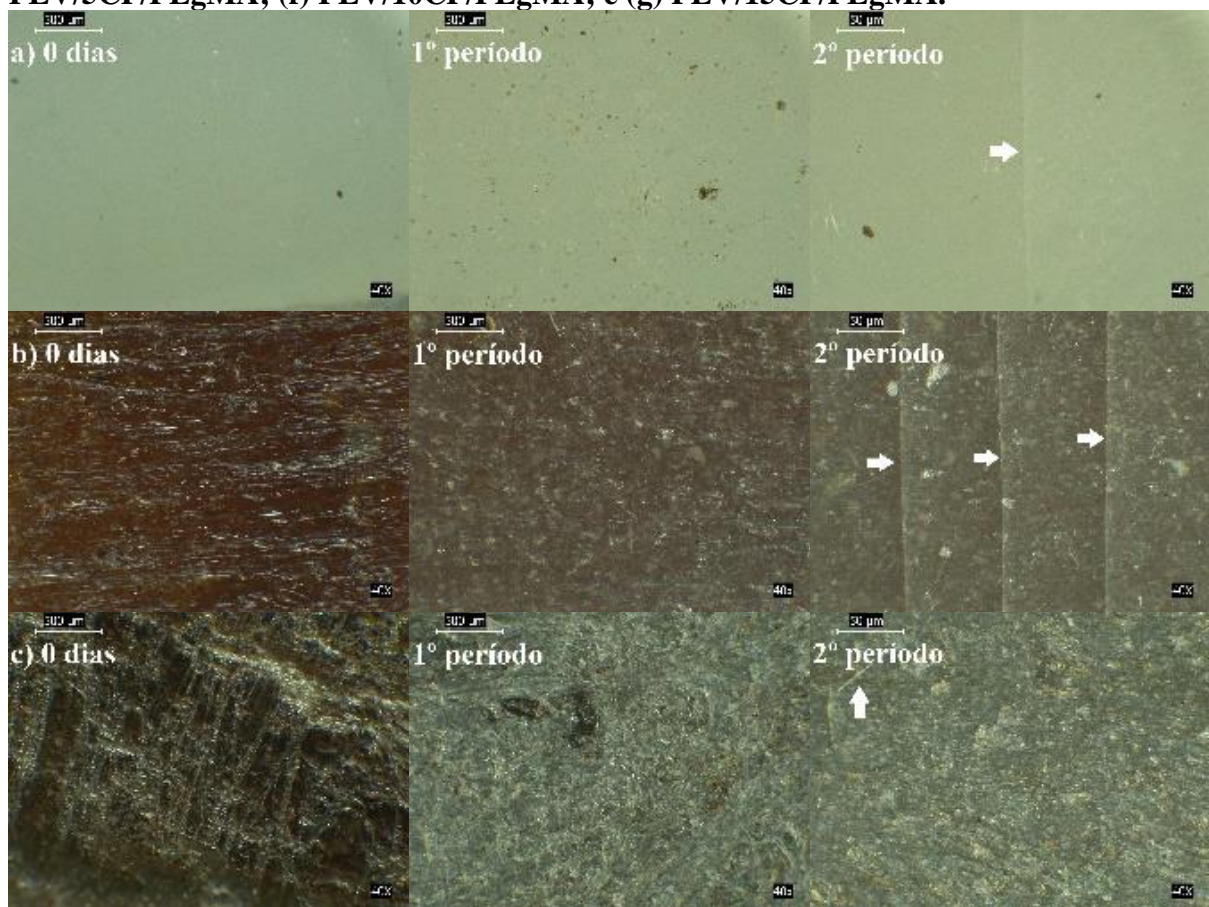
compatibilizante levou ao melhor encapsulamento da carga vegetal na matriz e à redução da taxa de oxidação dos compósitos.

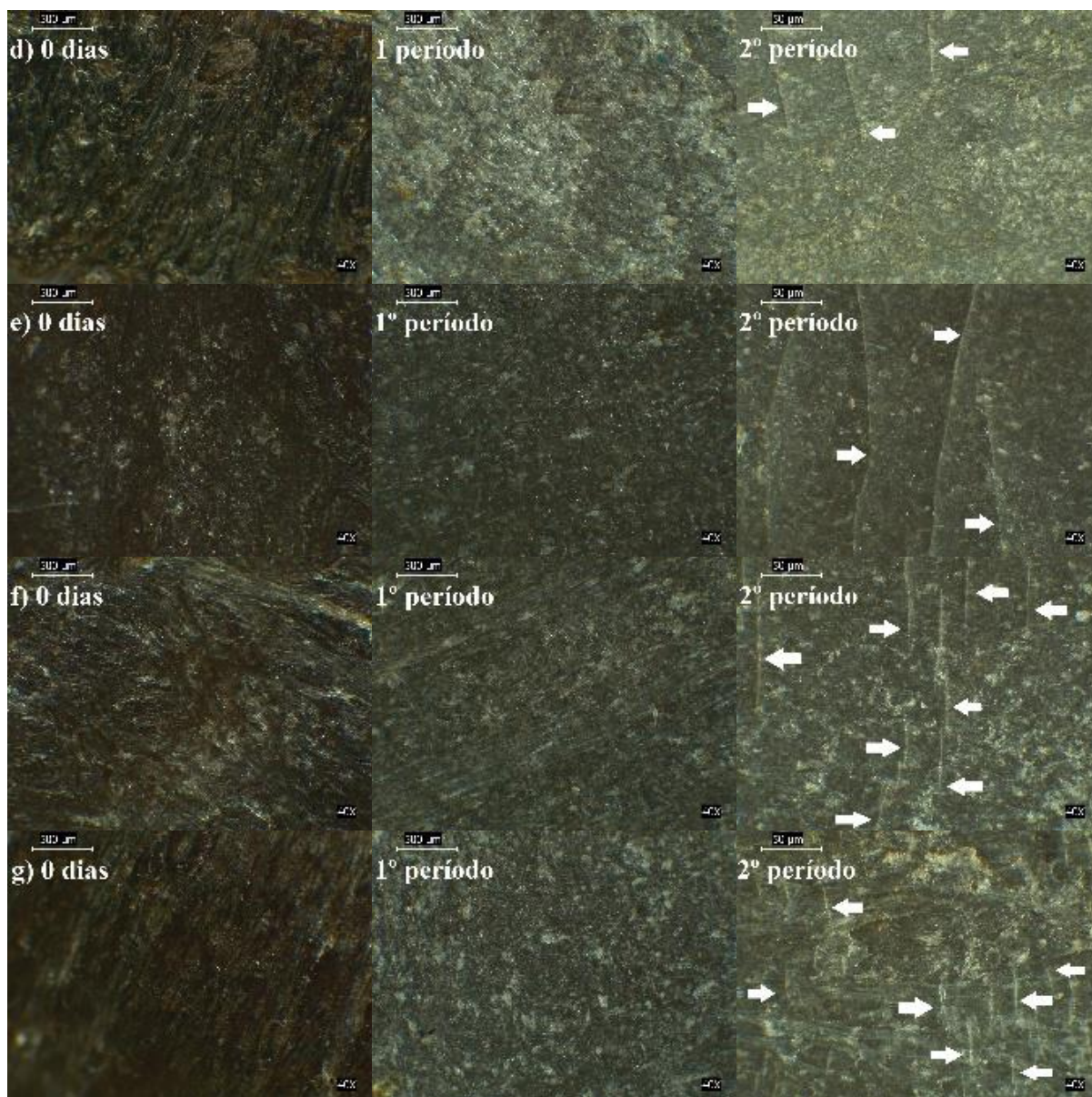
4.3.3. Morfologia dos ecocompósitos

4.3.3.1. Microscopia Óptica

Os aspectos observados na inspeção visual foram corroborados com as imagens superficiais obtidas via microscopia óptica dos compósitos não expostos e expostos ao final de cada período, e estão apresentados na Figura 29. As imagens superficiais das amostras retiradas no intervalo dos períodos de exposição (45 dias) não foram apresentadas neste tópico por não terem apresentado alterações significativas quando comparadas as amostras não envelhecidas.

Figura 29 – Imagens de MO na superfície da amostra do PEV e seus ecocompósitos antes (0 dias) e após final da exposição à degradação abiótica (90 dias), no 1º e 2º período, com ampliações de 40X: (a) PEV; (b) PEV/5CP; (c) PEV/10CP; (d) PEV/15CP; (e) PEV/5CP/PEgMA; (f) PEV/10CP/PEgMA; e (g) PEV/15CP/PEgMA.





Fonte: Autoria própria (2017).

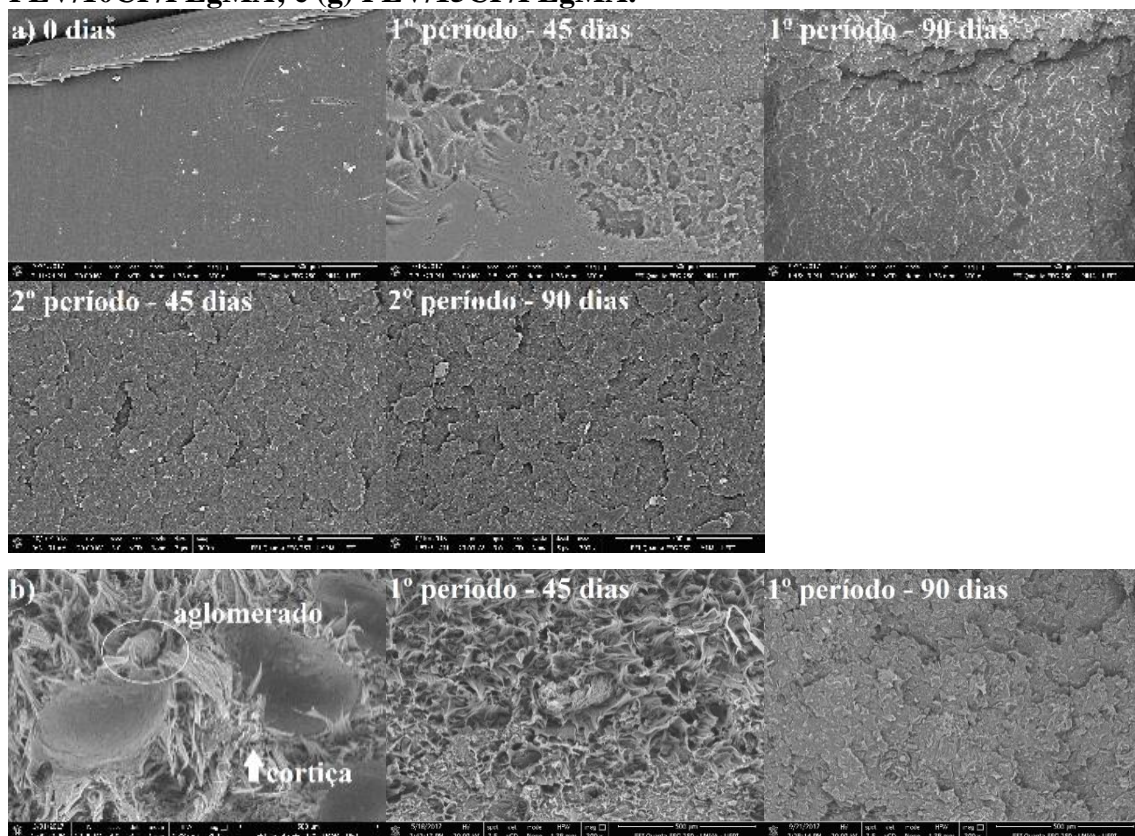
A análise das superfícies das amostras não envelhecidas confirma uma boa dispersão das partículas de pó de cortiça, tonalidade homogênea, aspecto brilhante e acabamento superficial livre de bolhas. Após o período de exposição aos raios UV, provavelmente devido à alta molhabilidade da cortiça pela matriz, não foi identificada exposição da cortiça na superfície dos compósitos, característica interessante para o primeiro semestre que apresentou média da umidade relativa de 75,6 % e precipitação em todas as semanas de ensaio. Segundo Turku, Kärki e Puurtinen (2018), o surgimento da carga vegetal permitiria absorção de umidade pelo compósito, inchaço da cortiça e diminuição da interação entre as fases diminuindo a interação entre as fases e agravando a perda das propriedades mecânicas.

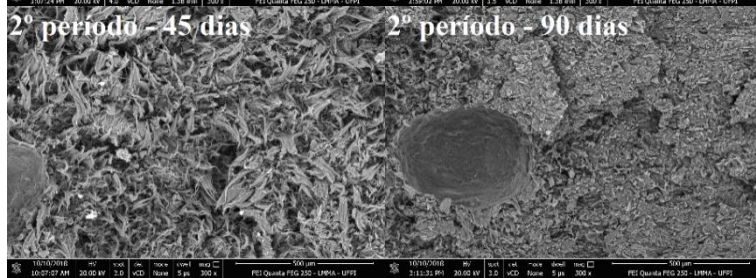
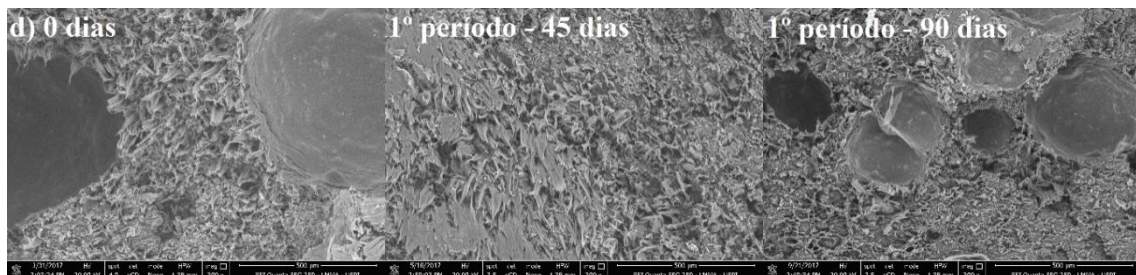
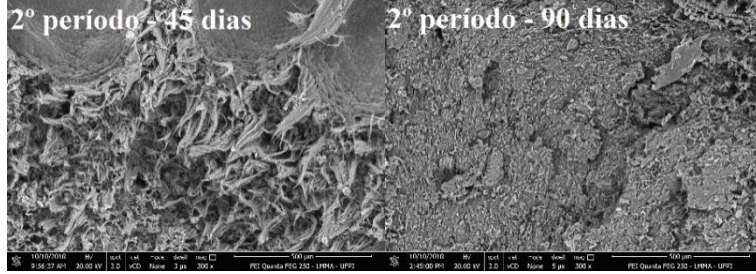
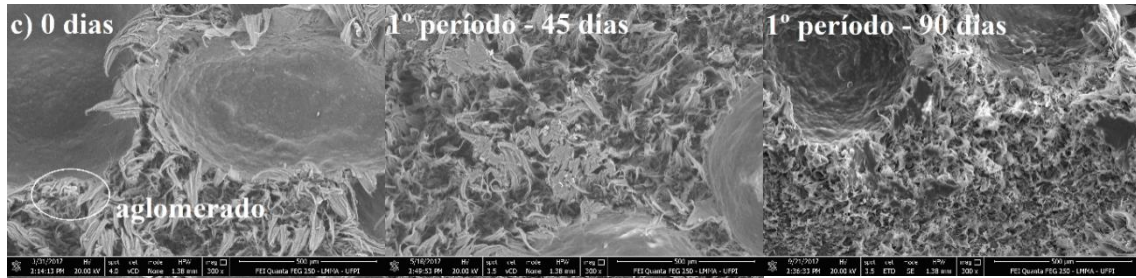
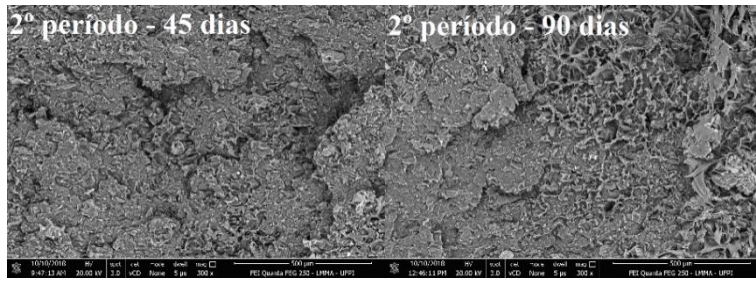
No segundo período de exposição, todas as amostras apresentaram trincas na superfície comprovando o efeito degradativo da radiação sobre as mesmas. A intensificação da degradação está associada aos altos índices de UV (Figura 26). O número de fissuras parece aumentar com a incorporação de cortiça, confirmando que a presença da carga vegetal enfraquece o material sob condições de intemperismo natural (BADJI et al., 2017). A fissuração espontânea de polímero também pode ocorrer a partir da cristalização secundária, também conhecida como cristalização química (CRAIG; WHITE, 2005).

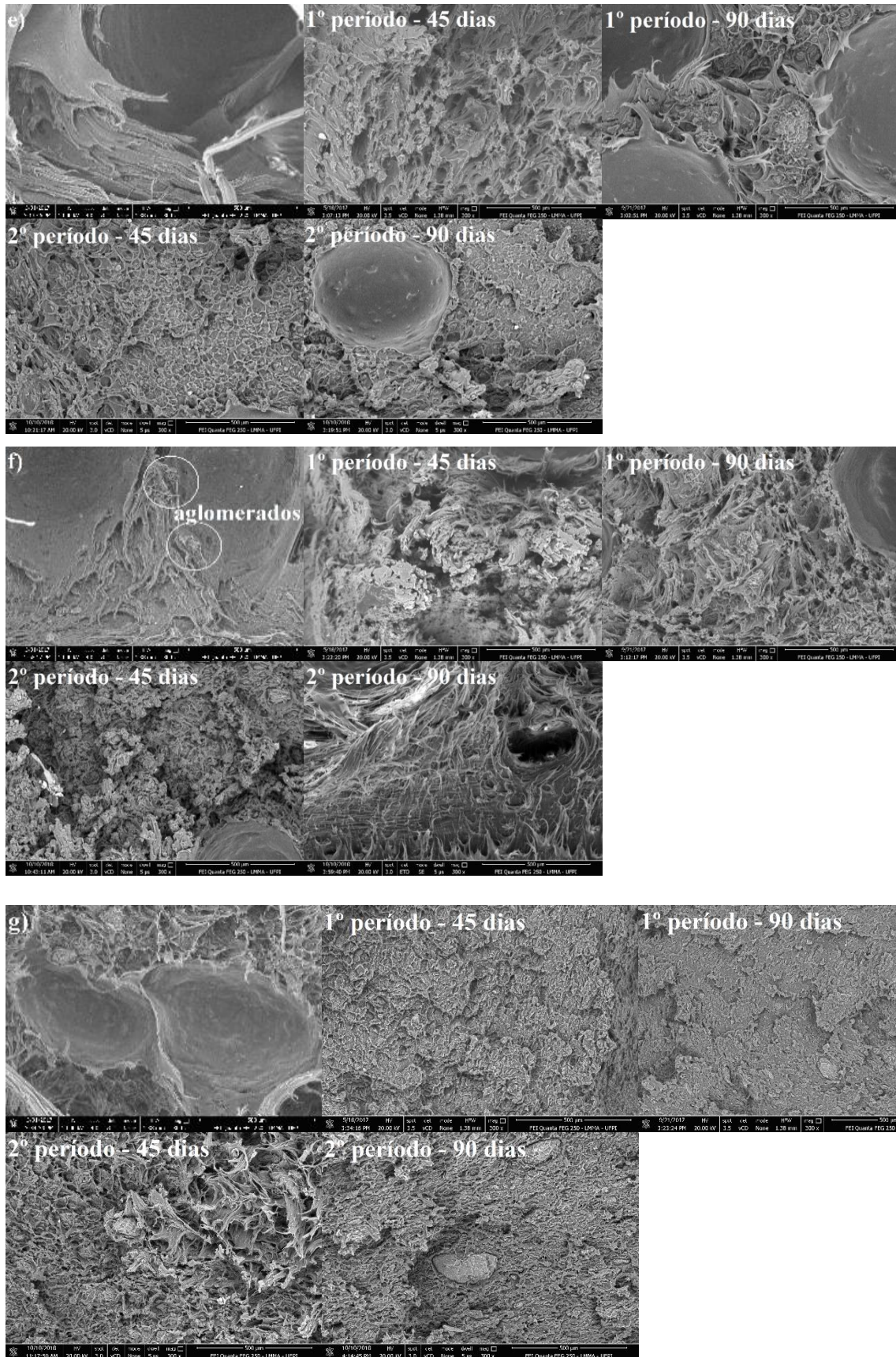
4.3.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

Para uma melhor visualização dos efeitos da degradação abiótica sobre a morfologia dos ecocompósitos, a superfície de fraturas antes e após o período de exposição foram avaliadas, conforme apresentado na Figura 30.

Figura 30 – MEV do PEV e ecocompósitos na superfície de fratura antes (0 dias) e após exposição a degradação abiótica (45 dias e 90 dias), com ampliação 300X: (a) PEV; (b) PEV/5CP; (c) PEV/10CP; (d) PEV/15CP; (e) PEV/5CP/PEgMA; (f) PEV/10CP/PEgMA; e (g) PEV/15CP/PEgMA.







Fonte: Autoria própria (2017).

É importante observar que, mesmo antes do intemperismo natural, a incorporação de carga na matriz polimérica comprometeu a capacidade da matriz de se deformar. O aumento da concentração de cortiça também foi responsável pela diminuição desta característica, como pode ser visto na superfície de fratura dos compósitos PEV/5CP (Figura 30b), PEV/15CP, PEV/5CP/PEgMA (Figura 29e) e PEV/15CP/PEgMA (Figura 30g). Resultados semelhantes foram relatados por Fernandes et al. (2013) em compósitos de polietileno/cortiça 1:1. Segundo estes autores, o sistema apresentou fratura frágil, resultado atribuído ao elevado volume de pó de cortiça. No presente trabalho, uma comparação de amostras do mesmo conteúdo de cortiça com e sem agente de acoplamento (Figura 30 b-e, c-f, d-g) indica que a incorporação de PEgMA aumentou a deformação do compósito, confirmando a eficácia da estratégia de adicionar um compatibilizante polar para melhorar a adesão interfacial (FERNANDES et al., 2010, 2011; FERNANDES; MANO; REIS, 2013).

Em geral, após o intemperismo natural, ocorreram significativas alterações na morfologia das amostras de PEV (Figura 29a), em especial logo após 45 dias de exposição para os dois períodos estudados. A superfície de fratura se evidenciou-se de forma degradada, com aparência rugosa e o aparecimento de descamações, sugerindo a existência de fraturas internas. Segundo Fabiyi et al. (2008), as fissuras podem ser causadas pela ruptura de cadeias poliméricas, resultantes de zonas poliméricas altamente cristalizadas, que racham e/ou diminuem de formas diferentes entre as seções de superfície e interior. Quando comparadas as imagens dos dois períodos de exposição foi possível perceber que o material exposto no período de temperaturas mais intensas apresentou uma degradação mais severa tanto em 45 quanto em 90 dias.

Nas microscopias apresentadas dos ecocompósitos, antes do processo de degradação abiótica, foi possível ver o alongamento do PEV entre as paredes celulares de cortiça (Figura 30 b), sugerindo boa interação entre as fases (FERNANDES et al., 2011). No entanto, apesar da boa afinidade, foram identificados alguns aglomerados (Figura 30 b, f, g) demonstrando baixa dispersão da carga em algumas regiões. Este comportamento pode ser atribuído ao processamento, que provavelmente não permitiu uma melhor dispersão da cortiça na matriz polimérica em função do baixo cisalhamento aplicado.

Após o intemperismo, as alterações na morfologia dos ecocompósitos variaram conforme período de ensaio e tempo de exposição. No primeiro semestre as descamações foram mais evidentes apenas com 90 dias (Figura 30 b/g - 2ª retirada), enquanto no segundo semestre houve surgimento de rugosidade da superfície da fratura logo após 45 dias (Figura 30 b/e - 3ª

retirada), evidenciado por descamações, identificadas também nas micrografias do polímero puro e sendo mais evidentes ao final do período de exposição e nas amostras sem compatibilizante (Figura 30 b/c/d 4ª retirada).

4.3.4. Desempenho mecânico dos ecocompósitos

Os resultados do desempenho mecânico da matriz e dos ecocompósitos estão resumidos na Tabela 13 e apresentados nas Figuras 31, 32, 33, 34.

Tabela 13 - (a) Módulo de elasticidade; (b) Tensão de ruptura; e (c) Tensão de escoamento do PEV e dos ecocompósitos com e sem compatibilizante

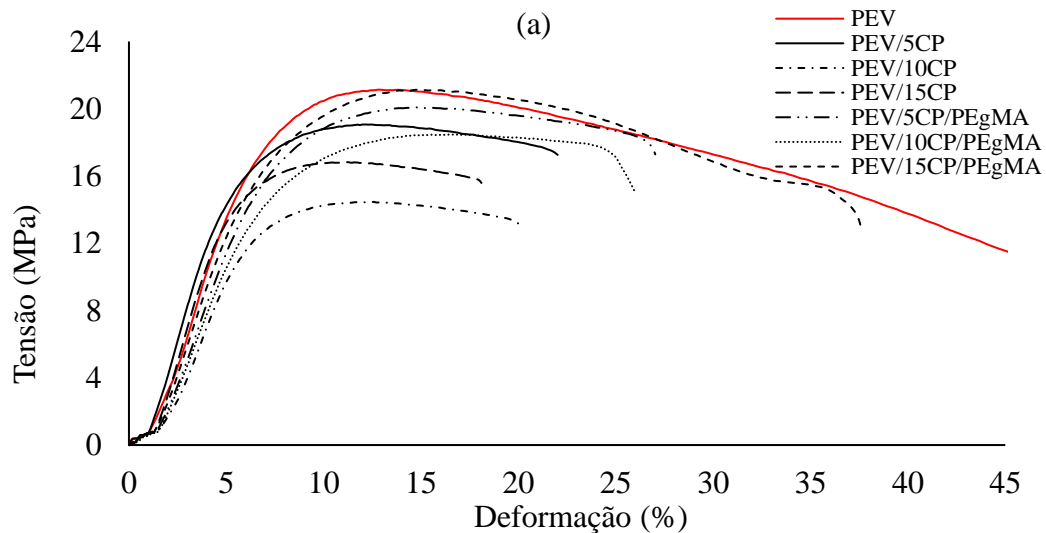
Amostras	Tempo de exposição (dias)	Período: 06/02/2017 a 07/05/2017			Período: 04/09/2017 e 03/12/2017		
		Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)
PEV	0	379,00 ± 12,32	4,19 ± 1,38	9,89 ± 0,65			
	45	420,68 ± 16,52	21,10 ± 1,60	11,20 ± 0,66	362,77 ± 25,60	17,93 ± 1,00	12,73 ± 0,96
	90	419,80 ± 11,48	14,60 ± 1,08	10,73 ± 0,67	359,17 ± 10,78	12,63 ± 1,00	9,50 ± 0,96
PEV/5CP	0	407,57 ± 21,07	16,52 ± 0,88	9,68 ± 0,17			
	45	401,92 ± 4,41	17,84 ± 1,06	10,48 ± 0,44	305,98 ± 1,13	16,80 ± 0,65	8,25 ± 1,29
	90	357,98 ± 21,23	18,40 ± 0,71	11,15 ± 0,48	321,80 ± 6,88	17,30 ± 0,17	10,13 ± 0,80
PEV/10CP	0	336,90 ± 29,27	11,27 ± 1,07	8,02 ± 0,56			
	45	319,82 ± 30,99	14,06 ± 1,24	8,44 ± 1,20	248,23 ± 5,09	12,30 ± 1,44	8,18 ± 1,17
	90	292,78 ± 2,39	14,03 ± 0,43	8,85 ± 0,55	297,78 ± 5,18	14,34 ± 0,82	7,16 ± 2,34
PEV/15CP	0	371,08 ± 28,84	13,58 ± 1,44	7,93 ± 0,73			
	45	376,38 ± 14,88	15,43 ± 0,75	9,55 ± 0,71	243,70 ± 2,68	14,07 ± 0,86	7,97 ± 1,68
	90	333,75 ± 27,94	14,85 ± 0,57	9,05 ± 0,46	309,72 ± 9,23	15,08 ± 0,82	9,50 ± 0,99
PEV/5CP/PEgMA	0	329,90 ± 8,47	11,82 ± 0,90	9,22 ± 0,68			
	45	304,35 ± 27,16	14,73 ± 1,65	10,80 ± 1,02	242,96 ± 8,06	16,16 ± 1,23	10,02 ± 1,10
	90	294,89 ± 25,64	15,64 ± 1,27	8,84 ± 0,82	297,57 ± 4,89	17,63 ± 1,16	9,40 ± 0,61
PEV/10CP/PEgMA	0	299,80 ± 22,54	13,03 ± 1,72	9,09 ± 0,62			
	45	310,55 ± 31,26	15,40 ± 0,69	10,07 ± 0,62	279,20 ± 17,87	16,10 ± 0,90	9,50 ± 1,47
	90	323,40 ± 35,52	17,55 ± 0,51	9,27 ± 0,93	293,73 ± 5,96	14,70 ± 0,78	8,43 ± 0,92
PEV/15CP/PEgMA	0	351,00 ± 15,43	10,00 ± 1,22	9,70 ± 0,47			
	45	320,03 ± 23,91	21,45 ± 0,35	11,17 ± 0,11	280,57 ± 1,40	12,00 ± 1,49	10,40 ± 0,60
	90	326,57 ± 6,04	18,73 ± 0,96	9,37 ± 0,57	315,93 ± 24,2	17,25 ± 2,81	8,98 ± 0,74

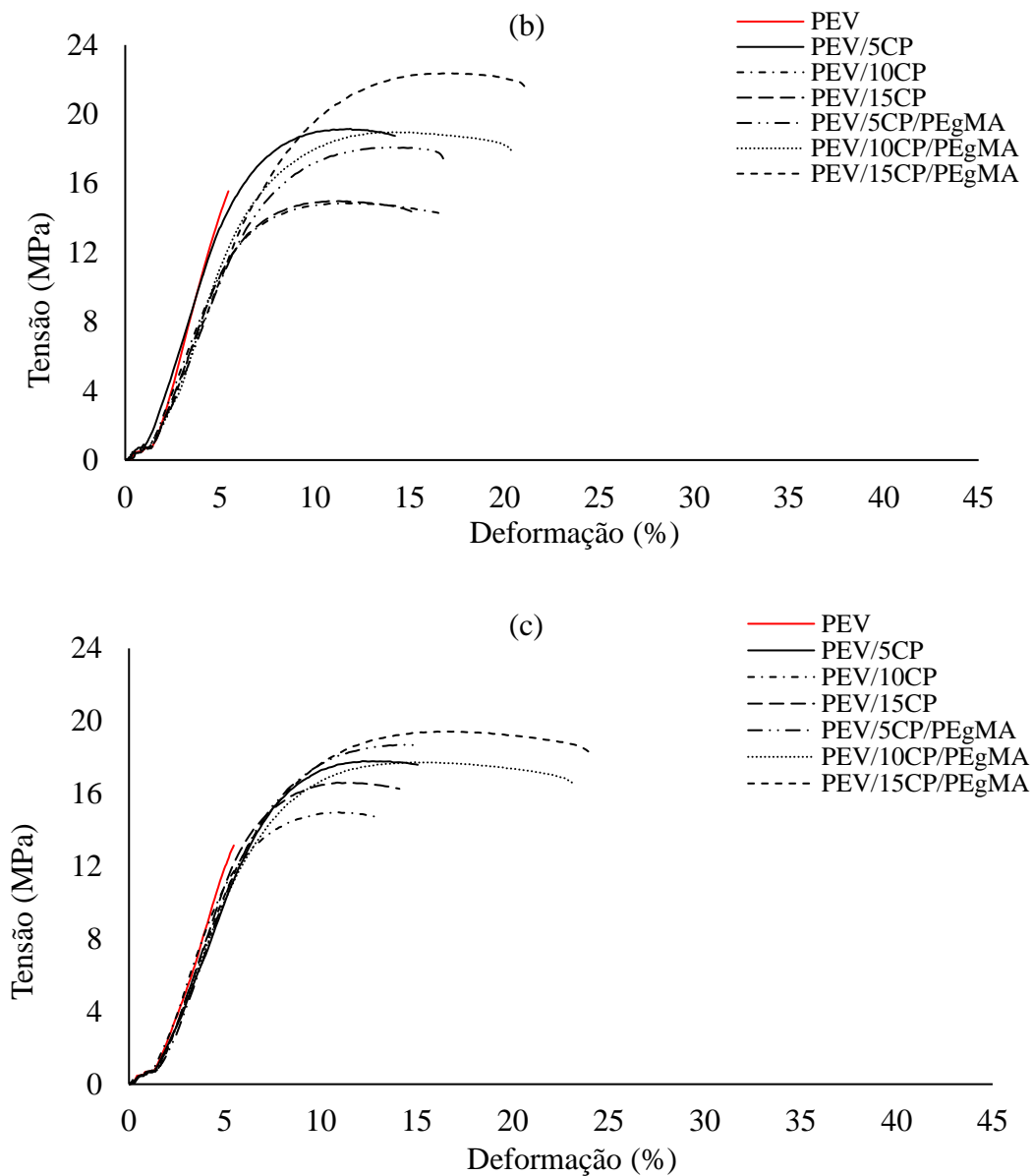
Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 31 apresenta as curvas tensão-deformação para os materiais não envelhecidos e após 90 dias de exposição no 1º e 2º períodos. Nos resultados encontrados para as amostras não envelhecidas foi possível verificar um perfil de deformação característico de material dúctil

para o polímero puro enquanto o dos compósitos são típicos de materiais de menor ductilidade. Os resultados indicaram ainda que a resistência à tração e a deformação máxima dos compósitos foram reduzidas com a incorporação da cortiça, em especial para os compósitos sem compatibilizante e com altos teores, PEV/10CP e PEV/15CP. Essa redução pode ser atribuída à incompatibilidade entre partículas de cortiça e a matriz polimérica. A falta de adesão entre as fases limita a transferência de carga entre elas, resultando em uma diminuição da resistência à tração, uma vez que a tensão não pode ser transferida pela matriz (BRITES et al., 2017; FERNANDES et al., 2014a). Outro fator que pode ter influenciado é o fato de a cortiça apresentar propriedades mecânicas mais baixas sob carga de tração quando comparadas com a matriz de polietileno, contribuindo para a diminuição da resistência à tração. Alguns autores sugerem a incorporação de agentes de acoplamento, por exemplo, polímeros funcionalizados contendo grupos anidrido maleico na composição para melhorar a adesão interfacial (FERNANDES et al., 2010; FERNANDES; MANO; REIS, 2013). Neste estudo a adição do PEgMA permitiu a recuperação da resistência à tração e deformação máxima, com destaque para as composições PEV/5CP/PEgMA e PEV/15CP/PEgMA, comprovando a eficiência do agente compatibilizante na melhoria da adesão entre as fases.

Figura 31 – Curvas Tensão-deformação do PEV e dos ecocompósitos: (a) antes do envelhecimento natural; (b) Após 90 dias do 1º período; (c) Após 90 dias do 2º período





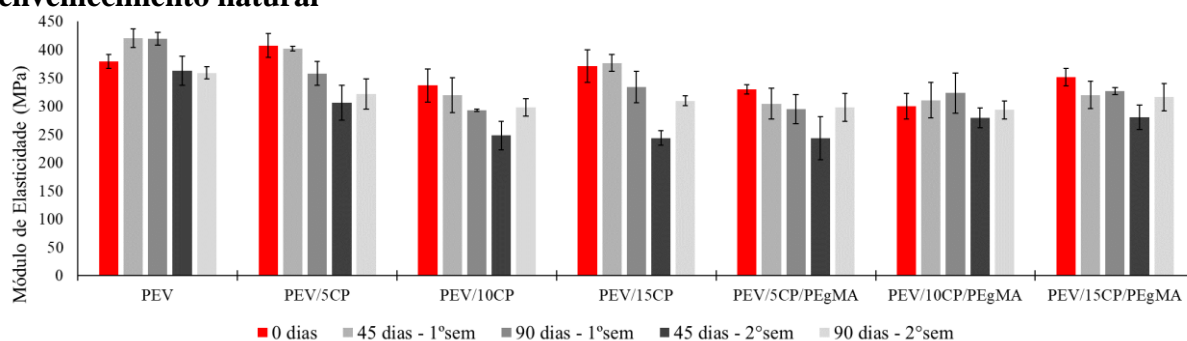
Fonte: Autoria própria (2017).

Nas curvas após envelhecimento foi possível perceber um comportamento típico de materiais com baixa ductilidade, tanto para a matriz quanto para os ecocompósitos, com redução da resistência à tração e deformação (Figura 31 b, c). Tal comportamento pôde ser observado por meio das imagens de MEV (Figura 30) em todas as composições, com ênfase para os compósitos não compatibilizadas, ao comparar a microscopia das amostras não expostas com a das expostas. Para as amostras retiradas ao final de 90 dias no primeiro semestre (Figura 31b) as curvas mostraram que a presença da cortiça e do compatibilizante foi fundamental para manutenção da resistência à tração, mas que em função da granulometria da carga, a diminuição da deformação não pôde ser evitada. O PEV apresentou redução intensa na capacidade de

deformação plástica enquanto os compósitos mantiveram, apesar da redução da capacidade de deformação. Os compósitos compatibilizados, PEV/15CP/PEgMA e PEV/10CP/PEgMA apresentaram maior resistência à tração e capacidade de deformação. Para as amostras retiradas ao final de 90 dias do período seco (Figura 31c), a perda de resistência a tração e deformação foi ainda maior do que quando comparado com os resultados obtidos para o período chuvoso, tanto para o PEV quanto para os ecocompósitos, no entanto, as amostras compatibilizadas e o PEV/5CP, apresentaram as menores perdas.

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam as propriedades de módulo de elasticidade, tensão de ruptura e tensão de escoamento da matriz e dos ecocompósitos antes e após a exposição ao intemperismo.

Figura 32 - Módulo de elasticidade do PEV e dos ecocompósitos antes e após ao envelhecimento natural



Fonte: Autoria própria (2017).

Analisando a Figura 32 e considerando as amostras não envelhecidas foi possível perceber que a incorporação da cortiça não influenciou significativamente no módulo de elasticidade dos compósitos, apresentando alterações discretas de aumento de 7,50% para as amostras PEV/5CP e redução de 11,1 % e 2,1 % para as amostras PEV/10CP e PEV/15CP, respectivamente, quando comparados à matriz PEV. Um comportamento semelhante foi observado por Fernandes et al. (2014a) e Brites et al. (2017) que, ao analisarem compósitos de cortiça/poliolefinas, identificaram uma melhoria na rigidez do material com a incorporação do reforço vegetal. Fernandes et al. (2014a) ao analisarem o desempenho mecânico de compósitos de Polipropileno/cortiça perceberam que houve aumento da rigidez do material com pequenas quantidades de cortiça (5 %) e redução dessa propriedade para maiores porcentagens de enchimento, tendo essa redução sido atribuída ao aumento da incompatibilidade intrínseca entre as fases. Neste trabalho, o uso do PEgMA não alterou significativamente os valores do módulo de elasticidade dos compósitos quando comparado às amostras não tratadas com o mesmo

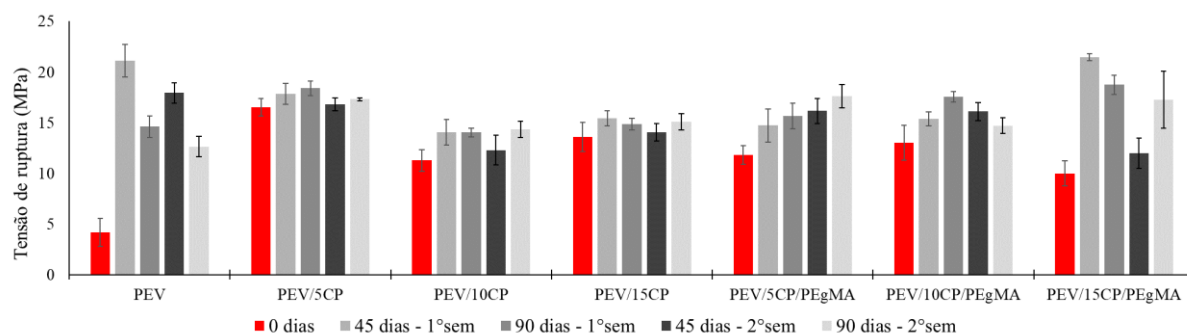
conteúdo de cortiça, exceto PEV/5CP/PEgMA, que apresentou valor reduzido em relação ao PEV/5CP.

Após a degradação abiótica, o módulo de elasticidade do PEV não mudou significativamente quando comparado ao polímero não exposto, o que é atribuído ao fato de o PEV ter uma porcentagem maior de fase cristalina (VISAKH; MARTINEZ, 2015), fase impermeável ao O₂ e H₂O, o que limita e desacelera as reações de degradação, pois as mesmas ocorrem predominantemente nas fases amorfas (JAKUBOWICZ, 2003; LUCAS et al., 2008; STARK; MATUANA; CLEMONS, 2004). Em relação aos ecocompósitos, observou-se claramente que o módulo de elasticidade da maioria dos compósitos sofreu redução, ocorrendo de uma forma mais discreta no 1º semestre e de forma intensa ao final de 45 dias do período seco, com redução de 25 % para PEV/5CP, 26 % para PEV/10CP, 34 % para PEV/15CP, 26 % para PEV/5CP/PEgMA e 20 % para PEV/15CP/PEgMA. A composição PEV/10CP/PEgMA apresentou a menor perda de rigidez, em torno de 7 %, quando comparada à amostra não envelhecida. Alguns estudos sugerem que parte dessa perda de módulo pode ser atribuída ao aparecimento de rachaduras na superfície devido à fotodegradação, que promove uma diminuição da ligação interfacial entre a cortiça e a matriz polimérica e, conseqüentemente, a fragilização do material (BADJI et al., 2017; YAKIMETS; LAI; GUIGON, 2004). Neste estudo, o aparecimento de fissuras na superfície das amostras expostas é confirmado por imagens de microscopia óptica apresentadas anteriormente na Figura 29, na qual é perceptível que as condições climáticas e intempéries do segundo semestre ocasionaram alterações mais agravantes que a do primeiro semestre, o que explica a maior perda dessa propriedade para as amostras expostas de setembro a novembro. Os resultados encontrados no final de 90 dias na segunda fase de exposição apontaram uma tendência de recuperação do módulo, que pode estar associado a um processo de cristalização química, no qual os radicais formados por quebras de cadeias moleculares na fase amorfa na superfície da amostra durante a degradação são recombinados (YAKIMETS; LAI; GUIGON, 2004).

Os dados de tensão de ruptura exibidos na Figura 33 demonstraram claramente os efeitos da adição de cortiça nessa propriedade. Antes do envelhecimento natural, o valor mais alto para essa propriedade foi obtido com o ecocompósito PEV/5CP, que se apresentou em torno de 122-165 % maior que todos os outros sistemas desenvolvidos. Com alto teor de polímeros, a cortiça pôde ser totalmente encapsulada pela matriz, o que auxilia a dispersar as partículas de reforço, melhorando a distribuição da tensão e conseqüentemente aumentando a tensão de ruptura (RATANAWILAI; TANEERAT, 2018). Ao avaliar a ação do PEgMA, comparando amostras

de mesmo teor de cortiça, foi observado que os valores dessa propriedade foram semelhantes, com exceção da amostra PEV/5CP/PEgMA, que mostrou uma diminuição de 28 % em comparação com a amostra PEV/5CP. Alterações dessa propriedade com o conteúdo de cortiça em compósitos tratados ou não tratados podem ser parcialmente atribuídas à falta de homogeneidade das amostras durante o processamento, o que causou baixa transferência de matriz quando a carga é aplicada.

Figura 33 – Tensão de ruptura do PEV e dos ecocompósitos antes e após ao envelhecimento natural



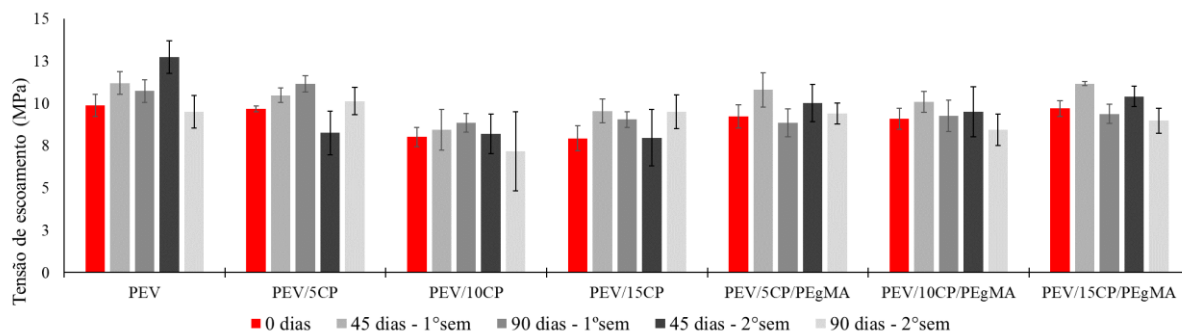
Fonte: Autoria própria (2017).

Após os primeiros 45 dias de intemperismo natural, tanto para o primeiro como para o segundo semestre, as amostras de PEV mostraram um aumento nessa propriedade, seguido de uma redução no final de 90 dias. Os resultados indicaram um comportamento menos dúctil da amostra degradada, o que requer menor força de ruptura. Esse comportamento pode ser verificado nas imagens de MEV (Figura 30a), nas quais as superfícies degradadas possuem aparência áspera e escamosa, sugerindo a existência de fraturas internas.

Os valores de tensão de ruptura dos ecocompósitos não compatibilizados não sofreram alterações significativas com o envelhecimento natural quando comparados com amostras compatibilizadas de composição equivalente. Para as amostras compatibilizadas houve um crescimento nessa propriedade logo após 45 dias de exposição, o que pode ser justificado por um possível processo de cristalização secundária, induzido por cadeias macromoleculares curtas resultantes de uma cisão de cadeia na fase amorfa do polímero durante o intemperismo por UV (FAYOLLE et al., 2008).

A mudança no comportamento mecânico dos ecocompósitos considerando o teor de carga, a adição de agente de acoplamento e o intemperismo natural também foi investigada por meio da Tensão de escoamento, como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Tensão de escoamento do PEV e dos ecocompósitos antes e após ao envelhecimento natural



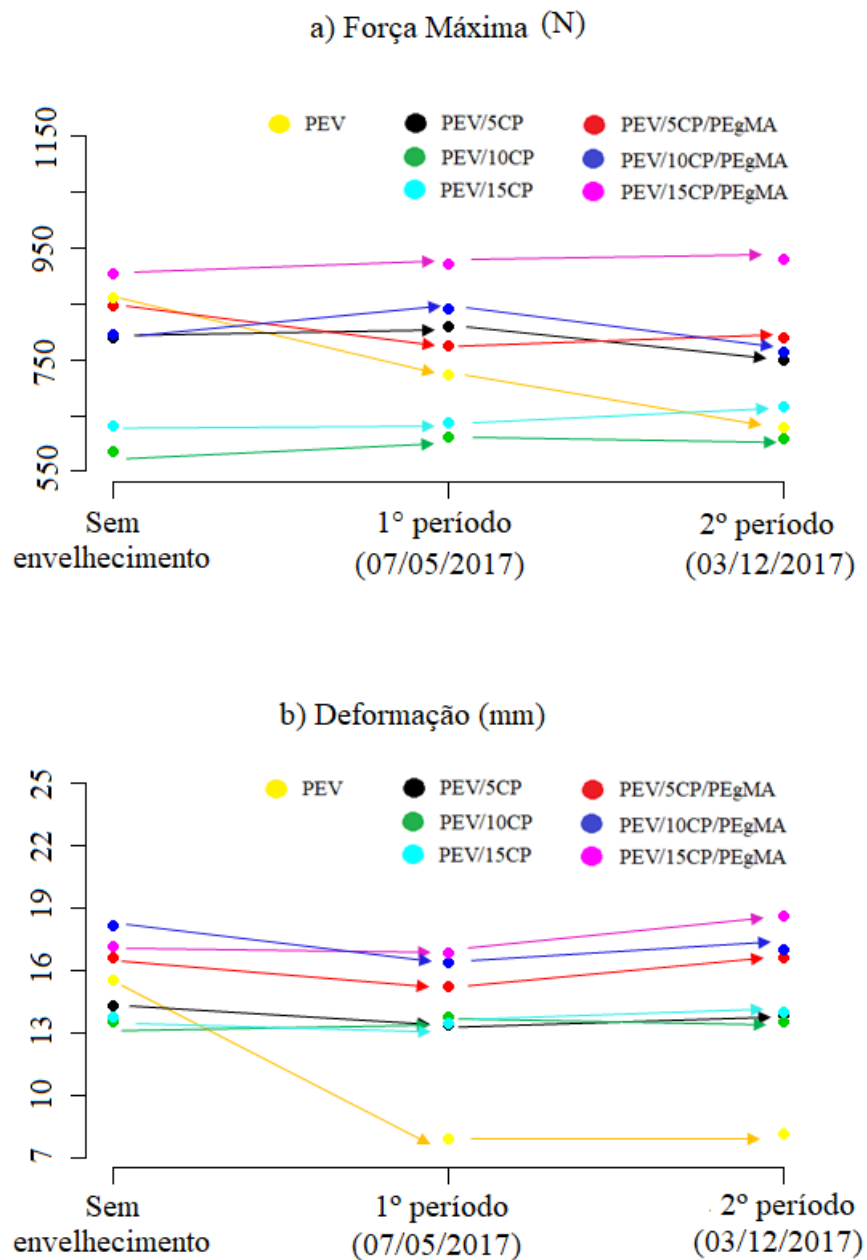
Fonte: Autoria própria (2017).

Antes da exposição, quando comparados ao PEV, os resultados indicaram valores de tensão de escoamento similares para PEV/5CP e decréscimos de 19 % e 20 % para PEV/10CP e PEV/15CP, respectivamente, sendo justificados pela atuação das partículas de cortiça como possíveis concentradores de tensão, acelerando a propagação de fissuras (ESSABIR et al., 2013a, 2013b, 2016). As imagens de MEV comprovam essa alteração, visto que é perceptível que os compósitos com 5 % de cortiça apresentaram maior escoamento em relação aos compósitos com 15 % (Figura 30 b-d; e-g). A adição do PEgMA eleva a tensão de escoamento dos sistemas com maiores concentrações de cortiça a medida que aumenta a adesão interfacial melhorando a transferência de esforço para as partículas e promovendo uma distribuição eficiente da tensão aplicada, mantendo assim valores de tensão de escoamento similares ao polímero puro. Após o envelhecimento natural, os resultados não apresentaram alterações significativas dessa propriedade, o que comprovou que a tensão máxima que os ecocompósitos suportaram não foi influenciada pelo intemperismo no período proposto de 90 dias, apresentando dessa forma, valores de tensão de escoamento similares aos dos ecocompósitos, com e sem compatibilizante.

4.3.5. Análise Estatística

Os gráficos de dispersão permitiram analisar as principais propriedades mecânicas encontradas para as amostras não envelhecidas e envelhecidas a fim de sugerir qual a composição se comportou mais estável mecanicamente antes e após o processo de degradação abiótica. As propriedades que sofreram maiores alterações ao longo dos períodos de exposição foram estudadas: força máxima e deformação. A Figura 35 apresenta as variações dessas propriedades ao longo do processo de degradação abiótica.

Figura 35 – Dispersão da média da (a) Força Máxima e (b) Deformação das amostras antes e ao final de 90 dias de exposição.



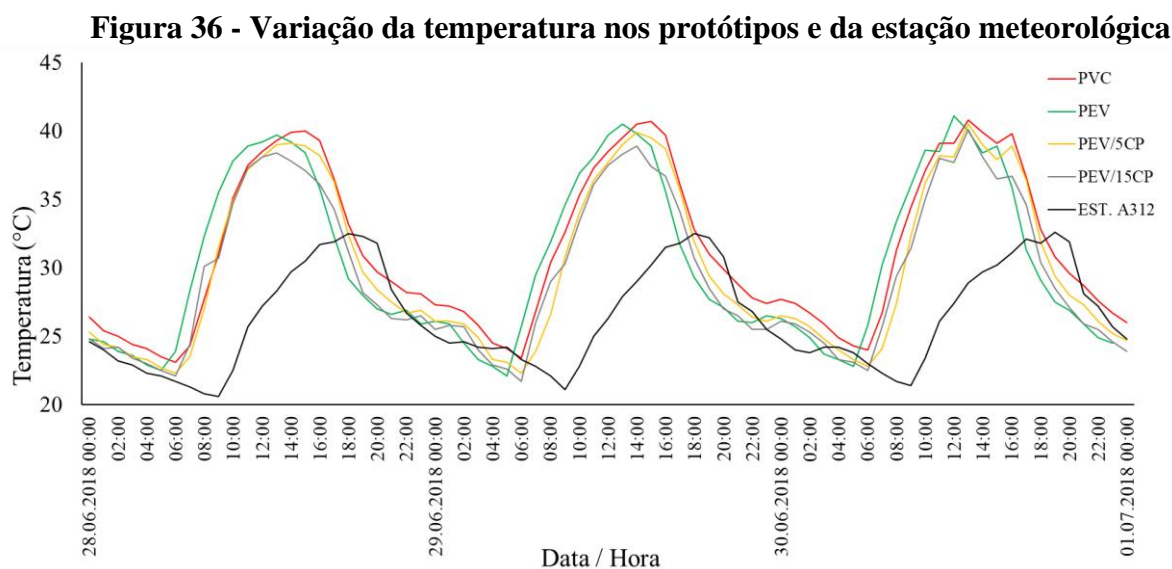
Fonte: LCE – Laboratório de Colaboração Estatística da Universidade Federal do Piauí– UFPI (2019).

A Figura 35 comprovou os resultados das curvas Tensão-deformação apresentadas na Figura 31. Anterior ao processo de intemperismo foi observado que a incorporação da cortiça em teores maiores (10 e 15%) foi responsável por fragilizar o material e pela diminuição da capacidade de deformação quando submetido ao ensaio de tração. O compósito PEV/5CP apresentou a deformação mais próxima do PEV e o compatibilizante PEgMA melhorou a

incompatibilidade entre as fases aumentando a capacidade de deformação e consequentemente os valores de força máxima. Após o intemperismo, o PEV apresentou perda de resistência sendo mais significativa no período considerado de temperaturas elevadas, e os compósitos compatibilizados apresentaram bom desempenho mesmo após a exposição nos dois períodos. O destaque é dado ao PEV/15CP/PEgMA que apresentou maior valor de força máxima e de capacidade de deformação, e ainda valores similares antes e após do período de degradação abiótica. Os compósitos sem PEgMA apresentaram menores valores dessas propriedades, no entanto, apresentaram-se constantes nas condições estudadas de envelhecimento. Em geral, pode-se afirmar que o período de exposição de 90 dias não impactou significativamente na perda das propriedades mecânicas dos compósitos quando comparados ao PEV.

4.4. Proposta de aplicação dos ecocompósitos

O desempenho térmico dos protótipos foi analisado e os resultados podem ser observados na Figura 36, que apresenta a variação dos valores de temperaturas tanto interna dos protótipos quanto da temperatura externa medida pela estação meteorológica.



Fonte: Autoria própria (2018).

A análise dos resultados obtidos aponta que todas as composições apresentaram um comportamento homogêneo durante o período estudado. O protótipo com placa de PVC apresentou as maiores temperaturas internas, tanto nos horários de temperaturas mais altas quanto para as temperaturas menores. O PEV apresentou temperaturas menores quando comparadas ao PVC e as placas de ecocompósitos apresentaram os menores valores, com

destaque para o protótipo com maior teor de cortiça, PEV/15CP. No geral, esse resultado representou uma redução de 3,44 % ou 1,4 °C da temperatura interna. As temperaturas apresentadas com as placas de ecocompósitos podem ser justificadas pela baixa capacidade de transferência de calor da cortiça pelos seguintes motivos: a fração sólida é baixa; o gás contido nas células tem uma baixa condutividade; as células são pequenas, o que elimina a convecção de gás; a radiação é reduzida através da absorção e reflexão repetidas nas numerosas paredes celulares (PEREIRA, 2007). A Tabela 14 apresenta as temperaturas máximas encontradas em cada modelo.

Tabela 14 – Temperaturas máximas registradas no ambiente e nos protótipos

Condição	Temperatura máxima (°C)		
	28/06/2018	29/06/2018	30/06/2018
EST. A312	32,5	32,5	32,6
PVC	40,3	40,9	40,8
PEV	39,7	40,9	41,1
PEV/5CP	39,3	40,1	40,5
PEV/15CP	38,6	39,1	40,1

Fonte: Autoria própria (2018).

Ao comparar com os dados da estação meteorológica A312 verifica-se que as temperaturas externas são sempre inferiores aos dos protótipos, o que significa que o uso das placas de ecocompósitos diminui a temperatura interna, mas ainda não é suficiente para evitar o aquecimento interno por radiação térmica. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos e Silveira (2013) ao analisar o desempenho térmico de lajes expostas à radiação solar em Teresina-PI. Os autores construíram protótipos com paredes em alvenaria, rebocados externamente, cobertos com lajes de concreto e concreto/EPS (2 e 3 cm); e mediram o desempenho térmico por um período de 48h na superfície das lajes por meio de termopares a fim de comparar com dados de estação meteorológica. Os resultados apresentaram temperaturas menos elevadas nas lajes com EPS, com 3 e 2 cm, respectivamente, no entanto, essas temperaturas foram mais elevadas que a do ambiente externo.

Os resultados indicaram também que o aumento da temperatura interna ocorre rapidamente no início da manhã em um processo que dura aproximadamente 6 horas, entre 6h30min e 12h30min, quando a radiação solar absorvida pelas telhas é transmitida para o interior apesar do uso das placas.

Por fim, pode-se afirmar que os ecocompósitos desenvolvidos podem ser aplicados em forros como uma alternativa sustentável, melhorando o conforto térmico, diminuindo as condições insalubres dos trabalhadores e podendo reduzir os gastos com refrigeração mecânica.

Entre outras vantagens do material proposto estão: material pode ser reaproveitado ou reciclado, é de fácil montagem e limpeza, apresenta bom desempenho acústico em baixas frequências, dispensa pintura, além de ser um produto ecológico. Entre as desvantagens encontradas pode-se citar a coloração escura, que exige iluminação interna em maior frequência e o processo de aquisição da cortiça em outros estados, visto que não é um produto encontrado no mercado regional.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram desenvolvidos ecocompósitos de polietileno verde de alta densidade (PEV), polietileno funcionalizado com anidrido maleico (PEgMA) e cortiça em pó (CP) como material de reforço. Os ecocompósitos apresentaram bom acabamento superficial e alteração da pigmentação original do polímero devido ao aumento da carga. A incorporação do agente de acoplamento foi responsável pelo aumento da intensidade do brilho e pelo escurecimento da matriz.

A análise do desempenho térmico confirmou que a cortiça é termicamente estável a temperaturas de processamento de compósitos poliméricos e a degradação térmica das amostras de polímeros e dos ecocompósitos ocorreu em apenas um estágio de decomposição. Os compósitos exibiram estabilidade térmica um pouco menor que o PEV devido à incorporação e aumento do conteúdo da carga vegetal no material, no entanto, os valores se apresentaram dentro da faixa de temperatura de processamento.

Os valores de coeficiente de absorção sonora indicaram que os ecocompósitos são bons absorvedores de som em frequências baixas e médias, principalmente com o aumento do teor de cortiça. A incorporação do PEgMA aumentou a adesão entre as fases reduzindo a capacidade de absorção sonora dos ecocompósitos.

O envelhecimento causado pelo intemperismo natural promoveu algumas mudanças estéticas nos ecocompósitos, como clareamento de superfície em ambos os períodos e até o surgimento de fissuras após exposição das amostras no período mais seco. A MO indicou que as partículas de carga foram bem encapsuladas pela matriz polimérica, não sendo observadas partículas expostas de cortiça na superfície dos compósitos. As imagens MEV das superfícies de fratura confirmaram a presença de fraturas com maior intensidade para o período seco e nas amostras sem compatibilizante.

As propriedades de tração dos materiais investigados foram afetadas pela degradação abiótica, o que levou a uma redução da resistência à tração e da deformação elástica dos ecocompósitos. No entanto, o PEgMA foi fundamental para manutenção da resistência à tração após o envelhecimento natural apesar do material se tornar menos dúctil. O módulo de elasticidade da maioria dos compósitos sofreu redução, ocorrendo de uma forma menos significativa no período chuvoso e de forma intensa ao final de 45 dias do período seco. Os valores de tensão de ruptura dos ecocompósitos não compatibilizados não mudaram significativamente com o envelhecimento natural, quando comparados com amostras

compatibilizadas de composição equivalente. Os resultados de tensão de escoamento não variaram significativamente com o tempo. A compatibilização foi eficaz na promoção e melhor manutenção das propriedades mecânicas dos ecocompósitos.

Em geral, os resultados obtidos foram satisfatórios para aplicações externas do ecocompósito PEV/15CP/PEgMA no intervalo de intemperismo proposto, o que indica possível uso em construções temporárias, bem como da amostra PEV/15CP para aplicações internas como revestimento para isolamento térmico e acústico.

Por fim, o material estudado é promissor para aplicação na construção civil, apresentando estética agradável, boa estabilidade térmica, bom desempenho acústico quando não compatibilizado e as melhores propriedades mecânicas quando compatibilizado.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a toxicidade dos ecocompósitos;
- Avaliar a inflamabilidade dos ecocompósitos;
- Realizar ensaio de resistência a fungos dos ecocompósitos;
- Avaliar a molhabilidade da superfície dos ecocompósitos por meio do ângulo de contato;
- Realizar teste de absorção de água para a matriz polimérica pura e seus ecocompósitos, antes e após a exposição à degradação abiótica;
 - Averiguar o envelhecimento acelerado dos ecocompósitos e comparar os resultados com os de exposição ao envelhecimento natural;
 - Fazer o acompanhamento da degradação abiótica por outras técnicas como ensaio de dureza, ensaio de flexão, DSC e DRX e FTIR; e
 - Substituir o polietileno de alta densidade verde por sobras de PEAD utilizados em obras da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, F. et al. Effect of surface treatment in cork reinforced composites. **Journal of Polymer Research - J POLYM RES**, v. 17, p. 519–528, 1 jul. 2010.
- ABDUL MAJID, R.; ISMAIL, H.; MAT TAIB, R. Effects of Polyethylene Grafted Maleic Anhydride on the Mechanical, Morphological, and Swelling Properties of Poly (Vinyl Chloride) / Epoxidized Natural Rubber / Kenaf Core Powder Composites. **Bioresources**, v. 9, p. 7059, 8 out. 2014.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - **Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – **Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABIPLAST (2015). Perfil 2015. **Disponível em:** <http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2015.pdf> Acesso em: 20 jun. 2017.
- ABIPLAST (2016). Preview Perfil 2016. **Disponível em:** <http://file.abiplast.org.br/file/noticia /2017/ folder_preview_perfil2016_separado.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- AL-HOMOUD, D. M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and Environment**, v. 40, n. 3, p. 353–366, 2005.
- ALVES, T. S. **Efeito do tipo de polipropileno e das condições de processamento na formação e propriedades de compósitos com argila organofílica**. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- AMMALA, A. et al. An overview of degradable and biodegradable polyolefins. **Progress in Polymer Science**, v. 36, n. 8, p. 1015–1049, 1 ago. 2011.
- AMORIM REVESTIMENTOS, S. A. Patente **PT 106468**. 2012.

AMORIM COMPCORK, LDA. **WO 2017164757 A1**. 2017.

ANDRADE, E. C.; NÓBREGA, M. M. Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados com Fibras de Babaçu *Orrbignya Speciosa*: Caracterização Mecânica. **In 10º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Foz do Iguaçu, PR, 2009.

ANDRADY, A. L. et al. Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 46, n. 1, p. 96–103, 1998.

ARENAS, J.; CROCKER, M. Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials. **Sound & vibration**, v. 44, p. 12–17, 1 jul. 2010.

BADJI, C. et al. Influence of weathering on visual and surface aspect of wood plastic composites: Correlation approach with mechanical properties and microstructure. **Polymer Degradation and Stability**, v. 137, p. 162–172, 2017.

BAJWA, D. S.; BAJWA, S. G.; HOLT, G. A. Impact of biofibers and coupling agents on the weathering characteristics of composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 120, p. 212–219, 2015.

BAKATOVICH, A.; DAVYDENKO, N.; GASPAR, F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. **Energy and Buildings**, v. 180, p. 72–82, 2018.

BERARDI, U.; IANNACE, G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. **Building and Environment**, v. 94, p.840-852, 30 maio 2015.

BERTOTI, A. R.; LUPORINI, S.; ESPERIDIÃO, M. C. A. Effects of acetylation in vapor phase and mercerization on the properties of sugarcane fibers. **Carbohydrate Polymers**, v. 77, n. 1, p. 20–24, 22 maio 2009.

BILÉSIMO, T. L.; RAMPINELLI, G. A.; MARCELINO, R. **Medição e análise do desempenho termohigrométrico de uma edificação com estratégias bioclimáticas**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado 2018

BINICI, H.; AKSOGAN, O. Engineering properties of insulation material made with cotton waste and fly ash. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 17, n. 1, p. 157–162, 2015.

BIRON, M. The plastics industry: Economic overview. **Thermoplastics and Thermoplastic Composites**, p. 33–153, 1 jan. 2007.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composities Reinforced with Cellulose Based Fibers. **Progress**

in **Polymer Science**, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1996.

BLEDZKI, A. K.; MAMUN, A. A.; VOLK, J. Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties. **Composites Science and Technology**, v. 70, n. 5, p. 840–846, 2010.

BLEDZKI, A. K.; REIHMANE, S.; GASSAN, J. Thermoplastics Reinforced with Wood Fillers: A Literature Review. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 37, n. 4, p. 451–468, 1 nov. 1998.

BORONAT, T. et al. Development of a biocomposite based on green polyethylene biopolymer and eggshell. **Materials and Design**, v. 68, p. 177–185, 2015.

BRASKEM. Disponível em: < http://www.fgv.br/cev/rsnovarejo/arquivos/forum_varejo/AntonioMorschbacker.pdf> Acesso em: 20 jun. 2017.

BRANDALISE, R. N. **Avaliação da degradação biótica e abiótica da mistura polimérica de polietileno de alta densidade com o poli (álcool vinílico)**. 2008. 161f. Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

BRÍGIDA, A. I. S. et al. Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n. 4, p. 832–838, 2010.

BRITES, F. et al. Cork Plastic Composite Optimization for 3D Printing Applications. **Procedia Manufacturing**, v. 12, p. 156–165, 2017.

BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, p. 127–139, 2011.

BUJOREANU, C. et al. Experimental and theoretical considerations on sound absorption performance of waste materials including the effect of backing plates. **Applied Acoustics**, v. 119, p. 88-93, 29 dez. 2017.

CAMPBELL, F. C. (2010). **Structural Composite Materials**. (1th ed.) ASM International.

CAO, L. et al. Porous materials for sound absorption. **Composites Communications**, v. 10, p. 25-35, 06 jun. 2018.

CARVALHO, L. H. DE; CAVALCANTI, W. S. Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. **Polímeros**, v. 16, n. 1, p. 33–37, mar. 2006.

CARVALHO NETO, A. G. V. et al. Development of Composites Based on Recycled Polyethylene/Sugarcane Bagasse Fibers. **Polymer Composites**, v. 35 (4), p. 768-774, 1 maio

2014.

CASTRO, D. O.; RUVOLLO-FILHO, A.; FROLLINI, E. Materials prepared from biopolyethylene and curaua fibers: Composites from biomass. **Polymer Testing**, v. 31, n. 7, p. 880–888, 31 maio 2012.

CERQUEIRA, E. F.; BAPTISTA, C. A. R. P.; MULINARI, D. R. Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 2046–2051, 2011.

CHERKI, A. et al. Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 202–209, 2014.

COUSINS, K. Polymers in building and construction : a **Rapra Market Report**. v. 13, n. 10, p. 116, 2002.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. DE. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, v. 13, n. 1, p. 01–13, jan. 2003.

CRAIG, I. H.; WHITE, J. R. Crystallization and chemi-crystallization of recycled photodegraded polyethylenes. **Polymer Engineering and Science**, v. 45, n. 4, p. 588–595, 2005.

DE OLIVEIRA, A. G. et al. Composites based on green high-density polyethylene, polylactide and nanosized calcium carbonate: Effect of the processing parameter and blend composition. **Materials Chemistry and Physics**, v. 181, p. 344–351, 15 set. 2016.

DE PAOLI, M. A. Degradação e estabilização de polímeros. (2ª.ed.) São Paulo: Artliber, 2009.

DHAKAL, H. N. et al. The low velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. **Composite Structures**, v. 81, n. 4, p. 559–567, 1 dez. 2007.

DOAK, K. W. Ethylene Polymers. In Mark, H. M., Bikales, N. M., Overberg, C. G., Menges, G., **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**, John-Wiley e Sons, New York, Volume 6 (1986).

DOAN, T.-T.-L.; GAO, S.-L.; MÄDER, E. Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification. **Composites Science and Technology**, v. 66, n. 7–8, p. 952–963, 1 jun. 2006.

DONG, Y. et al. Polylactic acid (PLA) biocomposites reinforced with coir fibres: Evaluation of mechanical performance and multifunctional properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 63, p. 76–84, 2014.

- ELENI, P. N. et al. Mechanical behavior of facial prosthetic elastomers after outdoor weathering. **Dental Materials**, v. 25, n. 12, p. 1493–1502, 1 dez. 2009.
- ESSABIR, H. et al. Mechanical and thermal properties of bio-composites based on polypropylene reinforced with Nut-shells of Argan particles. **Materials and Design**, v. 49, p. 442–448, 2013a.
- ESSABIR, H. et al. Bio-composites based on polypropylene reinforced with Almond Shells particles: Mechanical and thermal properties. **Materials & Design**, v. 51, p. 225–230, 1 out. 2013b.
- ESSABIR, H. et al. Biocomposites based on Argan nut shell and a polymer matrix: Effect of filler content and coupling agent. **Carbohydrate Polymers**, v. 143, p. 70–83, 2016.
- FABIYI, J. S. et al. Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 8, p. 1405–1414, 1 ago. 2008.
- FALK, R. H.; LUNDIN, T.; FELTON, C. The effect of weathering on wood-thermoplastic composites intend for outdoor applications. **Proceedings, durability and disaster mitigation in housing. Madison, WI: Forest Products Society**, p. 175-179, 2000.
- FAYOLLE, B. et al. Embrittlement of polypropylene fibre during thermal oxidation. **Journal of Materials Science**, v. 43, n. 3, p. 1026–1032, 2008.
- FEIST, W. C.; HON, D. N.-S. Chemistry of Weathering and Protection. In: **The Chemistry of Solid Wood**. Advances in Chemistry. [s.l.] American Chemical Society, 1984. v. 207p. 11–401.
- FERNANDES, E. M. et al. Cork based composites using polyolefin's as matrix: Morphology and mechanical performance. **Composites Science and Technology**, v. 70, n. 16, p. 2310–2318, 2010.
- FERNANDES, E. M. et al. Properties of new cork–polymer composites: Advantages and drawbacks as compared with commercially available fibreboard materials. **Composite Structures**, jun. 2011.
- FERNANDES, E. M. et al. Novel cork-polymer composites reinforced with short natural coconut fibres: Effect of fibre loading and coupling agent addition. **Composites Science and Technology**, v. 78, p. 56–62, 2013.
- FERNANDES, E. M. et al. Polypropylene-based cork-polymer composites: Processing

parameters and properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 66, p. 210–223, 2014a.

FERNANDES, E. M. et al. Functionalized cork-polymer composites (CPC) by reactive extrusion using suberin and lignin from cork as coupling agents. **Composites Part B: Engineering**, v. 67, p. 371–380, 2014b.

FERNANDES, E. M.; MANO, J. F.; REIS, R. L. Hybrid cork-polymer composites containing sisal fibre: Morphology, effect of the fibre treatment on the mechanical properties and tensile failure prediction. **Composite Structures**, v. 105, p. 153–162, 2013.

FERREIRA, F. G. D. **Fotodegradação e efeito combinado da radiação gama/biodegradação em blendas polietileno/amido**. Dissertação de mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal do Pernambuco, 2007.

FLORENTINO, W. M. et al. Biocompósitos de poliuretano reforçados com fibras de coco verde. **Cadernos UniFOA**, v. 17, p. 11–16, 2011.

GANDINI, A.; BELGACEM, M. N. Chapter 1 - The State of the Art. In: BELGACEM, M. N.; GANDINI **POLYMERS AND COMPOSITES FROM RENEWABLE RESOURCES**, A. B. T.-M. (Eds.). . Amsterdam: Elsevier, 2008. p. 1–16.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made - Supplementary Information. **Science Advances**, n. July, p. 25–29, 2017.

GIL, L. Capítulo 13 - Cortiça. **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção, ISTPress**, 2012.

Gil, L. **Cortiça: Produção, Tecnologia e Aplicação**. (Ed INETI). Portugal: Lisboa, 1998.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1997.

GRUM, J. **Book Review: Plastics Additives Handbook**, 5th Edition by H. Zweifel. [s.l: s.n.]. v. 3

HALLIWELL, S. **Polymers in building and construction** (13^a ed.). Rapra Review Reports, 2002.

HUNG, K. C.; CHEN, Y. L.; WU, J. H. Natural weathering properties of acetylated bamboo plastic composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 97, n. 9, p. 1680–1685, 2012.

JACQUES, L. F. E. Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings. **Progress in Polymer Science**, v. 25, n. 9, p. 1337–1362, 2000.

- JAKUBOWICZ, I. Evaluation of degradability of biodegradable polyethylene (PE). **Polymer Degradation and Stability**, v. 80, n. 1, p. 39–43, 2003.
- JOSE, J. P. et al. Part One Introduction to Polymer Composites. **Polymer Composites**, v. 1, p. 1–16, 2012.
- JUNIOR, O. G. DA S. et al. Processing and characterization of polyethylene/starch/curauá composites: Potential for application as thermal insulated coating. **Journal of Building Engineering**, v. 11, p. 178–186, 2017.
- K. MALLICK, P. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, And Design**. [s.l: s.n.]. v. 2
- KARAKY, H. et al. Characterization of beet-pulp fiber reinforced potato starch biopolymer composites for building applications. **Construction and Building Materials**, 2019.
- KATANGUR, P.; PATRA, P. K.; WARNER, S. B. Nanostructured ultraviolet resistant polymer coatings. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, n. 10, p. 2437–2442, 1 out. 2006.
- KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. 2ª edição, Taylor & Francis, 2006.
- KEENER, T. J.; STUART, R. K.; BROWN, T. K. Maleated coupling agents for natural fibre composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 3, p. 357–362, 2004.
- KIM, B.-J. et al. Sound Transmission Properties of Mineral-filled High-Density Polyethylene (HDPE) and Wood-HDPE Composites. **BioResources**, v. 10, 3 nov. 2015.
- KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N.; ADACHI, A. The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. **High Performance Structures and Materials**, v. 4, p. 157–166, 1 jan. 2002.
- KUCIEL, S.; JAKUBOWSKA, P.; KUŹNIAR, P. A study on the mechanical properties and the influence of water uptake and temperature on biocomposites based on polyethylene from renewable sources. **Composites Part B: Engineering**, v. 64, p. 72–77, 2014.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2a edição. São Paulo: ProLivros, 2004.
- LIMA, A. G. T. **Caracterização do isolamento acústico de polímeros reciclados adicionados de fibras de bambu utilizando análise do coeficiente de absorção sonora em tubos de impedância**. 2016. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos

Materiais), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2016.

LUCAS, N. et al. Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques - A review. **Chemosphere**, v. 73, n. 4, p. 429–442, 2008.

LUNDIN, T.; FALK, R. H.; FELTON, C. Accelerated Weathering of Natural Fiber-Thermoplastic Composites : Effects of Ultraviolet Exposure on Bending Strength and Stiffness. **6th International conference on Woodfiber-Plastic Composites**, p. 87–94, 2001.

MAMTAZ, H.; FOULADI, M.; AL-ATABI, MUSHTAK. NAMASIVAYAM, S. Acoustic Absorption of Natural Fiber Composites. **Journal of Engineering**, v. 2016, p. 1–11, 2016.

MARINELLI, A. L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 92–99, jun. 2008.

MARTÍNEZ URREAGA, J. et al. Sustainable eco-composites obtained from agricultural and urban waste plastic blends and residual cellulose fibers. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1–8, 2015.

MATUANA, L. M.; JIN, S.; STARK, N. M. Ultraviolet weathering of HDPE/wood-flour composites coextruded with a clear HDPE cap layer. **Polymer Degradation and Stability**, v. 96, n. 1, p. 97–106, 1 jan. 2011.

MERCOLA. Disponível em: <http://articles.mercola.com/sites/articles/archive/2008/12/16/my-one-hour-vitamin-d-lecture-to-clear-up-all-your-confusion-on-this-vital-nutrient.aspx>, 2008.

MOHR, W. **EP 1 634 696 A1**. 2006.

MORANDIM-GIANNETTI, A. A. et al. Lignin as additive in polypropylene/coir composites: Thermal, mechanical and morphological properties. **Carbohydrate Polymers**, v. 87, n. 4, p. 2563–2568, 2012.

MOTAUNG, T. E.; ANANDJIWALA, R. D. Effect of alkali and acid treatment on thermal degradation kinetics of sugar cane bagasse. **Industrial Crops and Products**, v. 74, p. 472–477, 15 nov. 2015.

MUASHER, M.; SAIN, M. The efficacy of photostabilizers on the color change of wood filled plastic composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, n. 5, p. 1156–1165, 2006.

NDIAYE, D. et al. Durability of wood polymer composites: Part 1. Influence of wood on the

photochemical properties. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 13, p. 2779–2784, 1 out. 2008.

P MATHEW, A.; OKSMAN, K.; SAIN, M. Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). **Journal of Applied Polymer Science**, v. 97, p. 2014–2025, 5 set. 2005.

PANDEY, K. K. Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 90, n. 1, p. 9–20, 1 out. 2005.

PANDEY, P. et al. Performance of UV weathered HDPE composites containing hull fiber from DDGS and corn grain. **Industrial Crops and Products**, v. 107, n. February, p. 409–419, 2017.

PENG, L. et al. Mechanic and Acoustic Properties of the Sound-Absorbing Material Made from Natural Fiber and Polyester. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, p. 1–5, 6 set. 2015.

PEREIRA, H. Surface, thermal and other properties. **Cork**, p. 227–239, 1 jan. 2007.

PEREIRA, H.; ROSA, M.; M.A, F. **The Cellular Structure of Cork from Quercus Suber L.** [s.l: s.n.]. v. 8

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 1 jan. 2008.

PETERS, E. N. 1 - Engineering Thermoplastics—Materials, Properties, Trends. In: KUTZ, M. B. T.-A. P. E. H. (SECOND E. (Ed.). . **Plastics Design Library**. [s.l.] William Andrew Publishing, 2017. p. 3–26.

PRADELLA, C. Biopolímeros e Intermediários Químicos. 2006.

PROCEL. **Acústica Arquitetônica** **Acústica Arquitetônica**, 2011.

RABELLO, M. S.; WHITE, J. R. Crystallization and melting behaviour of. v. 38, n. 26, p. 6379–6387, 1997.

RAHIMABADY, M. et al. Hybrid local piezoelectric and conductive functions for high performance airborne sound absorption. **Applied Physics Letters**, v. 111, p. 241601, 11 dez. 2017.

RATANAWILAI, T.; TANEERAT, K. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 349–357, 30 maio 2018.

- ROSA, M.; A. FORTES, M. Thermogravimetric analysis of cork. **Journal of materials science letters**, 7(10), 1064-1065, 1998.
- ROUT, J. et al. Scanning electron microscopy study of chemically modified coir fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 79, n. 7, p. 1169–1177, 14 fev. 2001.
- ROWELL, R. M. et al. Utilization of natural fibers in plastic composites: Problem and opportunities in lignocellulosic composites. **Journal of Composites**, v. 18, p. 23–51, 1997.
- SANCHEZ, E. M. S. et al. Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades. **Polímeros**, v. 20, n. 3, p. 194–200, 1 out. 2010.
- SANTOS, F. DOS; SILVEIRA, A. DA. O Desempenho Térmico De Lajes De Concreto Expostas À Radiação Solar Em Teresina-Pi. **Infohab.Org.Br**, n. 1, p. 407–456, 2013.
- SARKAR, J.; CHICHOLIKAR, J.; RATHORE, L. Predicting Future Changes in Temperature and Precipitation in Arid Climate of Kutch, Gujarat: Analyses Based on LARS-wG Model. **Current Science**, v. 109, p. 2084, 1 dez. 2015.
- SHEA, J. J. Handbook of polymer degradation, 2nd edition [Book Reviews]. **Electrical Insulation Magazine, IEEE**, v. 17, p. 64–65, 1 dez. 2001.
- SILVA, M. C. G. et al. Influência do tratamento da fibra de coco verde na adesão de compósitos com Poli (ε-caprolactona). **In 48º Congresso Brasileiro de Química**, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- SILVA, S. P. et al. Cork: properties, capabilities and applications. **International Materials Reviews**, v. 50, n. 6, p. 345–365, 2005.
- SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1–13, 1 dez. 2016.
- SOUSA, A. R. et al. The combined effect of photodegradation and stress cracking in polystyrene. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, n. 7, p. 1504–1512, 1 jul. 2006.
- STARK, N. **Effect of weathering cycle and manufacturing method on performance of wood flour and high-density polyethylene composites**. [s.l: s.n.]. v. 100
- STARK, N. M.; MATUANA, L. M. Surface chemistry changes of weathered HDPE/wood-flour composites studied by XPS and FTIR spectroscopy. **Polymer Degradation and Stability**, v. 86, n. 1, p. 1–9, 1 out. 2004.

- STARK, N. M.; MATUANA, L. M. Influence of photostabilizers on wood flour–HDPE composites exposed to xenon-arc radiation with and without water spray. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, n. 12, p. 3048–3056, 1 dez. 2006.
- STARK, N. M.; MATUANA, L. M.; CLEMONS, C. M. Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood-flour/HDPE composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 93, n. 3, p. 1021–1030, 2004.
- SWIFT, M. .; BRIS, P.; HOROSHENKOV, K. . Acoustic absorption in re-cycled rubber granulate. **Applied Acoustics**, v. 57, n. 3, p. 203–212, 1 jul. 1999.
- SZOKOLAY, S. **Introduction to Architectural Science: the basis of sustainable design**. Oxford: Elsevier Press, 2004.
- TEIXEIRA, M. G.; CÉSAR, S. F. Produção de compósito com resíduo de madeira no contexto da ecologia industrial. v. 7, n. 19, p. 15, 2006.
- TURKU, I.; KÄRKI, T.; PUURTINEN, A. Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic. **Heliyon**, v. 4, n. 3, p. e00559, 1 mar. 2018.
- VALADEZ, A.; VELEVA, L. **Mineral filler influence on the photo-oxidation mechanism degradation of high density polyethylene. Part II: Natural exposure test**, v. 83, p. 139-148, 2004.
- VISAKH, P. M.; MARTINEZ, M. Polyethylene-Based Blends, Composites and Nanocomposites: State-of-the-Art, New Challenges and Opportunities. In: **Polyethylene Based Blends, Composites, and Nanocomposites**, p. 1–19, 2015.
- WANASEKARA, N.; CHALIVENDRA, V.; CALVERT, P. Sub-micron scale mechanical properties of polypropylene fibers exposed to ultraviolet and thermal degradation. **Polymer Degradation and Stability**, v. 96, n. 4, p. 432–437, 1 abr. 2011.
- WHITE, J. R.; TURNBULL, A. Weathering of polymers: mechanisms of degradation and stabilization, testing strategies and modelling. **Journal of Materials Science**, v. 29, n. 3, p. 584–613, 1994.
- WILES, D. M.; SCOTT, G. Polyolefins with controlled environmental degradability. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, n. 7, p. 1581–1592, 2006.
- XU, X. et al. Sound absorbing properties of perforated composite panels of recycled rubber, fiberboard sawdust, and high density polyethylene. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p.

215–221, 20 jun. 2018.

YAKIMETS, I.; LAI, D.; GUIGON, M. Effect of photo-oxidation cracks on behaviour of thick polypropylene samples. **Polymer Degradation and Stability**, v. 86, n. 1, p. 59–67, 2004.

YANG, R. et al. Effects of inorganic fillers on the natural photo-oxidation of high-density polyethylene. **Polymer Degradation and Stability**, v. 88, n. 2, p. 333–340, 2005.

YANG, T. H. et al. 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.