

Ciência e Engenharia de Materiais

4

Marcia Regina Werner Schneider Abdala
(Organizadora)

 **Atena**
Editora

Ano 2018

MARCIA REGINA WERNER SCHNEIDER ABDALA

(Organizadora)

Ciência e Engenharia de Materiais

4

Atena Editora

2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall'Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant'Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

C569 Ciência e engenharia de materiais 4 [recurso eletrônico] / Marcia Regina Werner Schneider Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Ciência e Engenharia de Materiais; v. 4)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-85107-64-2

DOI 10.22533/at.ed.642182910

1. Engenharia. 2. Materiais I. Abdala, Marcia Regina Werner Schneider. II. Série.

CDD 620.11

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Você já percebeu a importância dos materiais na sua vida diária? Os materiais estão provavelmente mais imersos na nossa cultura do que a maioria de nós imagina. Diferentes segmentos como habitação, saúde, transportes, segurança, informação/comunicação, vestuário, entre outros, são influenciados em maior ou menor grau pelos materiais.

De fato a utilização dos materiais sempre foi tão importante que os períodos antigos eram denominados de acordo com os materiais utilizados pela sociedade primitiva, como a Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro, etc.

A humanidade está em constante evolução, e os materiais não são exceções. Com o avanço da ciência e da tecnologia a cada dia surgem novos materiais com características específicas que permitem aplicações pormenorizadas e inovação nas mais diferentes áreas.

Todos os dias centenas de pesquisadores estão atentos ao desenvolvimento de novos materiais e ao aprimoramento dos existentes de forma a integrá-los em tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras.

Estamos entrando em uma nova era caracterizada por novos materiais que podem tornar o futuro mais fácil, seguro e sustentável. O campo da Ciência e Engenharia de Materiais aplicada está seguindo por novos caminhos. A iminente escassez de recursos está exigindo inovações e ideias criativas.

Nesse sentido, este livro evidencia a importância da Ciência e Engenharia de Materiais, apresentando uma coletânea de trabalhos, composta por quatro volumes, que permitem conhecer mais profundamente os diferentes materiais, mediante um exame das relações entre a sua estrutura, as suas propriedades e o seu processamento.

Considerando que a utilização de materiais e os projetos de engenharia mudam continuamente e que o ritmo desta mudança se acelera, não há como prever os avanços de longo prazo nesta área. A busca por novos materiais prossegue continuamente...

Boa leitura!

Marcia Regina Werner Schneider Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ESTUDO COMPARATIVO DA ABSORÇÃO DE UMIDADE ENTRE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS HÍBRIDOS REFORÇADOS COM TECIDOS DE ALTO DESEMPENHO	
<i>Helen Fernandes de Sousa</i>	
<i>Eval Oliveira Miranda Junior</i>	
<i>Ana Claudia Rangel da Conceição</i>	
<i>Victor Antunes Silva Barbosa</i>	
<i>Olímpio Baldoino da Costa Vargens Neto</i>	
<i>Mirtânia Antunes Leão</i>	
CAPÍTULO 2	15
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM TECIDO HÍBRIDO DE KEVLAR-CARBONO: INFLUÊNCIA DA ABSORÇÃO DE UMIDADE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	
<i>Eval Oliveira Miranda Junior</i>	
<i>Helen Fernandes de Sousa</i>	
<i>Ana Claudia Rangel da Conceição</i>	
<i>Victor Antunes Silva Barbosa</i>	
<i>Olímpio Baldoino da Costa Vargens Neto</i>	
<i>Mirtânia Antunes Leão</i>	
CAPÍTULO 3	25
FRICTION AND WEAR OF NANOCOMPOSITES POLYSTYRENE / KAOLINITE	
<i>José Costa de Macêdo Neto</i>	
<i>Ana Emília Guedes</i>	
<i>Nayra Reis do Nascimento</i>	
<i>João Evangelista Neto</i>	
<i>Waldeir Silva Dias</i>	
<i>Bruno Mello de Freitas</i>	
<i>Solenise Pinto Rodrigues Kimura</i>	
<i>Eduardo Rafael Barreda</i>	
CAPÍTULO 4	33
INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE CAULIM E DE AGENTE COMPATIBILIZANTE NO ÍNDICE DE FLUIDEZ DE COMPÓSITOS PEAD/CAULIM	
<i>Márcio Alves de Lima</i>	
<i>Gilmara Brandão Pereira</i>	
<i>Ezequiel de Andrade Silva</i>	
<i>Cirlene Fourquet Bandeira</i>	
<i>Roberto de Oliveira Magnago</i>	
<i>Sérgio Roberto Montoro</i>	
CAPÍTULO 5	40
ESTUDO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL EM LAMINADOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	
<i>Sérgio Renan Lopes Tinô</i>	
<i>Ana Claudia de Melo Caldas Batista</i>	
<i>Raphael Siqueira Fontes</i>	
<i>Eve Maria Freire de Aquino</i>	
CAPÍTULO 6	48
ANÁLISE MECÂNICA DE ESTRUTURAS SANDUÍCHES COM DIFERENTES NÚCLEOS	
<i>Vanessa Cristina Da Costa Oliveira</i>	
<i>Vanessa Maria Yae Do Rosário Taketa</i>	
<i>Carmen Gilda Barroso Tavares Dias</i>	

CAPÍTULO 7 58

MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADOS POR FIBRAS DE ALGODÃO CONTÍNUAS E ALINHADAS

César Tadeu Nasser Medeiros Branco
Wassim Raja El Banna
Deibson Silva da Costa
Roberto Tetsuo Fujiyama

CAPÍTULO 8 66

COMPÓSITO DE BORRACHA NATURAL E RESÍDUO DE COURO APLICADO COMO ISOLANTE TÉRMICO DE EDIFÍCIOS

Maria Alessandra Bacaro Boscoli
Fernando Sérgio Okimoto
Saulo Guths
Guilherme Dognani
Eduardo Roque Budemberg
Ado Eloizo Job

CAPÍTULO 9 82

ANÁLISE COMPARATIVA DE UM MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE FIBRA DE PIAÇAVA DO AMAZONAS.

Waldeir Silva Dias
Bruno Mello de Freitas
José Costa de Macedo Neto
Guilherme Moreira dos Santos
Solenise Pinto Rodrigues Kimura
Sarah Elisa Medeiros
João Christian Paixão Fonseca

CAPÍTULO 10 92

ANALYSIS OF THE STIFFNESS OF DOWEL LAMINATED TIMBER (DLT) PANELS MADE WITH LAMELLAS OF PINUS TAEDA AND ELLIOTTII WITH DOWELS OF PELTOGYNE SPP., LEGUMINOSAE

Marcos Cesar de Moraes Pereira
Carlito Calil Junior

CAPÍTULO 11 98

NANOCOMPÓSITO DE POLÍMERO VERDE: COMPORTAMENTO MECÂNICO E DE INFLAMABILIDADE

Felippe Fabrício dos Santos Siqueira
Renato Lemos Cosse
Joyce Batista Azevedo
Tatianny Soares Alves
Renata Barbosa

CAPÍTULO 12 108

DESENVOLVIMENTO DE NANOCOMPÓSITOS DE POLIPROPILENO/ARGILA BENTONÍTICA ORGANOFÍLICA

Carlos Ivan Ribeiro de Oliveira
Marisa Cristina Guimarães Rocha
Joaquim Teixeira de Assis
Jessica Verly
Ana Lúcia Nazareth da Silva
Luiz Carlos Bertolino

CAPÍTULO 13 123

COMPATIBILIZAÇÃO E EFEITO DA DEGRADAÇÃO TERMO-HIDROLÍTICA EM BLENDS PS/PCL

Danilo Diniz Siqueira
Dayanne Diniz de Souza Moraes

Rodolfo da Silva Barbosa Ferreira
Edcleide Maria Araújo
Danielly Campos França
Elieber Barros Barbosa
Amanda Dantas Oliveira

CAPÍTULO 14..... 139

MEMBRANAS DE FIBRA OCA DE CARBETO DE SILÍCIO: OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Sandriely Sonaly Lima Oliveira
Rodolfo da Silva Barbosa Ferreira
Bruna Aline Araújo
Keila Machado de Medeiros
Hélio de Lucena Lira
Edcleide Maria Araújo

CAPÍTULO 15..... 150

OBTENÇÃO DE NANOFIBRAS DE SÍLICA PELO MÉTODO SBS E INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR DE SUA APLICAÇÃO COMO CARGA EM MATRIZ POLIMÉRICA

Edvânia Trajano Teófilo
Gabriel Lucena de Oliveira
Radamés da Silva Teixeira
Francisco Diassis Cavalcante da Silva
Rosiane Maria da Costa Farias
Romualdo Rodrigues Menezes

CAPÍTULO 16..... 161

SINERGISMO ENTRE AS PROPRIEDADES ÓPTICAS E FOTOCATALÍTICAS DE FIBRAS DOS ÓXIDOS DE TITÂNIO E TUNGSTÊNIO

Luana Góes Soares da Silva
Annelise Kopp Alves

CAPÍTULO 17..... 177

ADSORÇÃO DO POLI (3-OCTILTIOFENO) EM ÓXIDO DE ZINCO PARA USO EM CÉLULAS SOLARES

Guilherme Arielo Rodrigues Maia
Guilherme José Turcatel Alves
Bianca Vanjura Dias
Gideã Taques Tractz
Leticia Fernanda Gonçalves Larsson
Everson do Prado Banczek
Sandra Regina Masetto Antunes
Paulo Rogério Pinto Rodrigues

SOBRE A ORGANIZADORA..... 186

NANOCOMPÓSITO DE POLÍMERO VERDE: COMPORTAMENTO MECÂNICO E DE INFLAMABILIDADE

Felippe Fabrício dos Santos Siqueira

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais
Teresina – PI

Renato Lemos Cosse

Instituto Federal do Piauí (IFPI), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
Teresina – PI

Joyce Batista Azevedo

Centro Universitário SENAI CIMATEC, Programa de Pós-Graduação Pós-Graduação Stricto Sensu GETEC
Salvador – BA

Tatianny Soares Alves

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais
Teresina – PI

Renata Barbosa

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais
Teresina – PI

RESUMO: Nanocompósitos de polietileno verde, compatibilizante polar e argila vermiculita organofílica foram desenvolvidos por meio da técnica de intercalação por fusão em uma extrusora monorosca e moldados

em uma termoprensa hidráulica. Para este trabalho, foram analisados o comportamento mecânico e a resistência à propagação de chama do PEVAD e seus nanocompósitos. Os resultados encontrados mostraram que os nanocompósitos com PEgMA apresentaram um aumento no módulo de elasticidade em relação ao PE verde puro, porém os resultados não foram satisfatórios quando se analisou a tensão de escoamento e o limite de resistência à tração. Isso foi causado, principalmente, pela má dispersão da argila na matriz polimérica e pela insuficiente adesão entre os dois materiais. O teste de inflamabilidade evidenciou o efeito catalítico da argila, uma vez que para todos os nanocompósitos avaliados, a resistência à propagação de chama foi inferior em relação ao PE verde puro.

PALAVRAS-CHAVE: polímero verde, argila vermiculita organofólica, nanocompósitos, desempenho mecânico e inflamabilidade.

ABSTRACT: Nanocomposites of green polyethylene, polar compatibilizer and organovermiculite were developed by melt intercalation method in a single screw extruder and molded by compression. The results showed that the nanocomposites that contained PEgMA had an increase in elasticity modulus in relation to the pure green PE, however the results were not satisfactory when analyzing the

yield stress and tensile strength. This was caused, mainly, by poor dispersion of clay in polymer matrix and insufficient adhesion between the two materials. The flammability test revealed the catalytic effect of the clay, since in all evaluated nanocomposites the resistance to flame propagation was lower than the pure green PE.

KEYWORDS: nanocomposites, green polyethylene, organovermiculite, polar compatibilizer, mechanical behavior and flammability.

1 | INTRODUÇÃO

Nanocompósitos com matriz polimérica reforçados por meio de argila em baixa concentração têm despertado atenção nos últimos anos e como consequência estão sendo estudados e desenvolvidos, principalmente, por promoverem propriedades superiores quando comparados com polímeros puros e/ou compósitos convencionais com outros tipos de cargas (SWAIN; ISAYEV, 2007). Essas propriedades incluem elevada estabilidade dimensional, melhores propriedades físicas, boas propriedades de barreira, melhoria na retardância a chamas, aumento do desempenho mecânico e possível redução do custo final do produto (SWAIN; ISAYEV, 2007; KOTAL; BHOWMICK, 2015; PAVLIDOU; PAPASPYRIDES, 2008).

Dentre as matrizes poliméricas existentes, o polietileno (PE) é o plástico com a estrutura polimérica mais simples do mercado, formado pela polimerização de átomos de carbono e hidrogênio em grandes cadeias (BARBOSA et al., 2012). Além disso, é o termoplástico mais largamente utilizado nas indústrias transformadoras (SWAIN; ISAYEV, 2007; COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003; ZHAO et al., 2005), possuindo boa combinação de propriedades úteis, tais como leveza, baixo custo, alta resistência química, atóxico e boa processabilidade (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003; ZHAO et al., 2005). Entretanto, devido à sua natureza química simples, apresenta baixa rigidez e é altamente inflamável (ZHAO et al., 2005).

Diante dos problemas que os produtos derivados de fonte fóssil causam ao meio ambiente e dos altos custos de produção, tem existido recentemente uma tendência em pesquisa, desenvolvimento e aplicação dos chamados biopolímeros que são plásticos oriundos de fonte renovável, podendo ser ou não biodegradáveis (NIAOUNAKIS, 2013). Um exemplo desse material é o polietileno verde (PE verde), desenvolvido e produzido pela petroquímica Braskem, à base de etileno gerado pelo etanol proveniente do processamento da cana de açúcar, uma fonte natural e renovável (CASTRO; RULOVO-FILHO; FROLLINI, 2012). Além disso, ele apresenta as mesmas propriedades e condições de processamento do polietileno convencional, bem como é 100% reciclável (KUCIEL; JAKUBOWSKA; KUZNIAR, 2014; OLIVEIRA et al., 2016; BORONAT et al., 2015). A utilização desse tipo de material contribui para reduzir a poluição ambiental na medida em que se diminui substancialmente a emissão de gases que provocam o efeito estufa (NIAOUNAKIS, 2013; OLIVEIRA et al., 2016). Como comparativo, para produzir 1 tonelada de PE de origem fóssil são emitidos 2,1 toneladas de CO₂ para o meio ambiente, enquanto que para produzir 1 tonelada do PE

verde são capturados da atmosfera 2,51 toneladas de CO₂ (OLIVEIRA et al., 2016). Isso acontece porque as plantas absorvem o dióxido de carbono durante seu cultivo e crescimento, como parte natural do processo de fotossíntese (NIAOUNAKIS, 2013). Dentre as argilas que podem ser utilizadas como reforço em nanocompósitos poliméricos, pode-se evidenciar a argila vermiculita, (Mg, Fe)₃ [(Si, Al)₄ O₁₀] [OH]₂ 4H₂O (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2008), que vem sendo estudada para este fim, pois fomenta melhores propriedades ao nanocompósito formado, com as vantagens de contribuir para a sustentabilidade ambiental por ser natural, regional, de fácil acesso e baixo custo. Trata-se de um material pertencente à subclasse dos filossilicatos, de estrutura cristalina lamelar 2:1, com potencial de aplicação em diversos segmentos (KOTAL; BHOWMICK, 2015; PAVLIDOU; PAPASPYRIDES, 2008; UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2008).

O grande desafio no uso de argilas como reforço em nanocompósitos é sua baixa compatibilidade, ou seja, pouca adesão em matrizes poliméricas dada sua estrutura ser hidrofílica, levando à necessidade de organofilização para ser compatível com a matriz polimérica que é hidrofóbica (BRITO et al., 2005; ARAÚJO et al., 2015). O processo de organofilização da argila consiste no preparo de dispersões contendo concentrações de água destilada, argila e um sal quaternário de amônio ou fosfônio. Nesse processo, acontecerá uma reação de troca-iônica dos cátions trocáveis, presentes na superfície e no espaço interlamelar dos argilominerais, por cátions surfactantes presentes no sal quaternário de amônio (KOTAL; BHOWMICK, 2015; BRITO et al., 2005; BARBOSA et al., 2007; ARAÚJO et al., 2007).

Além disso, alguns polímeros, como o polietileno, possuem forte natureza apolar, fazendo com que eles apresentem poucas interações com a superfície polar das cargas minerais tal quais as argilas, mesmo quando estas são organicamente modificadas. Dessa forma, faz-se necessário modificação da estrutura do polietileno por meio da adição de um compatibilizante polar, como tentativa de torná-lo mais compatível com a superfície da argila, bem como melhorar a dispersão do reforço dentro da matriz polimérica (SWAIN; ISAYEV, 2007; DECKER et al., 2015).

Diante dessa problemática, este trabalho busca analisar as propriedades mecânicas e o desempenho quanto à retardância de chamas de nanocompósitos de polietileno verde (PE verde)/compatibilizante polar/argila vermiculita organofílica.

2 | EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Na busca por perfil mais sustentável, essa pesquisa foi desenvolvida utilizando o polietileno verde de alta densidade (PEVAD), de *grade* SHA7260 da Braskem, como matriz polimérica.

Como forma de estimular e intensificar o uso materiais regionais, foi utilizada a argila vermiculita fornecida pela Mineração Pedra Lavrada da Paraíba/Brasil como

reforço em escala nanométrica e em teores menores que 10% para a produção dos nanocompósitos. O composto utilizado para modificar quimicamente a argila vermiculita foi o sal quaternário de amônio com nome comercial Praepagen WB® (cloreto de estearil dimetil amônio), com aspecto de gel e fabricado pela Clariant do Brasil.

O compatibilizante utilizado foi o PEgMA, polietileno de alta densidade funcionalizado com anidrido maleico, conhecido comercialmente por Orevac® 18507 e adquirido da Arkema Innovative Chemistry.

2.2 Procedimento experimental

Inicialmente a argila passou por um beneficiamento, onde esta foi moída utilizando-se um moinho mecânico IKA A11 e passada na peneira ABNT nº 200 com abertura de 74 µm para posteriormente ser organofilizada. Em seguida, a argila foi organofilizada e o procedimento utilizado para sua modificação química foi o mesmo adotado por Mesquita et al. (2016).

O processamento dos nanocompósitos foi realizado por meio da técnica de intercalação por fusão que consiste em misturar o polímero, a argila organofílica e o compatibilizante por meio de equipamentos de mistura.

O polietileno verde de alta densidade (PEVAD), a argila vermiculita organofílica (OVMT) e o compatibilizante polar (PEgMA) foram previamente misturados em diferentes proporções dos materiais conforme descrito na Tabela 1.

Sistemas	PEVAD (%)	PEgMA (%)	OVMT (%)
PEVAD	100	0	0
PEVAD/3OVMT	97	0	3
PEVAD/6OVMT	94	0	6
PEVAD/8PEgMA/1OVMT	91	8	1
PEVAD/6PEgMA/3OVMT	91	6	3

Tabela 1 - Formulação dos sistemas.

Depois de definidas as proporções, as concentrações foram fundidas e homogeneizadas em uma extrusora monorosca modelo AX-16 da AX Plásticos, com perfil de temperatura das zonas de aquecimento variando de 170 °C, 190 °C e 190 °C, respectivamente, para as zonas 1, 2 e 3 do equipamento, com rotação da rosca mantida em 50 rpm. Em seguida, os nanocompósitos foram resfriados em água, peletizados e secos em estufa por 4h a 60°C para posterior confecção dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram confeccionados segundo as dimensões das normas ASTM D638 e UL-94 HB por meio de compressão utilizando-se uma termoprensa hidráulica modelo MH-08-MN da MH Equipamentos Ltda. Os sistemas foram moldados

sob as seguintes condições: prensagem inicial de 1 tonelada a 180°C durante 2 minutos, seguida de uma descompressão por 1 minuto à mesma temperatura e por último, uma prensagem de 3 toneladas a 180°C durante 3 minutos.

2.3 Testes e análises

O ensaio mecânico de tração foi realizado utilizando-se a máquina de ensaio universal EMIC DL 30000N de acordo com os parâmetros definidos pela norma ASTM D638-10. O teste foi executado com seis corpos de prova para cada sistema, à temperatura ambiente e velocidade de tração de 50 mm/min, utilizando-se uma célula de carga de 5kN. O comportamento mecânico das amostras foi analisado por meio do módulo de elasticidade e do limite de resistência à tração.

Para analisar a resistência à chama, a taxa de queima e o desprendimento de material durante a queima das amostras, foi realizado o teste de inflamabilidade horizontal em corpos de prova normatizados pela Underwrites Laboratories (Norma UL 94). O teste foi conduzido em cinco corpos de prova, tanto para os nanocompósitos com diferentes concentrações de argila e compatibilizante quanto para o polímero verde puro.

A taxa de queima das amostras pode ser calculada por meio da equação A:

$$V = \frac{60L}{t} \quad (A)$$

onde V é a velocidade de queima em mm/min, L é o comprimento consumido pela chama (75mm) e t é o tempo necessário para que 75mm do corpo de prova seja consumido pela chama. As dimensões dos corpos de prova exigidos pela norma são: 125 ± 5 mm de comprimento, 13 ± 0,5 mm de largura e 3,0 ± 0,2 mm de espessura.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio mecânico de tração

As propriedades mecânicas nos nanocompósitos dependem de alguns fatores, entre eles o grau de dispersão do reforço na matriz e a adesão entre os constituintes (ZHAO et al., 2005; BORONAT et al., 2015). Os resultados das propriedades mecânicas obtidas do ensaio de tração estão descritos na Tabela 2.

Sistemas	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração – LRT (MPa)
PEVAD	468,08 ± 38,00	15,12 ± 1,05	26,59 ± 0,62
PEVAD/3OVMT	390,90 ± 20,98	14,80 ± 0,58	22,65 ± 0,85
PEVAD /6OVMT	393,37 ± 32,17	11,82 ± 0,36	18,72 ± 1,37
PEVAD/8PEgMA/1OVMT	503,15 ± 8,19	13,02 ± 0,31	25,57 ± 0,42
PEVAD/6PEgMA/3OVMT	517,05 ± 10,10	13,25 ± 0,52	23,96 ± 1,35

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do PEVAD e seus nanocompósitos.

De maneira geral observa-se que a argila organofílica e o PEgMA tiveram influência significativa nas propriedades mecânicas dos nanocompósitos.

Segundo a teoria clássica da mecânica, os carregamentos aplicados nos materiais compostos são transferidos da matriz para as cargas ao longo do contato reforço/matriz, fazendo com que compósitos/nanocompósitos que tenham boa adesão entre seus constituintes, apresentem melhores propriedades mecânicas (ESSABIR et al., 2016). No caso das amostras em estudo, essa adesão foi melhor adquirida nos sistemas PEVAD/8PEgMA/1OVMT e PEVAD/6PEgMA/3OVMT, logo tiveram melhores propriedades mecânicas.

A ausência do PEgMA nos sistemas PEVAD/3OVMT e PEVAD/6OVMT comprometeu a dispersão e a adesão da argila na matriz polimérica, bem como a qualidade dos corpos de prova que apresentaram elevada porosidade interna, fazendo com que estes atuassem como concentradores de tensão, reduzindo as propriedades mecânicas e levando à fratura precoce das amostras (BORONAT et al., 2015).

O módulo de elasticidade para os sistemas PEVAD/3OVMT e PEVAD/6OVMT, sem compatibilizante, apresentaram valores inferiores ao da matriz polimérica, sendo que a redução na rigidez foi de 16,53% para o PEVAD/3OVMT e 16,04% para o PEVAD/6OVMT. Quando o compatibilizante foi adicionado na formulação dos sistemas, verificou-se que o módulo elástico teve um aumento de 7,44% para o sistema PEVAD/8PEgMA/1OVMT e de 10,41% para o PEVAD/6PEgMA/3OVMT, com relação à matriz polimérica pura. O PEgMA foi fundamental para a melhoria da rigidez dos nanocompósitos. Como comparativo, sistema PEVAD/6PEgMA/3OVMT apresentou valor de módulo de elasticidade cerca de 32% superior ao sistema PEVAD/3OVMT, que não possui compatibilizante em sua composição. Quando argila e compatibilizante polar são adicionados à matriz de polietileno de alta densidade, o módulo elástico do material formado aumenta quando comparado ao da matriz polimérica pura, sendo atribuído isso à maior rigidez da carga inorgânica (ESSABIR et al., 2016).

Os resultados apontam que a tensão de escoamento do PE verde puro é maior que o observado para todos os nanocompósitos. Quando se analisa os sistemas sem PEgMA, verifica-se que o sistema PEVAD/6OVMT teve uma queda acentuada na sua tensão de escoamento de aproximadamente 22%, quando comparado ao PEVAD. Para

os sistemas com compatibilizante, foi observada uma redução de aproximadamente 13%. Essa redução na tensão de escoamento nos nanocompósitos acontece devido a utilização de argila como reforço na matriz polimérica, o material se torna mais rígido e sua capacidade de se deformar elasticamente fica comprometida. Por isso, os nanocompósitos formados possuem valores de tensão de escoamento intermediários ao do polietileno verde puro, que é dúctil, e à da argila vermiculita, que é rígida (ESSABIR et al., 2016).

Devido aos problemas de adesão pela falta do compatibilizante, porosidade interna e à existência de aglomerados de argila, já mencionados em outras análises, era de se esperar que os sistemas PEVAD/3OVMT e PEVAD/6OVMT apresentassem a resistência à tração inferior ao PEVAD e aos sistemas PEVAD/8PEgMA/1OVMT e PEVAD/6PEgMA/3OVMT. Para as amostras PEVAD/6OVMT, a redução do LRT em relação à matriz polimérica pura foi de aproximadamente 30%. Já os nanocompósitos que continham PEgMA, também apresentaram LRT inferior ao PE verde puro pelos mesmos problemas discutidos anteriormente, exceto a presença de porosidade. As reduções foram de aproximadamente 4% para o sistema PEVAD/8PEgMA/1OVMT e em torno de 11% para o PEVAD/6PEgMA/3OVMT. A resistência à tração está intimamente relacionada à adesão da argila na matriz polimérica, quanto melhor a eficiência dessa adesão, maior a eficiência na transferência de tensões entre os dois materiais (BORONAT et al., 2015; ESSABIR et al., 2015).

3.2 Teste de inflamabilidade - UL-94 HB

Os dados da Tabela 3 apresentam os resultados de velocidade de queima para a matriz polimérica pura e para os nanocompósitos.

Os valores obtidos no teste mostraram que o aumento do teor de argila organofílica nos sistemas teve uma tendência em aumentar a velocidade de queima quando se compara os nanocompósitos com o PEVAD.

Sistemas	Velocidade de Queima (mm/min)
PEVAD	24,83 ± 0,76
PEVAD/3OVMT	31,23 ± 1,53
PEVAD/6OVMT	40,83 ± 1,02
PEVAD/8PEgMA/1OVMT	26,39 ± 0,30
PEVAD/6PEgMA/3OVMT	32,14 ± 0,33

Tabela 3 - Resultados de velocidade de queima do teste de inflamabilidade.

Durante a execução do ensaio verificou-se a baixa emissão de fumaça e chama relativamente alta durante a queima de todas as amostras. O desprendimento de material foi contínuo durante a combustão do PEVAD, ocorrendo o consumo de toda a

amostra. Para os sistemas compostos por argila o desprendimento de material ocorreu lentamente, em forma de gotas intermitentes. Essa mudança na forma de como o material se desprendia foi atribuída à formação de uma camada rica em argila que atua como barreira e tenta inibir o gotejamento contínuo do material. Comportamento semelhante foi observado por Alves *et al.* (2014), em nanocompósitos de polipropileno/argila montmorilonita organofílica.

Os resultados indicaram que todos os sistemas que continham argila apresentaram taxa de queima superiores ao sistema PEVAD, sendo a maior velocidade de queima registrada para o sistema PEVAD/6OVMT, o qual a mesma foi 64,44% superior ao valor registrado para o PE verde puro.

Também foi observado que o compatibilizante teve pouco ou nenhum efeito na inflamabilidade das amostras, uma vez que os sistemas PEVAD/3OVMT e PEVAD/6PEgMA/3OVMT, que tinham o mesmo teor de argila, apresentaram velocidade de queima praticamente iguais.

Segundo Kiliaris e Papaspyrides (2010), apesar de ser muito explorado o fato de que os nanocompósitos poliméricos reforçados com argila possam melhorar as propriedades de resistência à chama quando comparado com a matriz polimérica pura, muitos artigos não trazem o impacto que, em grande parte das vezes, o sal de amônio provoca nas argilas modificadas, pois o mesmo causa a combustão mais rápida da matriz polimérica comprometendo as propriedades de resistência à chama do material formado. O mesmo foi observado por Zhao *et al.* (2005) em que o sal de amônio, rico em matéria orgânica, utilizado no processo de organofilização, pode atuar como um catalizador e acelerar a degradação da matriz polimérica.

Outro fator que deve ter contribuído para a baixa resistência à propagação de chama dos nanocompósitos em questão, foi o fato já discutido da baixa dispersão da argila nos sistemas formados. Segundo Barbosa *et al.* (2013), a formação de nanocompósitos intercalados e esfoliados, característicos de uma boa dispersão de argila na matriz polimérica, proporciona boas propriedades de retardância de chama. Isso acontece porque quando a argila é bem dispersa, o efeito barreira é predominante (ZHAO *et al.*, 2005), diminuindo a difusão do oxigênio para o interior dos nanocompósitos, bem como impedindo que produtos voláteis gerados durante a combustão desses materiais escapem e alimentem a chama, uma vez que esses gases servem como combustíveis (ALVES *et al.*, 2014).

4 | CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidos nanocompósitos a partir de polietileno verde como matriz polimérica, do PEgMA como compatibilizante polar e da argila vermiculita organofílica como material de reforço. Para isso, a técnica de intercalação por fusão foi adotada para o processamento, utilizando-se uma extrusora monorosca para mistura

e homogeneização dos materiais e uma termoprensa hidráulica para moldagem dos corpos de prova, via compressão.

Devido aos problemas de dispersão da argila na matriz polimérica e de adesão entre esses componentes, as propriedades mecânicas foram em grande parte afetadas. O módulo de elasticidade aumentou para os nanocompósitos com PEGMA quando seus resultados foram comparados com polietileno verde puro. Por outro lado, o LRT, que está intimamente relacionado com a qualidade da adesão e a boa dispersão da argila, e a tensão de escoamento foram inferiores para todos os sistemas de nanocompósitos em relação à matriz polimérica pura.

Os resultados do teste de inflamabilidade indicaram o efeito catalítico dos nanocompósitos dada a presença do sal de amônio que é rico em matéria orgânica, uma vez que em todos os sistemas que continham argila, a capacidade de resistência à chama foi inferior à do polietileno puro. Além disso, a dispersão deficiente da argila na matriz polimérica dificultou a formação completa do efeito barreira que atuaria como inibidor de chama. Por meio do teste, inferiu-se que o compatibilizante não teve influência sobre a inflamabilidade, pois não causou modificações consideráveis neste parâmetro.

REFERÊNCIAS

ALVES T. S.; BARBOSA, R.; CARVALHO, L. H.; CANEDO, E. C. Inflamabilidade de Nanocompósitos de Polipropileno/Argila Organofílica. **Polímeros**, v. 24, n. 3, p. 183-189, 2014.

ARAÚJO, E. M.; BARBOSA, R.; RODRIGUES, A. W. B.; MELO, T. J. A.; ITO, E. N. Processing and characterization of polyethylene/Brazilian clay nanocomposites. **Materials science & engineering A**, v. 145-146, p. 141-147, 2007.

ARAÚJO, R. J.; CONCEIÇÃO I. D.; CARVALHO, L. H.; ALVES T. S.; BARBOSA, R. Influência da argila vermiculita brasileira na biodegradação de filmes de PHB. **Polímeros**, v. 25, p. 483-491, 2015.

BARBOSA, R.; ALVES, S. T.; ARAÚJO, E. M.; MELO, Camino, G.; FINA, A.; ITO, E. N. Flammability and morphology of HDPE/clay nanocomposites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 115, p. 627-634, 2013.

BARBOSA, R.; ARAÚJO, E. M.; MELO, T. J. A.; ITO, E. N. Preparação de Argilas Organofílicas e Desenvolvimento de Nanocompósitos de Polietileno. Parte 2: Comportamento de Inflamabilidade. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 17, n. 2, p. 104-112, 2007.

BORONAT, T.; FOMBUENA, V.; GARCIA-SANOQUERA, D.; SANCHEZ-NACHER, L.; BALART, R. Development of a biocomposite based on green polyethylene biopolymer and eggshell. **Materials and Design**, v. 68, p. 177-185, 2015.

BRITO, G. F.; OLIVEIRA, A. D.; ARAÚJO, E. M.; MELO, T. J. A.; BARBOSA, R.; ITO, N. E. Nanocompósitos de Polietileno/Argila Bentonita Nacional: Influência da Argila e do Agente Compatibilizante PE-g-MA nas Propriedades Mecânicas e de Inflamabilidade. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 18, p. 170-177, 2005.

CASTRO, D. O.; RULOVO-FILHO, A.; FROLLINI, E. Materials prepared from biopolyethylene and curaua fibers: Composites from biomass. **Polymer testing**, v. 31, p. 1-75, 2012.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 13, n.1, p. 1-13, 2003.

DECKER, J. J.; MEYERS, K. P.; PAUL, D. R.; SCHIRALDI, D. A.; HILTNER, A.; NAZARENKO, S. Polyethylene-based nanocomposites containing organoclay: A new approach to enhance gas barrier via multilayer coextrusion and interdiffusion. **Polymer**, v. 61, p. 42-54, 2015.

ESSABIR, H.; ACHABY, M. E.; HILALI, E. M. O.; BOUHFID, R.; QAISS, A. K. Morphological, structural, thermal and tensile properties of high density polyethylene composites reinforced with treated argan nut shell particles. **Journal of bionic engineering**, v. 12, p. 129-141, 2015.

ESSABIR, H.; BOUJMAL, R.; BENSALAH, M. O.; RODRIGUE, D.; BOUHFID, R.; QAISS, A. K. Mechanical and thermal properties of hybrid composites: Oil-palm fiber/clay reinforced high density polyethylene. **Mechanics of Materials**, v. 98, p. 36-43, 2016.

KOTAL, M.; BHOWMICK, A. K. Polymer Nanocomposites from modified clays: recent advances and challenges. **Progress in polymer science**, v. 51, p.127-187, 2015.

KUCIEL, S.; JAKUBOWSKA, P.; KUZNIAR, 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**, v. 64, p. 72-77, 2014.

MESQUITA, P. J. P.; ARAÚJO, R. J.; CARVALHO, L. H.; ALVES T. S.; BARBOSA, R. Thermal evaluation of PHB/PP-g-MA blends and PHB/PP-g-MA/vermiculite bionanocomposites after biodegradation test. **Polymer engineering and science**, v. 56, p. 555-560, 2016.

NIAOUNAKIS, M. Introduction to Biopolymers. **Biopolymers Reuse, Recycling, and Disposal**, p. 1-75, 2013.

OLIVEIRA, A. G.; SILVA, A. L. N.; SOUSA, A. M. F.; LEITE, M. C. A. M.; JANDORNO, J. C.; ESCÓCIO, V. A. Composites based on green high-density polyethylene, polylactide and nanosized calcium carbonate: Effect of the processing parameter and blend composition. **Materials Chemistry and Physics**, p. 1-8, 2016.

PAVLIDOU, S.; PAPASPYRIDES, C. D. A review on polymer-layered silicate nanocomposites. **Polymer degradation and stability**, v.87, p. 183-11, 2008.

SWAIN, S. K.; ISAYEV, A. I. Effect of ultrasound on HDPE/clay nanocomposites: rheology, structure and properties. **Polymer**, v. 48, p. 281-289, 2007.

UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Vermiculita. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Eds.) **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 865-867.

ZHAO, C.; QIN, H.; GONG, F.; FENG, M.; ZHANG, S.; YANG, M. Mechanical, thermal and flammability properties of polyethylene/clay nanocomposites. **Polymer degradation and stability**, v. 87, p. 183-189, 2005.

SOBRE A ORGANIZADORA:

Marcia Regina Werner Schneider Abdala: Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Graduada em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Possui experiência na área de Educação a mais de 06 anos, atuando na área de gestão acadêmica como coordenadora de curso de Engenharia e Tecnologia. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se a atuação como professora de ensino superior atuando em várias áreas de graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Atuou como inspetora de Aviação Civil, nas áreas de infraestrutura aeroportuária e segurança operacional em uma instituição federal.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-64-2

