



**CONFORME SOLICITAÇÃO DO AUTOR, ESTA
PRODUÇÃO INTELECTUAL POSSUI
RESTRIÇÃO DE ACESSO**

**CAXIAS DO
SUL 2022**

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E
ENGENHARIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS E TECNOLOGIAS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES
POLIMÉRICOS DE POLIETILENO COM ADIÇÃO DE NANOCARGAS
PARA APLICAÇÃO EM BLINDAGEM BALÍSTICA

DANIELI DALLÉ

CAXIAS DO SUL
2022

DANIELI DALLÉ

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES
POLIMÉRICOS DE POLIETILENO COM ADIÇÃO DE NANOCARGAS
PARA APLICAÇÃO EM BLINDAGEM BALÍSTICA**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos e Tecnologias, orientada pelo prof. Dr. Ademir José Zattera e co-orientada pela Prof^a. Dr^a. Cleide Borsoi.

**CAXIAS DO SUL
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

D146d Dallé, Danieli

Desenvolvimento e caracterização de filmes poliméricos de polietileno com adição de nanocargas para aplicação em blindagem balística [recurso eletrônico] / Danieli Dallé. – 2022.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2022.

Orientação: Ademir José Zattera.

Coorientação: Cleide Borsoi.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Materiais - Testes. 2. Resistência de materiais. 3. Polímeros. 4. Polietileno. 5. Nanocompósitos (Materiais). I. Zattera, Ademir José, orient. II. Borsoi, Cleide, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 620.1

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

DANIELI DALLÉ

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES
POLIMÉRICOS DE POLIETILENO COM ADIÇÃO DE NANOCARGAS
PARA APLICAÇÃO EM BLINDAGEM BALÍSTICA**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos e Tecnologias, orientada pelo Prof. Dr. Ademir José Zattera e co-orientada pela Prof.^a Dr.^a Cleide Borsoi.

Dissertação aprovada em vinte e sete de outubro de dois mil e vinte e dois.

Orientador(a): Prof. Dr. Ademir José Zattera.

Coorientador(a): Prof.^a Dr.^a Cleide Borsoi.

Demais colaboradores(as): Dr.^a Lilian Vanessa Rossa Beltrami.

Banca examinadora:

Prof. Dr. André Luis Catto
Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES)

Prof. Dr. Matheus Poletto
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Prof. Dr. Derval dos Santos Rosa
Universidade Federal do ABC (UFABC)

Dedico este trabalho aos meus pais, Agenor Dallé e Maurem Graffitti Dallé, por terem sempre me incentivado e apoiado em meus projetos pessoais e profissionais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, deixo meus agradecimentos a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Agradeço à minha família, meu pai, Agenor, minha mãe, Maurem, e meu irmão, Agenor Júnior, por sempre ouvirem e incentivarem-me para que a conclusão deste trabalho fosse possível. Em especial à minha mãe, que sempre me motivou a enfrentar desafios maiores.

Agradeço ao meu orientador, professor Ademir José Zattera, pelos ensinamentos recebidos durante toda execução deste trabalho e pelas oportunidades decorrentes da pesquisa.

Agradeço à minha co-orientadora, professora Cleide Borsoi, por ter me incentivado no pontapé inicial dessa jornada e ter me acompanhado durante todo o percurso acadêmico, contribuindo para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço à Lilian Beltrami por estar sempre disposta a me auxiliar em todas as dúvidas referentes à parte experimental e teórica, não medindo esforços em oferecer amparo.

Agradeço ao meu colega Celso Roman Jr., pelo auxílio nas etapas experimentais e troca de conhecimentos durante este período. Agradeço também à minha amiga e bolsista de iniciação científica Tayse Turossi, por ter me auxiliado em diversas etapas deste trabalho.

Agradeço à professora Camila Baldasso, que além de excepcional professora, tornou-se também uma grande amiga, sempre disposta a auxiliar em momentos críticos. Agradeço também pela oportunidade em poder realizar estágio de docência em suas disciplinas.

Agradeço aos amigos e amigas que conheci nessa caminhada, por todo apoio e parceria, tanto nas aulas quanto nas pesquisas, em especial à Sandryne Tiesen, Júlia Daneluz, Laura Moscone e Vagner Grison.

Agradeço aos técnicos do laboratório de polímeros (LPOL) da Universidade de Caxias do Sul pela disponibilidade e colaboração.

Agradeço aos envolvidos do Centro Tecnológico do Exército do Rio de Janeiro (CTEX) pela hospitalidade, ensinamentos e troca de experiências nesse período.

Agradeço a todos os professores, incluindo a banca de avaliação, colegas e amigos que contribuíram direta ou indiretamente nessa caminhada.

Agradeço à Universidade de Caxias do Sul (UCS) por usufruir de sua estrutura, laboratórios e recursos para realização da pesquisa.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

Walter S. Landor

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	OBJETIVOS.....	20
2.1.	Objetivo Geral	20
2.2.	Objetivos Específicos	20
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1.	Compósitos.....	21
3.2.	Argilas 30B (ARG)	24
3.3.	Grafeno.....	27
3.4.	Compósitos PEAD/PEBD.....	30
3.5.	Compósitos para aplicação em proteção balística.....	33
3.5.1.	Testes balísticos.....	35
4.	MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1.	Materiais.....	40
4.2.	Métodos.....	40
4.3.	ETAPA 1: Confeção dos filmes poliméricos nanoestruturados com adição de CNF e confeção e caracterização das placas multicamadas com tecido de aramida.	40
4.3.1.	Produção dos filmes poliméricos nanoestruturados	41
4.3.1.1.	Desfibrilamento da celulose	41
4.3.1.2.	Preparação do masterbatch de celulose.....	42
4.3.1.3.	Confeção dos filmes poliméricos nanoestruturado com adição de CNF.....	43
4.3.2.	Confeção das placas multicamadas com tecido de aramida.....	44
4.3.3.	Caracterização das placas multicamadas com tecido de aramida	46
4.3.3.1.	Compressão dinâmica em barra Hopkinson (SHPB)	46
4.3.3.2.	Ensaio de nível balístico e deformação posterior	47
4.3.3.3.	Resistência à tração	48
4.3.3.4.	Resistência à flexão	48
4.3.3.5.	Resistência ao impacto	48
4.4.	ETAPA 2: Confeção e caracterização dos filmes poliméricos nanoestruturados com adição de diferentes nanocargas em concentração definida.	48
4.4.1.	Confeção filmes poliméricos nanoestruturados.....	49
4.4.2.	Caracterização dos filmes poliméricos nanoestruturados	49

4.4.2.1.	Caracterização térmica (TGA e DSC).....	49
4.4.2.2.	Índice de fluidez (IF).....	50
4.4.2.3.	Caracterização dinâmico-mecânica (DMA).....	50
4.4.2.4.	Resistência à tração	51
4.4.2.5.	Espessura do filme	51
4.5.	ETAPA 3: Confecção e caracterização das placas multicamadas com tecido de aramida e filmes poliméricos nanoestruturados pré caracterizados na Etapa 2.	51
4.5.1.	Confecção das placas multicamadas com tecido de aramida.....	52
4.5.2.	Caracterização das placas multicamadas com tecido de aramida	53
4.5.2.1.	Ensaio de compressão dinâmica em barra Hopkinson (SHPB)	53
4.5.2.2.	Ensaio de nível balístico e deformação posterior.....	53
4.5.2.3.	Resistência à tração	53
4.5.2.4.	Resistência à flexão.....	54
4.5.2.5.	Resistência ao impacto	54
4.6.	Análise estatística.....	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1.	Etapa 1: Caracterização das placas multicamadas	55
5.1.1.	Ensaio de compressão dinâmica em barra Hopkinson (SHPB)	55
5.1.2.	Ensaio de nível balístico e deformação posterior.....	57
5.1.3.	Ensaio mecânicos.....	59
5.2	Etapa 2: Caracterização dos filmes nanoestruturados	61
5.2.1.	Análise Termogravimétrica (TGA).....	61
5.2.2.	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	63
5.2.3.	Análise Dinâmico-Mecânica (DMA).....	66
5.2.4.	Índice de fluidez (IF).....	69
5.2.5.	Resistência à tração	70
5.2.6.	Espessura dos filmes	72
5.3	Etapa 3: Caracterização das placas multicamadas com tecido de aramida	72
5.3.1.	Ensaio de compressão dinâmica em barra Hopkinson (SHPB)	72
5.3.2.	Ensaio de nível balístico e deformação posterior.....	73
5.3.3.	Ensaio mecânicos.....	76
6.	CONCLUSÃO	79
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura química do mero da celulose.	24
Figura 2 - Configuração cristalina da argila 1:1 (a), configuração cristalina da argila 2:1 (b), tipos de argila em camadas, nanotubulares e nanofibras conforme arranjo de empilhamento das estruturas cristalinas (c).	28
Figura 3 - Configuração de diferentes nanoestruturas alotrópicas do carbono, (a) nanoestrutura de uma folha de grafeno 2D, (b) nanoestrutura fulereno 0D, (c) nanoestrutura de nanotubo de carbono 1D, (d) grafite 2D.	31
Figura 4 - Estruturas de grafeno de poucas camadas (a) monocamada, bicamada e tricamada de folha de grafeno, (b) nanoplaqueta de grafeno com mais de 10 camadas.	32
Figura 5 - Mero de repetição do PE e diferença na formação de ramificações PEAD e PEBD.	34
Figura 6 - Configuração de materiais de proteção balística compósitos e não-compósitos em estrutura multicamadas.	34
Figura 7 - Classificação níveis de proteção balística.	39
Figura 8 - Esquema do dispositivo de ensaio de nível de proteção balística.	40
Figura 9 - Esquema do dispositivo de ensaio SHPB (a) e gráfico típico de tensão vs. tempo dos pulsos gerados (b).	41
Figura 10 - Fluxograma da etapa 1.	44
Figura 11 - Fluxograma da etapa do desfibrilamento da celulose branqueada.	45
Figura 12 - Fluxograma da etapa de preparação de masterbatch de CNF em PEBD.	46
Figura 13 - Fluxograma da etapa de preparação dos filmes nanoestruturados PEAD/PEBD/CNF.	47
Figura 14 - Fluxograma da etapa de preparação das placas multicamadas com filme nanoestruturado e tecido de aramida.	48
Figura 15 - Dimensões das amostras ensaiadas em SHPB com diferentes diâmetros.	49
Figura 16 - Fluxograma da etapa 2.	52
Figura 17 - Fluxograma da etapa 3.	55
Figura 18 - Curva tensão vs. deformação das placas multicamadas confeccionadas com filmes PEAD/PEBD/CNF e tecido de aramida no ensaio SHPB (a) PEAD/PEBD/AR, (b) EAD/PEBD/0.5CNF/AR, (c) PEAD/PEBD/1.0CNF/AR e (d) PEAD/PEBD/1.5CNF/AR.	58
Figura 19 - Propriedades de (a) deformação total (mm/mm), (b) Tenacidade (J/m^3), (c)	

Tensão máxima (MPa) e (d) Deformação máxima (mm/mm) das placas multicamadas confeccionadas com filmes PEAD/PEBD/CNF e tecido de aramida provenientes do ensaio SHPB.	60
Figura 20 - Resultados mecânicos de (a) Tração máxima (MPa), (b) Resistência à flexão (MPa), (c) Alongamento máximo na flexão (%) e (d) Módulo de elasticidade da flexão (MPa) das placas multicamadas confeccionadas com filmes PEAD/PEBD/CNF e tecido de aramida.	61
Figura 21 - Resistência ao impacto (kJ/m ²) das placas multicamadas confeccionadas com filmes PEAD/PEBD/CNF e tecido de aramida.	64
Figura 22 - Análise de TGA (a) e DTG (b) dos filmes nanoestruturados PEAD/PEBD com e sem adição de nanocargas (CNF, ARG e NPG) e com e sem agente de acoplamento.	65
Figura 23 - Análise de DSC dos filmes nanoestruturados PEAD/PEBD com e sem adição de nanocargas (CNF, ARG e NPG) e com e sem agente de acoplamento, (a) 1ª corrida de aquecimento, (b) 2ª corrida de aquecimento, (c) 2ª corrida de aquecimento ampliada.	67
Figura 24 - Análise de DMA (a) Módulo de armazenamento e (b) Módulo de perda dos filmes nanoestruturados PEAD/PEBD com e sem adição de nanocargas (CNF, ARG e NPG) e com e sem agente de acoplamento.	69
Figura 25 - Análise de resistência à tração dos filmes nanoestruturados PEAD/PEBD com e sem adição de nanocargas (CNF, ARG e NPG) e com e sem agente de acoplamento.	73
Figura 26 - Análise de deformação na ruptura no ensaio de resistência à tração dos filmes nanoestruturados PEAD/PEBD com e sem adição de nanocargas (CNF, ARG e NPG) e com e sem agente de acoplamento.	74
Figura 27 - Curva tensão vs. deformação das placas multicamadas confeccionadas com filmes PEAD/PEBD nanoestruturados (CNF, ARG e NPG) com e sem agente de acoplamento e tecido de aramida no ensaio SHPB.	76
Figura 28 - Resultados mecânicos de (a) Tração máxima (MPa), (b) Resistência à flexão (MPa), (c) Alongamento máximo na flexão (%) e (d) Módulo de elasticidade da flexão (MPa) das placas multicamadas confeccionadas com filmes PEAD/PEBD nanoestruturados (CNF, ARG e NPG) com e sem agente de acoplamento e tecido de aramida.	77
Figura 29 - Resistência ao impacto (kJ/m ²) das placas multicamadas confeccionadas com filmes PEAD/PEBD com e sem adição de nanocargas (CNF, ARG e NPG) e com e sem agente de acoplamento e tecido de aramida.	

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR	Tecido de aramida
ARG	Nanoargila montmorilonita 30B
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Agente de acoplamento
CAEx	Centro de Avaliações do Exército do Rio de Janeiro/RJ
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CMC	Celulose microcristalina
CMF	Celulose microfibrilada
CNF	Celulose nanofibrilada
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CTEx	Centro Tecnológico do Exército do Rio de Janeiro/RJ
DMA	Análise dinâmico-mecânica (<i>Dynamic mechanical analysis</i>)
DP	Deformação posterior (mm)
DRX	Difração de raios X
DSC	Calorimetria exploratória diferencial (<i>Differential scanning calorimetry</i>)
DTG	Derivada da análise de TGA (<i>Derivative Thermogravimetry</i>)
FEG-MEV	Microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo
GO	Óxido de grafeno
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>
HDPE/LDPE	Mistura de <i>High e Low Density Polyethylene</i>
IF	Índice de fluidez (g/10min)
LAMEC	Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul
LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i>
LPOL	Laboratório de Polímeros da Universidade de Caxias do Sul
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MMT	Montmorilonita
Nano	Nanométrico
NCC	Nanocristais de celulose
NFC	Nanofibras de celulose
NIJ	National Institute of Justice
NP	Não penetração

NPG	Nanoplaquetas de grafeno
OMMT	Montmorilonita modificada com composto orgânico
OSOP	Órgãos de segurança e ordem pública
PC	Penetração completa
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEAD/PEBD	Mistura de polietileno de alta e baixa densidade
PEAD/PEBD/CNF	Filme nanoestruturados de polietileno de alta e baixa densidade com adição de celulose nanofibrilada
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PEBDL	Polietileno de baixa densidade linear
PEUAPM	Polietileno de ultra alto peso molecular
PLA	Poliácido lático
PMSQ	Polimetilsilsesquioxano
PP	Penetração parcial
PS	Poliestireno
rGO	Óxido de grafeno reduzido
SHPB	Compressão dinâmica em barra Hopkinson (<i>Split-Hopkinson pressure bar</i>)
TGA	Análise termogravimétrica (<i>Thermogravimetric analysis</i>)
UCS	Universidade de Caxias do Sul
vs.	Versus

LISTA DE SÍMBOLOS

% (m/m)	Porcentagem em relação à massa (g de nanocarga em 100 g de produto final)
ΔH	Entalpia de fusão (J/g)
$^{\circ}C$	Grau celsius
μm	Micrômetro
Al_2O_3	Óxido de alumínio
E' Máx	Módulo de armazenamento máximo (MPa)
E'	Módulo de armazenamento (MPa)
E'' Máx	Módulo de perda máximo (MPa)
E''	Módulo de perda (MPa)
g/cm^3	Unidade de densidade em grama por centímetro cúbico
h	Hora
H_2O	Água
Hz	Frequência
III-A	Nível de proteção balística que suporta impacto de projétil a 426 ± 15 m/s
J/m^3	Unidade de tenacidade em Joule por metro cúbico
kJ/m^2	Unidade de resistência ao impacto em quilojoule por metro quadrado
m/s	Unidade de velocidade impacto balístico em metros por segundo
m^2/g	Unidade de área superficial específica em metro quadrado por grama
min	Minuto
mm	Milímetros
mm/mm	Unidade de deformação em milímetro por milímetro
MPa	Pressão em megapascal
nm	Nanômetro
OH	Grupo hidroxila
psi	Pressão em libra força por polegada quadrada
Resíduo _{600 °C}	Quantidade de massa residual a 600 °C na análise de TGA (%)
rpm	Rotações por minuto
s	Segundo
SiO_2	Dióxido de silício
T_{pico}	Temperatura do pico da curva da derivada na análise de TGA (°C)
T_{α}	Temperatura na transição alfa (°C)
$T_{5\% (m/m)}$	Temperatura em 5% de perda de massa na análise de TGA (°C)

$T_{50\% (m/m)}$	Temperatura em 50% de perda de massa na análise de TGA (°C)
T_{γ}	Temperatura na transição gama (°C)
T_g	Temperatura de transição vítrea (°C)
T_m	Temperatura de fusão (°C)
ton	Tonelada
U	Tenacidade (J/cm ³)
V	Volts
Xc	Índice de cristalinidade (%)
ϵ total	Deformação total (mm/mm)
σ máx	Tensão máxima (MPa)

RESUMO

O desenvolvimento de novos materiais de engenharia para fins de proteção individual ou coletiva é crescente. Em virtude do avanço das tecnologias táticas e militares, faz-se necessário o aperfeiçoamento de sistemas de blindagem, por exemplo, coletes e capacetes mais funcionais, com menor densidade e maior flexibilidade. Aliado a essas propriedades, busca-se a redução de custos, sem comprometer a absorção de impacto. Uma alternativa para melhorar estas propriedades é a substituição dos materiais usuais por materiais alternativos, como os polímeros considerados *commodities*, que são acessíveis e apresentam propriedades mecânicas, químicas e térmicas atrativas. A adição de nanocargas em matrizes poliméricas tem sido destaque nos últimos anos, devido às suas características vantajosas em relação aos materiais puros, elevando as propriedades dos materiais denominados nanocompósitos, como as propriedades mecânicas e térmicas. Dentre as nanocargas, pode-se citar a celulose nanofibrilada (CNF), nanoargila (ARG) e nanoplaquetas de grafeno (NPG), cada uma com morfologia e características distintas. O uso de celulose para este tipo de aplicação, combinada com polímero termoplástico não foi encontrado na literatura, sendo um ponto positivo para a inovação tecnológica da pesquisa. O objetivo deste trabalho foi desenvolver filmes nanoestruturados de polietileno de alta e baixa densidade (PEAD/PEBD) com a incorporação de diferentes nanocargas para posterior obtenção de placas multicamadas com tecido de aramida (AR), visando a potencial aplicação para proteção balística. Para produção dos filmes, *masterbatch* de CNF em PEBD foi incorporado à PEAD e as pré misturas submetidas a uma extrusora duplarrosca seguida de processamento por extrusora monorrosca para obtenção de um filme polimérico por sopra. Posteriormente, o tecido de AR e os filmes foram cortados, dispostos em camadas intercaladas, e submetidos à compressão a quente e a frio, respectivamente. As primeiras placas multicamadas com adição de filmes de PEAD/PEBD, com CNF nas concentrações de 0, 0,5, 1,0 e 1,5% em massa (m/m), foram avaliadas na etapa 1, e com a melhor concentração, foram produzidos novos filmes com ARG e NPG, também foi avaliado a adição de agente de acoplamento (CA). Todos os filmes nanoestruturados foram caracterizados na etapa 2. Na etapa 3, placas multicamadas com os filmes nanoestruturados provenientes da etapa 2 foram confeccionadas e caracterizadas. Na etapa 1, no ensaio de compressão dinâmica em barra Hopkinson (SHPB) a amostra PEAD/PEBD/1.0CNF/AR obteve comportamento de dissipação de energia superior as demais, sendo 1,0% a concentração pré definida para produção de demais filmes na etapa subsequente. Todas as amostras da etapa 1 foram enquadradas em nível balístico de proteção III-A. Na etapa 2, os filmes com adição de ARG e NPG mostraram resultados superiores em relação à análise termogravimétrica (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), ensaio dinâmico-mecânico (DMA), índice de fluidez (IF) e resistência à tração. Os filmes de CNF+CA e a amostra matriz com adição de CA (PEAD/PEBD+CA) também apresentaram incremento de algumas propriedades. Na etapa 3, as placas multicamadas foram avaliadas por SHPB, sendo que as amostras com ARG, NPG, e PEAD/PEBD+CA obtiveram comportamento de tensão superior a altas taxas de deformação, contribuindo para melhor dissipação de energia nestas placas. Todas as amostras da etapa 3 foram enquadradas em nível balístico de proteção III-A, e a deformação posterior (DP) foi reduzida nas amostras com ARG e NPG, em 12 e 13% em relação à amostra bruta (PEAD/PEBD/AR), respectivamente. Nos ensaios mecânicos, o módulo de elasticidade na resistência à flexão foi mais pronunciado, sendo 44% superior para as amostras com CNF+CA e NPG, e 18% para a amostra com ARG. Os resultados mostraram que a adição de nanocargas pode ser uma alternativa viável para aplicação em compósitos multicamadas, junto com AR, para fins de proteção balística, mantendo e/ou aprimorando as propriedades mecânicas e de impacto.

Palavras chave: nanocargas, proteção balística, filmes poliméricos nanoestruturados, grafeno, nanocelulose, nanoargila.

ABSTRACT

The development of new engineering materials for individual or collective protection purposes is increasing. Due to the advancement of tactical and military technologies, it is necessary to improve armoring systems, for example, more functional vests and helmets, with lower density and greater flexibility. Allied to these properties, it seeks to reduce costs, without compromising impact absorption. An alternative to improve these properties is to replace the usual materials with more common materials, such as polymers considered commodities, which are affordable and have attractive mechanical, chemical and thermal properties. The addition of nanofillers in polymeric matrices has been highlighted in recent years, due to their advantageous characteristics compared to pure materials, increasing the properties of materials called nanocomposites, such as mechanical and thermal properties. Among the nanofillers, we can mention nanofibrillated cellulose (CNF), nanoclay (ARG) and graphene nanoplatelets (NPG), each with distinct morphology and characteristics. The use of cellulose for this type of application, combined with thermoplastic polymer was not found in the literature, being a positive point for the technological innovation of the research. The objective of this work was to develop nanostructured films of high and low density polyethylene (HDPE/LDPE) with the incorporation of different nanofillers to later obtain multilayer plates with aramid fabric (AR), aiming at the potential application for ballistic protection. For the production of the films, a masterbatch of CNF in LDPE was incorporated into HDPE and the premixes were subjected to double-screw extrusion followed by balloon blowing extrusion. Subsequently, the AR and the films were cut, stacked in interleaved layers, and subjected to hot and cold compression, respectively. The first multilayer plates with the addition of CNF between 0-1.5% were evaluated in step 1, and with the best concentration, new films were produced with ARG and NPG, the addition of coupling agent (CA) was also evaluated. All nanostructured films were characterized in step 2. In step 3, multilayer plates with nanostructured films from step 2 were made and characterized. In step 1, in the dynamic compression test on split Hopkinson pressure bar (SHPB), the HDPE/LDPE/1.0CNF/AR sample obtained superior energy dissipation behavior among the others, with 1.0% being the predefined concentration for the production of other films in the subsequent step. All samples from stage 1 were classified in ballistic protection level III-A. In step 2, the films with the addition of ARG and NPG showed superior results in relation to thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), dynamic-mechanical testing (DMA), flow index (IF) and tensile strength. The CNF+CA and the matrix sample with the addition of CA (HDPE/LDPE+CA) also showed an increase in some properties. In step 3, the multilayer plates were evaluated by SHPB, and the samples with ARG, NPG, and HDPE/LDPE+CA obtained higher stress behavior at high strain rates, contributing to better energy dissipation in these plates. All samples from step 3 were classified in ballistic protection level III-A, and the posterior deformation (DP) was reduced in samples with ARG and NPG, in 11.61 and 12.98% in relation to the raw sample (PEAD/PEBD/AR). In the mechanical tests, the modulus of elasticity due to flexural strength was more pronounced, being 44% higher for the samples with CNF+CA and with NPG, and 18% for the sample with ARG. The results showed that the addition of nanofillers to can be a viable alternative for application in multilayer composites, together with AR, for protection purposes, maintaining and/or improving the mechanical and impact properties.

Keywords: nanofillers, ballistic protection, nanostructured polymeric films, grap e, nanocellulose, nanoclay.