



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

**CAXIAS DO SUL
2025**

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS

E ENGENHARIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE

PROCESSOS E TECNOLOGIAS

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE NANOCARGAS EM COMPÓSITO

LAMINADO DE TECIDO DE ARAMIDA E FILME DE POLIETILENO

Celso Roman Júnior

Caxias do Sul, 2024

Celso Roman Júnior

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE NANOCARGAS EM COMPÓSITO
LAMINADO DE TECIDO DE ARAMIDA E FILME DE POLIETILENO**

Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de doutor em Engenharia de Processos, orientado por Ademir José Zattera e coorientado por Daiane Romanzini.

Caxias do Sul, 2024

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

R758e Roman Júnior, Celso

Efeito da incorporação de nanocargas em compósito laminado de tecido de aramida e filme de polietileno [recurso eletrônico] / Celso Roman Júnior. – 2024.

Dados eletrônicos.

Tese (Doutorado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2024.

Orientação: Ademir José Zattera.

Coorientação: Daiane Romanzini.

Modo de acesso: World Wide Web

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

1. Grafeno. 2. Nanotecnologia. 3. Nanocompósitos (Materiais). 4. Resistência de materiais. 5. Materiais - Testes. 6. Balística - Proteção. I. Zattera, Ademir José, orient. II. Romanzini, Daiane, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 549.21

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

Celso Roman Júnior

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE NANOCARGAS EM COMPÓSITO
LAMINADO DE TECIDO DE ARAMIDA E FILME DE POLIETILENO**

Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de doutor em Engenharia de Processos, orientado por Ademir José Zattera e coorientado por Daiane Romanzini.

Caxias do Sul, 17 de Abril de 2024.

Orientador Dr. Ademir José Zattera / Universidade de Caxias do Sul

Coorientadora: Dra. Daiane Romanzini / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Feliz.

Banca Examinadora:

Dra. Amanda Albertin Xavier da Silva / Universidade Federal de Goiás.

Dr. André Luís Catto / Universidade do Vale do Taquari.

Dra. Lilian Vanessa Rossa Beltrami / Universidade de Caxias do Sul.

RESUMO

O avanço das tecnologias táticas e militares torna essencial a melhoria de sistemas de blindagem, como coletes e capacetes, buscando funcionalidade aprimorada, menor densidade e maior flexibilidade. Uma estratégia para aprimorar essas propriedades é substituir os materiais convencionais por alternativos, como os polímeros considerados *commodities*, que são acessíveis e possuem propriedades mecânicas, químicas e térmicas atrativas. A adição de nanocargas em matrizes poliméricas tem se destacado, elevando as propriedades de materiais denominados nanocompósitos, especialmente as propriedades mecânicas e térmicas. Entre as nanocargas, destaca-se o carbonato de cálcio (NCC), argilas do tipo montmorilonita (MMT) e nanoplaquetas de grafeno (GNP), cada uma com morfologia e características distintas. Até o momento, não foi reportado nas pesquisas em literatura o uso de carbonato de cálcio em nanopartículas para aplicações balísticas combinadas com polímero termoplástico. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da incorporação de diferentes nanocargas (NCC, MMT e GNP) em filmes de polietileno de alta densidade (PEAD), e em compósitos laminados obtidos com tecido de aramida intercalado com os filmes de PEAD nanorreforçados, visando a sua aplicação potencial em proteção balística. Na produção dos filmes, as nanocargas e o PEAD foram submetidas à extrusão dupla rosca, e em seguida uma extrusão de filme tubular para fabricação dos filmes com espessura $\sim 50 \mu\text{m}$. Posteriormente, o tecido de aramida e os filmes foram cortados, dispostos em camadas intercaladas e foram prensados a quente. Na etapa 1, avaliaram-se compósitos laminados, contendo filmes de PEAD e NCC em concentrações de 0, 0,5, 1 e 2% em massa. A partir da concentração definida na etapa 1, novos filmes com MMT e GNP e filmes híbridos contendo 0,5% de cada carga foram produzidos e caracterizados, incluindo a avaliação da adição de agente de acoplamento, sendo PEAD grafitizado com anidrido maleico. Na etapa 3, compósitos laminados com tecido de aramida e filmes nanoestruturados foram confeccionados e caracterizados. Na etapa 1, no ensaio de compressão dinâmica em barra Hopkinson (SHPB), a amostra contendo 1% de NCC apresentou um comportamento superior de dissipação de energia entre as demais, sendo 1,0% a concentração pré-definida para a produção dos demais filmes na etapa subsequente. Todas as amostras da etapa 1 foram enquadradas no nível balístico de proteção III-A. Os filmes apresentam superfície homogênea, com exceção das amostras contendo GNP, aumento na viscosidade com a adição das nanocargas, e um único evento térmico de perda de massa, em torno de 475°C . Os resultados para a resistência à tração mostram que a NCC e MMT reforçam o filme, enquanto a amostra contendo GNP apresenta maior cristalinidade (62%), apresenta valores inferiores ao PE puro. No ensaio de compressão dinâmica em barra Hopkinson, as amostras contendo 1% de NCC com anidrido maleico, 1% de MMT e 1% de GNP resultam em maiores valores de tensão e tenacidade, já as amostras híbridas não apresentam resultados satisfatórios. Na etapa 3, os compósitos laminados foram avaliados por SHPB, e além das amostras com NCC, MMT, e GNP, foram feitas amostras híbridas intercalando 1 filme de cada nanocarga. As amostras que se destacaram e obtiveram um comportamento de tensão e tenacidade superior em altas taxas de deformação, contribuindo para uma melhor dissipação de energia, foram aquelas contendo filme de PEAD com 1% de GNP e a amostra híbrida contendo filmes de PEAD com 1% de GNP e PEAD com 1% de NCC intercalados.

Palavras-chave: nanoplaquetas de grafeno, carbonato de cálcio, filmes de polietileno, compósitos laminados, desempenho balístico.

ABSTRACT

The advancement of tactical and military technologies makes enhancing armor systems such as vests and helmets essential, aiming for improved functionality, lower density, and increased flexibility. One strategy to enhance these properties involves replacing conventional materials with alternatives, such as commodity polymers, which are cost-effective and exhibit attractive mechanical, chemical, and thermal properties. The addition of nanofillers to polymeric matrices has gained prominence, enhancing the properties of materials known as nanocomposites, particularly in terms of mechanical and thermal properties. Notable nanofillers include calcium carbonate nanoparticles (NCC), montmorillonite clay (MMT), and graphene nanoplatelets (GNP), each with distinct morphology and characteristics. The use of calcium carbonate nanoparticles combined with thermoplastic polymers in ballistic applications was not found in the literature. The aim of this study was to evaluate the influence of different nanofillers (NCC, MMT and GNP) in high-density polyethylene (HDPE) films, and in laminated composites obtained with aramid fabric interleaved with reinforced HDPE films, through their potential for application in ballistic protection. The nanofillers and HDPE were mixed in twin-screw extrusion, followed by blown film extrusion to obtain a film with a thickness of $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$. The aramid fabric and films were cut and arranged in interleaved layers and hot pressed to produce the plates. The first multilayer plates, with HDPE films containing NCC in concentrations of 0, 0.5, 1, and 2% by mass, were evaluated in step 1. With the most effective concentration, new films with MMT and GNP were produced, including an evaluation of the addition of maleic anhydride. All nanostructured films were characterized in step 2. In step 3, laminated composites with aramid fabric and nanostructured films were manufactured and tested. In the first stage, dynamic compression testing using the Hopkinson bar (SHPB) revealed that the sample containing 1% of NCC exhibited superior energy dissipation behavior compared to others. The concentration 1% was predefined for subsequent film production. All samples in the first stage met ballistic protection level III-A. Hybrid films containing 0.5% of each filler were also produced in the second stage. The films exhibited a homogeneous surface, except for those containing GNP, an increase in viscosity with the addition of nanofillers, and a single thermal mass loss event at around $475\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tensile strength results indicated that NCC and MMT reinforced the film, whereas the GNP-containing sample, with higher crystallinity (62%), exhibited values lower than pure HDPE. In the Hopkinson bar dynamic compression test, samples containing 1% NCC with maleic anhydride, 1% MMT, and 1% GNP resulted in higher stress and toughness values. In contrast, hybrid samples did not yield satisfactory results. In the third stage, multilayered plates were evaluated by SHPB, and besides samples with NCC, MMT, and GNP, hybrid samples were created by interleaving one film of each nanofiller. Samples that stood out and exhibited superior stress and toughness behavior at high deformation rates, contributing to better energy dissipation in these composites, were those containing HDPE film with 1% GNP and the hybrid sample containing HDPE films with 1% GNP and HDPE with 1% NCC alternating interleaved.

Keywords: graphene nanoplatelets, calcium carbonate, polyethylene, composite laminates ballistic performance.