INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE GRAFENO NAS PROPRIEDADES ÓTICAS E DESEMPENHO MECÂNICO EM FILMES TUBULARES DE POLIETILENO

Henrique Amaral Silva[1] , Ruth M. C. Santana[1]

[1]*Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.*

Resumo: Foram processados e avaliados filmes tubulares de PE (polietileno) com e sem a adição de nanopartículas de grafeno dispersas em óleos. Foram extrusados filmes com espessuras de 30µm, 40µm, e 50µm, sendo um filme com a presença do grafeno e outro sem por espessura extrusada. A presença do grafeno não alterou nenhum parâmetro de extrusão. Os filmes com e sem grafeno foram caracterizados pelos ensaios de Espectometria de Infravermelho por Transformada de Fourier, colorimetria, brilho e resistência a tração. A adição das nanopartículas de grafeno aos filmes causou a melhoria das propriedades mecânicas tanto no regime elástico como plástico, e sem alteração significativa na cor dos filmes de extrusados. Em termos de propriedades óticas, se teve uma diferença considerável no brilho das amostras que foram aditivados.

Palavras-chave: filme compósito; PE; nanopartículas de grafeno;

INTRODUÇÃO

O grafeno é um material único, obtido com facilidade pela primeira vez em 2004 por Konstantin Novoselov e Andre Geim, a partir da esfoliação do grafite, deu começo a uma onda de pesquisas de produção e aplicações deste material. Constituído por uma camada bidimensional e hexagonal de carbonos sp^2, é o material mais fino existente com apenas 0,334nm de espessura. Na figura 1 está apresentada uma esquematização da estrutura do grafeno (URADE; LAHIRI; SURESH, 2022).

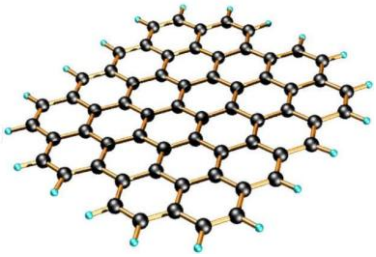


Figura 1: Representação da estrutura do grafeno (URADE; LAHIRI; SURESH, 2022)

É um material com propriedades únicas, sendo mais resistente que o aço, conduz calor melhor que cobre e eletricidade melhor que a prata. Devido a essas propriedades, vários estudos com o uso do grafeno em diversos setores tais como em capacitores, em reforço de cimento e no setor automotivo. Todos com o intuito de tornar os produtos mais eficientes e mais leves (RANDVIIR; BROWNSON; BANKS, 2014).

Polímeros são uma classe de materiais indispensável para a sociedade, estão presentes em diversos setores da indústria, como automotivo, eletrodoméstico, embalagens. Isso se deve ao baixo custo e versatilidade no processamento destes materiais. Os polímeros produzidos em maior escala são chamados de commodities sendo eles o PET, PE, PVC, PS e PP (ALRESHIDI *et al.*, 2025).

Destes polímeros, o PE é o que apresenta maior volume, cerca de 1/3 da produção mundial. É um polímero muito versátil, podendo apresentar características diferentes dependendo do tipo de estrutura obtida. Possui três principais categorias: Polietileno de alta densidade (PEAD), Polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno linear de baixa densidade (PELBD). Outras possíveis formas são o PE de ultra alta massa molecular, PE reticulado. Em 2023, foram produzidas 110 Mt de PE, com o principal mercado sendo o de embalagens (LIU *et al.*, 2025). Na Europa, se teve uma demanda de 20 Mt de polietilenos e 60% foi usado para o setor de embalagens, com a maior parte sendo utilizada para embalagens que não tem contato com alimento (TACKER *et al.*, 2025).

Desde o momento em que se começou a produção e utilização de polímeros, se estima que foram produzidas 8000 Mt e 6300 Mt foram descartadas para aterros, as ruas. Por ser o polímero mais produzido, também o PE é o mais descartado. Este acúmulo gera uma poluição que pode se espalhar como lixo ou usando boa parte dos aterros sanitários, poluindo áreas urbanas e podendo trazer riscos a ecossistemas (ZEIN *et al.*, 2022).

Com este cenário em crescimento conforme o tempo passa, muitos estudos estão focados em como reciclar e reaproveitar materiais poliméricos de forma

eficiente, seja por reciclagem mecânica, pirolise, uma vez que a quantidade de resíduo produzido é muito grande (ALRESHIDI *et al.*, 2025). Além destes estudos, já se procura maneiras de diminuir o consumo de matérias primas, com o pensamento econômico e ambiental que um menor uso de matérias primas pode trazer (DANUSHIKA *et al.*, 2026).

A partir desta ideia, vem se procurando formas de incorporar grafeno a polímeros, de modo a se beneficiar das ótimas propriedades que o grafeno tem e usá-las nos polímeros. A principal dificuldade é obter uma boa dispersão do grafeno na resina, para que na obtenção da peça desejada, o reforço do grafeno esteja de forma homogênea e não concentrada em algumas partes (BILISIK; AKTER, 2021).

Nesse sentido o objetivo de este trabalho é avaliar a influência da presença do grafeno no desempenho mecânico e nas propriedades óticas dos filmes.

MATERIAL E MÉTODOS

- Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram polietileno linear de baixa densidade (PELBD), polietileno de baixa densidade (PEBD) ambos da Braskem, polietileno de baixa densidade reciclado (PEBDr) da Recoplast e uma dispersão de grafeno disponibilizada pela Degrad Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda, que está apresentada na Figura 2.



Figura 2: Amostra de DGD Graphtek utilizada

Os filmes tubulares foram processados em uma empresa no interior do estado do Rio Grande do Sul. As formulações utilizadas e propriedades das resinas estão apresentadas na tabela 1 e tabela 2 respectivamente:

Formulação	PELBD (%)	PEBD (%)	PEBDr (%)	Grafeno Diperso (pcr)
Filmes s/ grafeno	60	20	20	0
Filmes c/ grafeno	60	20	20	0,1

Tabela 1: Formulações dos filmes processados.

Propriedades	PEBLD	PEBD	PEBDr
Índice de Fluidez (g/10min)	0,90	0,10-0,050	0,80
Densidade (g/cm^3)	0,918	0,919-0,930	0,921

Tabela 2: Propriedades das resinas utilizadas. Índice de fluidez é definido pela ASTM D1238-04c e densidade pela ASTM D792-08

A adição de grafeno foi de 0,1%, por exemplo uma grama da dispersão de grafeno em um kg de resina, da massa total utilizada das matérias primas (Figura 3). A homogeneização do grafeno foi feita por mistura simples por cerca de 20 minutos para garantia de que a homogeneização fosse bem-feita, conforme a figura 4.

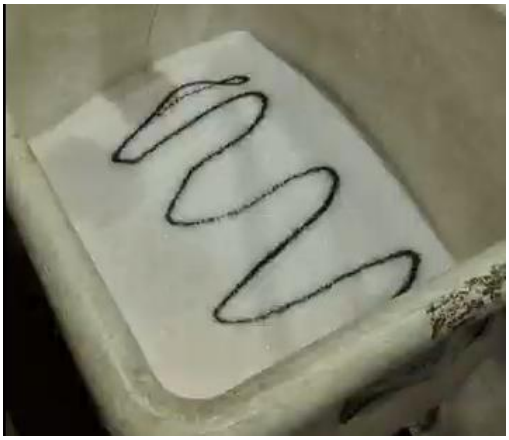


Figura 3: Imagem da resina com a dispersão de grafeno antes de ser misturado.



Figura 4: Imagem da mistura da resina com a dispersão de grafeno

A misturas foram extrusadas em filmes, em uma extrusora Carnevalli 50MM Os parâmetros de processamento da extrusora e perfil de temperatura estão apresentados nas tabelas 3 e 4 respectivamente:

Parâmetros	Valores
Velocidade da rosca	52 rpm
Diâmetro extrusora	100 mm
Razão de Sopro	1,43

Tabela 3: Parâmetros da extrusora utilizados nessa pesquisa.

Zonas	Temperatura (ºC)
1	160
2	180
3	200
4	200
5	200
Matriz	220

Tabela 4: Perfil de temperatura da extrusora

A adição do grafeno não implicou em nenhuma mudança nos parâmetros da extrusora. Uma diferença perceptível foi a melhor estabilidade do balão nos filmes que continham grafeno. A Figura 5 mostra a extrusão do filme tubular com grafeno com 50μm de espessura e na Figura 6 é mostrado o bobinamento do filme desse filme.

Uma diferença perceptível foi a melhor estabilidade do balão nas filmes que continham grafeno.



Figura 5: Extrusão do filme tubular com 50μm e grafeno



Figura 6: Bobinamento do filme com 50μm e grafeno

Os filmes tubulares extrusados com e sem grafeno de três espessuras diferentes: 30μm, 40μm e 50μm foram bobinados como mostrado na Figura 7. Estas seis amostras identificadas como F3SG, F3CG, F4SG, F4CG, F5SG e F5CG. As especificações de cada amostras estão apresentadas na tabela 5.

Amostra	Espessura (µm)	Mix PEs (pcr)	Dispersão Grafeno (pcr)
F3SG	30	100	0,0
F3CG	30	100	0,1
F4SG	40	100	0,0
F4CG	40	100	0,1
F5SG	50	100	0,0
F5CG	50	100	0,1

Tabela 5: Nomenclatura dos filmes avaliados



Figura 7: Filme bobinado com 50μm e grafeno

Caracterização

A análise de Espectrometria do Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi feita conforme norma ASTM 1252-21, gerando um gráfico entre 4000 cm^{-1} e 600 cm^{-1}, obtendo um espectro para análise da composição e identificação da dispersão de grafeno nos filmes.

A análise de brilho foi feita usando o equipamento QC BYK Micro-TRI-gloss, medindo o brilho em um ângulo de 60 graus. Assim é possível observar se a presença do grafeno altera algum aspecto na superfície do filme, conforme ASTM D .

Com o mesmo intuito, foi feita a análise de colorimetria com o equipamento espectrofotômetro portátil da marca BYK-Gardner, modelo spectro-guide sphere gloss, em fundo branco e preto, para que se tenha menor influência do fundo possível sobre os filmes analisados. O equipamento faz as medidas com geometria de esfera (d/º8). Foram determinadas as coordenadas L*, a* e b* conforme a norma ASTM D2244.

O ensaio de tração foi realizado para se verificar se a presença do grafeno iria trazer mudanças nas propriedades mecânicas dos filmes. O equipamento utilizado foi da marca Instron, modelo 3369, com taxa de deslocamento de 500 mm/min, os corpos de prova com 250mm de comprimento e 25mm de largura, conforme a norma ASTM D882.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- FTIR

Na Figura 8 são mostrados os espectros de FTIR-ATR sobrepostos das amostras avaliadas.

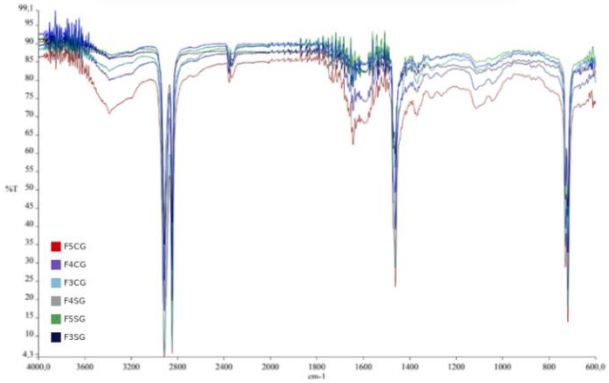


Figura 8. Espectros de FTIR-ATR das amostras avaliadas.

Verificasse que todas as amostras apresentaram uma pequena banda em torno de 3300 cm^{-1}, e a amostra F5CG apresentou uma banda um pouco maior, isso está atrelado as ligações O-H presentes no óleo. Se é observadas outras grandes bandas em 3000 cm^{-1} e 2900 cm^{-1}, esta região do espectro está relacionada a estrutura dos PE´s presentes, sendo o estiramento das ligações C-H. A próxima banda notável ocorre em cerca de 1400 cm^{-1}, que também está atrelada a estrutura do polímero, correspondendo a deformação das ligações CH_2. Por fim, a última banda presente também está relacionada ao polietileno, em cerca de 700 cm^{-1}, correspondendo ao balanço das ligações CH_2.

Portando, apesar de estar em quantidades mínimas ainda se pode observar que a presença das hidroxilas do óleo que presente na dispersão de grafeno, impacta no resultados desta análise. Em adição, não se vê nenhuma banda em relação a outros componentes que não os esperados no filme.

- Colorimetria

As propriedades óticas são muito importantes em filmes, portanto, é importante que o filme feito atenda as características desejadas para a sua aplicação, visto que tem impacto direto na recepção de algum produto,

como embalagens para alimentos ou sacolas para armazenar resíduo. Os filmes feitos têm a intenção de serem transparentes, então é importante que o grafeno consiga ser incorporado sem afetar de forma visível ao olho humano a cor da embalagem. Os resultados dos ensaios de colorimetria estão apresentados na tabela a seguir. Como os filmes são muito finos, a norma diz precisa que as análises sejam feitas em fundo branco e preto, a fim de se evitar qualquer interferência do fundo. Os resultados com o fundo preto estão apresentados na Tabela 6.

Amostras	L*	a*	b*
F3SG	37,38±0,22	-0,04±0,01	-0,98±0,03
F3CG	37,42±0,58	-0,12±0,09	-1±0,17
F4SG	37,13±0,43	-0,09±0,02	-1,3±0,14
F4CG	37,83±0,35	-0,09±0,02	-1,16±0,05
F5SG	37,23±0,45	-0,18±0,16	-1,38±0,21
F5CG	37,72±0,38	-0,10±0,07	-1,27±0,06

Tabela 6: Valores de colorimetria das amostras avaliadas com fundo preto

A dispersão de grafeno-apresenta a cor preta, o que afetaria principalmente o índice L que indica a luminosidade da amostra. Porém, não houve grandes mudanças neste aspecto, com os valores de todas as espessuras muitos próximos, devido ao baixo teor usado (0,1 pcr) na mistura de polietilenos.

Na Tabela 7 são apresentados os valores de colorimetria das amostras avaliadas com o fundo branco.

Amostras	L*	a*	b*
F3SG	92,8±0,13	0,06±0,04	-1,24±0,09
F3CG	92,54±0,25	0,08±0,02	-1,19±0,09
F4SG	92,68±0,27	0,06±0,01	-1,31±0,01
F4CG	91,98±0,17	0,01±0,02	-1,01±0,05
F5SG	92,33±0,39	0,06±0,01	-1,29±0,01
F5CG	92,22±0,11	0,12±0,07	-1,15±0,09

Tabela 7: Valores de colorimetria com fundo branco

Para as análises feitas com o fundo branco também teve nenhuma interferência a adição do grafeno em todas as espessuras extrusadas, principalmente no índice L.

Isto indica que a adição da dispersão de grafeno, no teor que foram feitos estes filmes, não apresenta nenhum risco de alteração das cores ou transparência dos filmes.

- Brilho

Assim como a cor, o brilho também é uma propriedade ótica importante, ainda mais considerando filmes transparentes.

Na figura 9 são apresentados os resultados da análise de brilho:

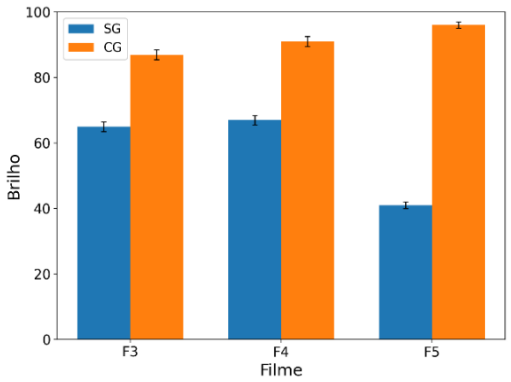


Figura 9. Resultados da análise de brilho das amostras avaliadas

Os resultados evidenciam que a presença do grafeno torna o filme mais brilhoso, com todos os pares apresentando um aumento significativo no brilho da amostra que provavelmente seja influenciado pelo meio oleoso onde se encontrava disperso o grafeno. O impacto no objetivo da embalagem desejada não é considerado significativo e assim não seria um impeditivo.

- Propriedade mecânica a tração

As principais propriedades ao fazer o filme são as propriedades mecânicas, é essencial para a aplicação saber qual a resistência do filme feito. Necessita ter resistência para não abrir durante o manuseio, transporte e utilização. Assim, a partir do ensaio de tração se extraiu as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 8, que correspondem ao regime elástico.

Filme	Módulo de Young (MPa)	Tensão no escoamento (MPa)	Deslocamento no escoamento (mm)
F3SG	67,67±4,04	120,10±4,81	134,33±4,93
F3CG	74,67±1,52	133,31±3,06	153,21±5,49
F4SG	72,75±1,56	112,17±2,24	143,33±2,98
F4CG	76,75±2,27	123,65±3,33	156,45±3,23
F5SG	77,02±5,94	107,92±3,19	145,19±4,46
F5CG	77,67±4,80	114,07±2,22	136,16±4,90

Tabela 8: Propriedades mecânicas do regime elástico das amostras avaliadas.

A adição do grafeno proporcionou um aumento de todas as propriedades da tabela acima, com o Módulo de Young sendo o de menor diferença entre as amostras.

Já na tensão de escoamento e no deslocamento já se tem um aumento mais significativo principalmente quando comparadas as amostras de 30μm de espessura, que se teve um aumento de 10,98% na tensão de escoamento e 14,05% no deslocamento. Assim, os filmes com grafeno são capazes de suportar esforços e absorver energia maiores do que sem grafeno.

Na tabela 9 são apresentados os resultados das propriedades do regime plástico:

Filme	Tensão de Ruptura (MPa)	Deslocamento na Ruptura (mm)
F3SG	117,49±5,58	188,09±12,48
F3CG	137,09±7,60	268,73±13,53
F4SG	115,65±4,88	440,03±12,90
F4CG	126,96±4,07	581,57±11,56
F5SG	112,04±4,07	115,06±8,48
F5CG	119,53±5,31	107,92±9,45

Tabela 9: Propriedades mecânicas do regime plástico.

Para o regime plástico também houve um aumento considerável na tensão de ruptura, com a mais significante sendo nas amostras de 30μm de espessura, que se teve um aumento de 16,68%.

Já para o deslocamento, houve um aumento grande na amostra de 40μm em relação ao filme sem grafeno, que se teve um aumento de 32,17%.

Estes dois aumentos indicam que as amostras com a dispersão grafeno também ficaram mais tenaz, podendo se deformar mais e suportar maiores energias, tendo menor chance de rasgo e ruptura por impacto quando transportando algum produto.

CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar de forma integrada os efeitos da adição de grafeno em filmes tubulares de polietilenos, evidenciando que a incorporação da dispersão de grafeno não apresentou mudança no processamento do filme e nem afetou não as cores dos filmes, porém houve uma mudança considerável do brilho.

Além disso, nas propriedades mecânicas houve uma melhora considerável, o que pode ser esperado com o grafeno disperso na matriz. Este aumento significa que o filme também ficaria mais resistente ao impacto, por exemplo, uma vez que houve um aumento na tenacidade dos filmes.

Por fim, a presença da dispersão de grafeno nestes filmes tubulares teve uma incorporação harmônica com a matriz polimérica, o que permitiu um aumento nas propriedades mecânicas sem que as propriedades óticas fossem muito afetadas. Permitindo que se tenha a produção de filmes mais finos, ou seja, com o uso menor da matéria prima. Outra possibilidade poderia ser ter o aumento do uso de resinas recicladas ao invés de matéria prima virgem, para se aumentar o consumo de material recuperado.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece às agências FAPERGS e CNPQ pelo apoio financeiro. Também ao Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL), ao Núcleo de Sustentabilidade (NS) pela estrutura disponível para realização da pesquisa e ao Matheus Jaskulski pelo apoio nas análises.

REFERÊNCIAS

URADE, Akanksha R.; LAHIRI, Indranil; SURESH, K. S. Graphene Properties, Synthesis and Applications: A Review. **JOM**, [*s. l.*], v. 75, n. 3, p. 614–630, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-022-05505-8. Acesso at: 29 May 2026.

ABBAS, Qaisar *et al.* Graphene Synthesis Techniques and Environmental Applications. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 21, p. 7804, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/21/7804. Acesso at: 29 May 2026.

RANDVIIR, Edward P.; BROWNSON, Dale A. C.; BANKS, Craig E. A decade of graphene research: production, applications and outlook. **Materials Today**, [*s. l.*], v. 17, n. 9, p. 426–432, 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114002144. Acesso at: 27 May. 2026

ALRESHIDI, Maha Awjan *et al.* Nanocatalytic upcycling of plastic waste: Advances in selective conversion technologies for sustainable high-value products recovery. **Results in Engineering**, [*s. l.*], v. 28, p. 107042, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025030981?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus. Acesso at: 27 May. 2026

LIU, Luo *et al.* Challenges of polyethylene (PE) biodegradation – A perspective. **Biotechnology Advances**, [*s. l.*], v. 85, p. 108717, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975025002034. Acesso at: 29 May 2026.

TACKER, Manfred *et al.* Life cycle assessment of polyethylene packaging and alternatives on the European market. **Cleaner Environmental Systems**, [*s. l.*], v. 17, p.

100270, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666789425000169. Acesso at: 28 May 2026.

ZEIN, Sharif H. *et al.* Pyrolysis of High-Density Polyethylene Waste Plastic to Liquid Fuels—Modelling and Economic Analysis. **Processes**, [*s. l.*], v. 10, n. 8, p. 1503, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-9717/10/8/1503. Acesso at: 27 May 2026.

ALRESHIDI, Maha Awjan *et al.* Nanocatalytic upcycling of plastic waste: Advances in selective conversion technologies for sustainable high-value products recovery. **Results in Engineering**, [*s. l.*], v. 28, p. 107042, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025030981. Acesso at: 28 May 2026.

Celine *et al.* Transforming Polyethylene into Water-Soluble Antifungal Polymers. **Macromolecules**, [*s. l.*], v. 56, n. 3, p. 815–823, 2023. Disponível em: Acesso at: 27 May. 2026.

DANUSHIKA, Gimhani *et al.* From Production to Market: Challenges and Opportunities of Graphene-Related Materials. **C**, [*s. l.*], v. 12, n. 2, p. 35, 2026. Disponível em: https://www.mdpi.com/2311-5629/12/2/35. Acesso at: 28 May 2026.

BILISIK, Kadir; AKTER, Mahmuda. Graphene nanocomposites: A review on processes, properties, and applications. **Journal of Industrial Textiles**, [*s. l.*], p. 152808372110242, 2021.