CAPÍTULO 35 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/xbvw7m47
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/3ytk7r68

MEMBRANAS DE POLIURETANO COM DERIVADOS DE GRAFENO PARA IMPERMEABILIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Julie Anne Braun [1,2]*, Gerson Parreira[3], Camila Maroneze[1,2], Ricardo J.E. Andrade [1,2]
*Autor de contato: julie.braun@protonmail.com

[1] Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil
[2]Instituto Mackenzie de Pesquisa em Grafeno e Nanotecnologias, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil
[3]Purcom Química, Barueri, São Paulo, Brasil

RESUMO
Este trabalho avalia membranas de poliuretano (PU) vegetal e sintético, com e sem nanoestruturas derivadas de grafeno (NPGs), para impermeabilização de estruturas de concreto. Foram analisadas alterações químicas por FTIR-ATR, morfologia por microscopia óptica, comportamento mecânico por tração e dureza Shore, molhabilidade por ângulo de contato e absorção de água. Experimentalmente, as NPGs aumentaram a resistência à tração e o ângulo de contato nas duas matrizes. A absorção de água diminuiu no PU vegetal (0,56% para 0,32%) e aumentou no PU sintético (1,53% para 2,14%), apesar do aumento da hidrofobicidade superficial. Essa divergência é interpretada como consequência da distinção entre resposta superficial (molhabilidade) e transporte volumétrico de água, possivelmente influenciada pela química da matriz e pela interface carga/polímero. Os resultados indicam que a matriz vegetal modificada apresenta o conjunto mais favorável de resistência, deformabilidade e baixa absorção para aplicações impermeabilizantes.

Palavras-chave: nanotecnologia; impermeabilização; grafeno; sustentabilidade.

ABSTRACT
This study evaluates bio-based and synthetic polyurethane (PU) membranes, with and without 0.05 wt.% graphene-derived nanostructures (NPGs), for waterproofing concrete structures. Chemical features (FTIR-ATR), morphology (optical microscopy), mechanical performance (tensile test and Shore hardness), wettability (water contact angle), and water absorption were assessed. Experimentally, NPGs increased tensile strength and water contact angle in both matrices. Water absorption decreased in the bio-based PU (0.56% to 0.32%) and increased in the synthetic PU (1.53% to 2.14%), despite the higher surface hydrophobicity. This divergence is interpreted as evidence that surface wettability and bulk water uptake are distinct phenomena, likely governed by matrix chemistry and filler/polymer interfacial effects. Overall, the graphene-modified bio-based PU showed the most favorable balance between strength, deformability, and low water absorption for waterproofing applications.

Keywords: nanotechnology; waterproofing; graphene; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de impermeabilização são componentes de durabilidade, pois reduzem a entrada de água, CO_2, O_2 e íons agressivos no concreto, limitando carbonatação, corrosão de armaduras e perda de estanqueidade. Membranas poliméricas aderidas ao substrato são relevantes nesse contexto por combinar barreira física e capacidade de acomodar deformações do suporte. Entre esses materiais, os poliuretanos (PUs) destacam-se pela versatilidade química resultante da combinação entre isocianatos e polióis, permitindo ajustar rigidez, alongamento, adesão, resistência à abrasão e comportamento frente à água (AKINDOYO et al., 2016; DAS; MAHANWAR, 2020). No Brasil, membranas de PU são empregadas em lajes e coberturas, com requisitos de desempenho estabelecidos pela ABNT NBR 15487-1:2023. Entretanto, a durabilidade de membranas expostas permanece condicionada à degradação por radiação UV, ciclos térmicos, molhagem/secagem, fissuração do substrato e alterações na rede polimérica (YANG et al., 2001; PELZ; KARLOVŠEK, 2022). O desafio não é apenas elevar uma propriedade isolada, mas obter simultaneamente resistência mecânica, deformabilidade e baixa absorção de água.

Nanocargas carbonáceas, como o grafeno e derivados, têm sido usadas para modificar PUs por mecanismos de transferência de carga, aumento de tortuosidade e alteração de energia superficial (ZHU et al., 2021; TAYOURI et al., 2022; CHEN et al., 2023, 2024). Ainda assim, a literatura permanece concentrada em matrizes específicas e nem sempre distingue propriedades superficiais, como ângulo de contato, de propriedades volumétricas, como absorção de água. Essa distinção é crítica para impermeabilização: uma superfície mais hidrofóbica não implica, necessariamente, menor absorção volumétrica se houver microvazios, baixa compatibilidade interfacial ou grupos polares acessíveis à água. Além disso, ainda são escassas comparações diretas entre matrizes bio-baseadas e fósseis, preparadas sob uma mesma lógica estequiométrica, com baixo teor de derivados de grafeno e foco em estruturas de concreto.

Assim, este trabalho avalia, comparativamente, membranas de PU vegetal e PU sintético com e sem NPGs, correlacionando química, morfologia observável, comportamento mecânico, molhabilidade e absorção de água, com foco em aplicações de impermeabilização de estruturas de concreto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Grafeno e derivados como carga funcional em poliuretanos

O grafeno é uma folha bidimensional de carbono sp^2 com elevada área superficial e razão de aspecto. Em PUs, derivados de grafeno podem atuar como reforço quando há boa dispersão e interação interfacial, favorecendo transferência de tensão e possível aumento do caminho difusivo para água e gases (CHEN et al., 2023; SINH; LUONG; SEPPÄLÄ, 2019). Contudo, esse efeito é dependente da matriz, do teor de carga e do estado de aglomeração; portanto, ganhos mecânicos ou de barreira não devem ser tratados como consequência automática da adição da nanocarga.

A química superficial também é decisiva. O óxido de grafeno contém grupos oxigenados capazes de interagir por ligações de hidrogênio com segmentos polares do PU, mas esses mesmos grupos podem aumentar afinidade por água quando permanecem acessíveis no volume do compósito (BASKAKOV et al., 2023). Redução, funcionalização ou alteração topográfica podem elevar o ângulo de contato, mas tal resposta descreve a superfície e não substitui ensaios de absorção ou transporte de água (ZHAO et al., 2022; YARI et al., 2021).

2.2 Membranas de PU para impermeabilização e durabilidade

Revestimentos poliméricos reduzem o transporte de água, gases e íons no concreto, retardando carbonatação e ingresso de cloretos (ALMUSALLAM et al., 2003; PAN et al., 2017b). Em membranas de PU, o desempenho depende do equilíbrio entre continuidade da camada, aderência, deformabilidade, resistência mecânica e estabilidade ambiental. Ensaios de tração, dureza, molhabilidade e absorção de água, embora não substituam avaliações de campo, permitem identificar tendências relevantes para seleção de sistemas impermeabilizantes.

2.3 Sustentabilidade: PUs bio-baseados e extensão de vida útil

A sustentabilidade em impermeabilização deve ser tratada por dois eixos complementares: conteúdo renovável da formulação e potencial de extensão de vida útil. PUs derivados de óleos vegetais reduzem parcialmente a dependência de matéria-prima fóssil e podem apresentar bom desempenho mecânico quando formulados adequadamente (DIMIAN et al., 2017; SU et al., 2023). Contudo, sem indicadores completos de ciclo de vida, a contribuição ambiental deve ser apresentada como potencial, não como comprovação absoluta.

2.4 Síntese crítica da literatura

Em síntese, os estudos disponíveis indicam que PUs, polióis renováveis e derivados de grafeno são rotas tecnicamente promissoras, mas ainda há lacunas quanto à comparação direta entre matrizes vegetal e sintética em membranas de impermeabilização, especialmente na relação entre dispersão, propriedades mecânicas, molhabilidade superficial e absorção volumétrica. Esta pesquisa se posiciona nessa lacuna ao avaliar, sob baixo teor de NPGs, como a mesma estratégia de nanomodificação produz respostas distintas em duas matrizes de PU voltadas à proteção e impermeabilização de estruturas de concreto.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Foram avaliadas membranas de poliuretano (PU) de duas matrizes: (i) PU vegetal, formulado com óleo de mamona in natura como poliol natural, sem modificação química (funcionalidade nominal = 2,70; índice de hidroxila = 167,39 mg KOH g^{-1}; viscosidade = 710 mPa.s; massa molar nominal ≈ 928 g mol^{-1}); e (ii) PU sintético, formulado com poliol poliéter iniciado por glicerina (funcionalidade nominal = 3,00; índice de hidroxila = 176,07 mg KOH g^{-1}; viscosidade = 271,90 mPa.s; massa molar nominal ≈ 1000 g mol^{-1}). O componente isocianato foi um MDI pré-polimérico (ISOPUR R9650®), com teor de NCO de 22,66% e viscosidade de 853,30 mPa.s. Também foram empregados catalisador amínico terciário (ADIPUR AMN 20052) e dessecante de peneira molecular (Baylith SG 232), todos fornecidos pela Purcom Química (Brasil).

As NPGs consistiram em óxido de grafeno liofilizado, obtido pelo método de Hummers modificado e produzido pelo Instituto MackGraphe (patente BR 10 2023 0104886). O material apresenta razão ID/IG ≈ 1,0, espaçamento interlamelar de 0,88 nm e comprimentos laterais entre 0,965 e 28,09 μm. Não foi aplicada funcionalização química adicional. O número médio de camadas não foi determinado neste estudo; por isso, a discussão morfológica restringe-se à dispersão observável e à presença de aglomerados.

3.2 Métodos de preparo das membranas e caracterização

3.2.1 Preparo das membranas

Em cada matriz, foram preparadas duas formulações: PU puro e PU com nanostruturas derivadas do grafeno. A formulação modificada foi obtida pela adição de um teor otimizado de derivado grafênico, mantido constante ao longo do estudo. O teor exato não é apresentado por se tratar de composição em avaliação para proteção intelectual, sem prejuízo da análise comparativa entre as matrizes avaliadas. O cálculo estequiométrico adotou índice NCO/OH = 1,10. Para a formulação vegetal de referência, os percentuais em massa foram 61,97% de óleo de mamona, 35,61% de isocianato, 0,19% de catalisador e 1,24% de absorvedor de umidade; para a matriz sintética, a massa de isocianato foi ajustada a partir do índice de hidroxila do poliol poliéter, mantendo-se o índice NCO/OH. As NPGs foram previamente dispersas no poliol por agitação mecânica, seguida de tratamento em banho ultrassônico por 3 minutos. Em seguida, foram adicionados o catalisador e o dessecante, mantendo-se a homogeneização da mistura. Por último, incorporou-se o isocianato, com mistura manual por 3 minutos. A mistura foi vertida em moldes planos para cura ao ar por 7 dias à temperatura de 23 ± 2 °C. Após o período de cura, os corpos de prova foram recortados conforme a geometria de cada ensaio. A espessura média das membranas foi de 1,00 ± 0,15 mm.

3.2.2 Métodos de ensaio

A caracterização química foi conduzida por FTIR-ATR (Shimadzu IRAffinity-1S), na faixa de 4000 a 600 cm^{-1}, resolução de 4 cm^{-1} e 16 varreduras por amostra. A morfologia foi avaliada por microscopia óptica (Nikon Eclipse LV100ND), em magnificações de 5 e 20 vezes, limitada à identificação de heterogeneidades e aglomerados visíveis. O comportamento mecânico foi avaliado conforme ASTM D638, com corpos de prova tipo IV (espessura 1,00 ± 0,15 mm), máquina universal Shimadzu, célula de carga de 10 kgf, distância entre garras de 30 mm, velocidade de 50 mm min^{-1} e no mínimo cinco corpos de prova por formulação. A dureza Shore A e D foi determinada conforme ASTM D2240-15. O ângulo de contato foi medido em equipamento Krüss DSA 100, com água deionizada, gota de 2 µL, a 21 ± 2 °C e 50 ± 5% de umidade relativa, totalizando 60 medições por formulação. A absorção de água foi determinada conforme ABNT NBR 15487-1:2023, por imersão em água deionizada a 23 °C por 7 dias, em corpos de prova de 10 × 30 × 2 mm, sendo calculada por $A(\%) = [(m_f - m_i)/m_i] \times 100$, em que m_ié a massa inicial seca e m_fa massa após imersão e secagem superficial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

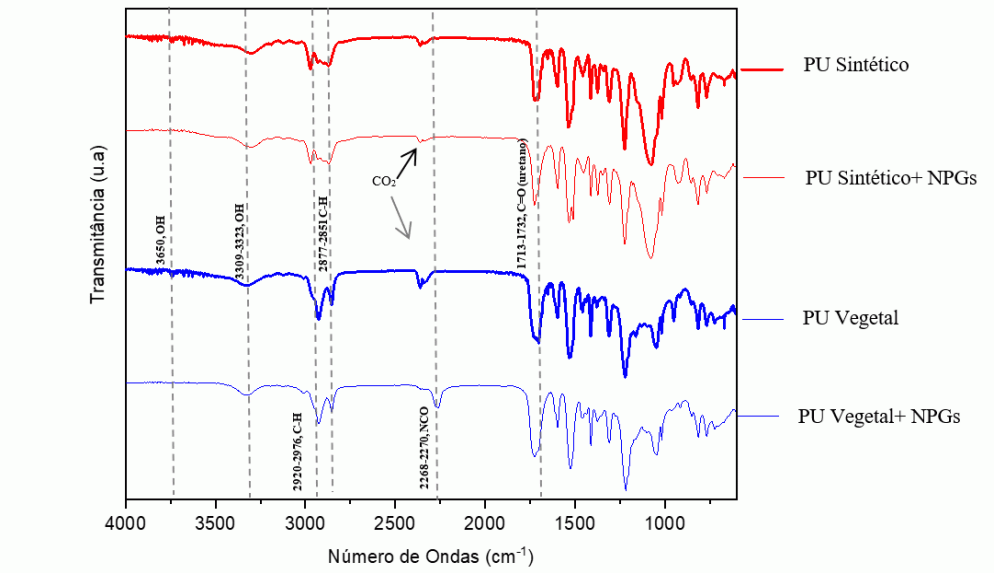
4.1 Análise química por FTIR-ATR

Os espectros FTIR-ATR (Figura 1) apresentaram bandas características de PUs, incluindo O–H/N–H (≈3300 cm^{-1}), C–H alifático (≈2970 e 2870 cm^{-1}), carbonila de uretano (≈1713 cm^{-1}) e bandas associadas a C–N/N–H. Essas assinaturas indicam formação de ligações uretano nas matrizes vegetal e sintética (COUTINHO; DELPECH, 1999).

Na formulação vegetal com NPGs, a banda em ≈2268 cm^{-1}, atribuída ao grupo NCO, foi observada na primeira leitura e deixou de ser detectada após 24 h. Esse comportamento é interpretado como efeito cinético de cura, e não como evidência de NCO residual permanente. A literatura reporta

que a banda de NCO em torno de 2270 cm^{-1} é sensível ao consumo de isocianato durante a formação de uretano e pode variar conforme umidade, mobilidade dos reagentes e interfaces do filme (LUDWIG; URBAN, 1996; WONG; BADRI, 2012). Assim, a repetição do FTIR após 24 h reforça que a reação avançou até consumo do NCO detectável por ATR nas condições analisadas.

Figura 1 - Espectros FTIR-ATR das membranas de PU vegetal e PU sintético, com e sem NPGs.

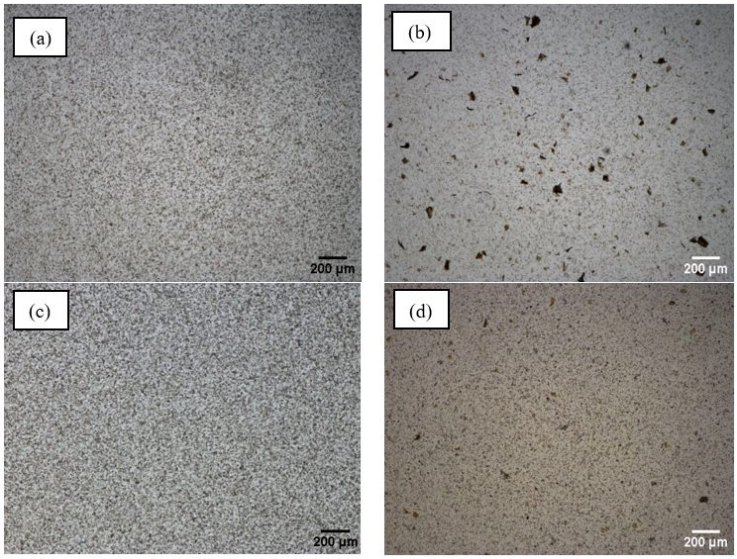


Fonte: os autores.

4.2 Morfologia e dispersão das NPGs

A microscopia óptica a 5× (Figura 2) evidencia diferenças de dispersão em escala micrométrica. No PU vegetal com NPGs, observam-se regiões mais heterogêneas e aglomerados visíveis; no PU sintético com NPGs, a distribuição aparenta maior homogeneidade.

Figura 2 - Micrografias ópticas (5×): (a) PU vegetal; (b) PU vegetal + NPGs; (c) PU sintético; (d) PU sintético + NPGs.

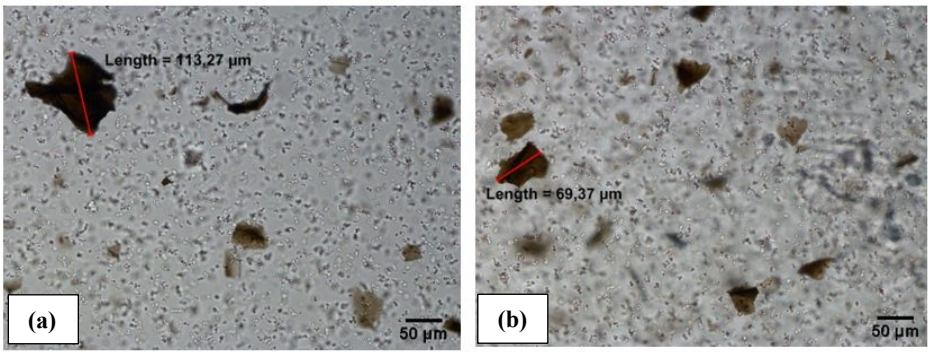


Fonte: os autores.

A heterogeneidade observada no PU vegetal não implica, necessariamente, menor afinidade química entre a matriz de mamona e as NPGs. O óleo de mamona contém grupos hidroxila e carbonila capazes de interagir com os grupos oxigenados das NPGs por ligações de hidrogênio e interações dipolares. Assim, a menor uniformidade de dispersão pode estar associada, ao menos em parte, à maior viscosidade inicial do óleo de mamona (710 mPa·s) em relação ao poliol poliéter (271,90 mPa·s). Portanto, a matriz vegetal apresenta viscosidade aproximadamente 2,6 vezes maior, o que tende a reduzir a eficiência do cisalhamento durante a mistura e dificultar a desaglomeração das nanoestruturas.

Em 20 vezes de magnificação (Figura 3), as dimensões laterais aparentes dos aglomerados foram estimadas em 113,27 µm para o PU vegetal e 69,37 µm para o PU sintético. Esses valores descrevem aglomerados micrométricos observáveis, não o tamanho primário das NPGs. Portanto, sua interpretação deve ser restrita ao estado de dispersão aparente da nanocarga nas membranas.

Figura 3 - Micrografias ópticas (20×) com dimensão lateral aparente das NPGs/agregados no PU vegetal (a) e no PU sintético (b).



Fonte: os autores.

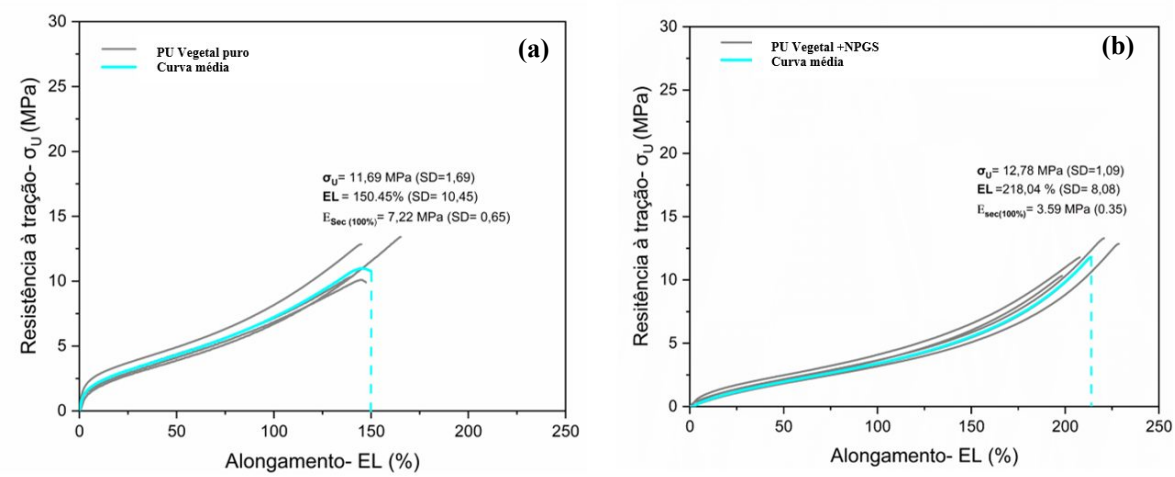
4.3 Propriedades mecânicas

4.3.1 Resistência à tração e alongamento

As curvas de tensão-deformação (Figuras 4a e 4b) indicam comportamento dúctil. No PU vegetal, a adição de NPGs elevou a resistência à tração de 11,69 ± 1,69 MPa para 12,78 ± 1,09 MPa (+9%) e o alongamento na ruptura de 150,45 ± 10,45% para 218,04 ± 8,80% (+45%), enquanto o módulo secante a 100% diminuiu de 7,22 ± 0,65 MPa para 3,59 ± 0,35 MPa. O resultado indica ganho simultâneo de resistência e deformabilidade, sem aumento de rigidez, o que pode estar associado à modulação da rede segmentada do PU e à dissipação de energia durante a deformação. Como a microscopia indica aglomerados, não se atribui esse comportamento exclusivamente à dispersão da nanocarga.No PU sintético (Figuras 5a e 5b), as NPGs aumentaram a resistência à tração de 11,17 ± 1,29 MPa para 13,54 ± 2,83 MPa (+21%) e o alongamento de 134,53 ± 9,63% para 169,15 ± 6,60% (+26%), com variação limitada do módulo secante a 100% (7,84 ± 0,87 MPa para 7,53 ± 1,55 MPa). A combinação entre maior resistência e manutenção da rigidez é compatível com reforço em baixo teor de carga.

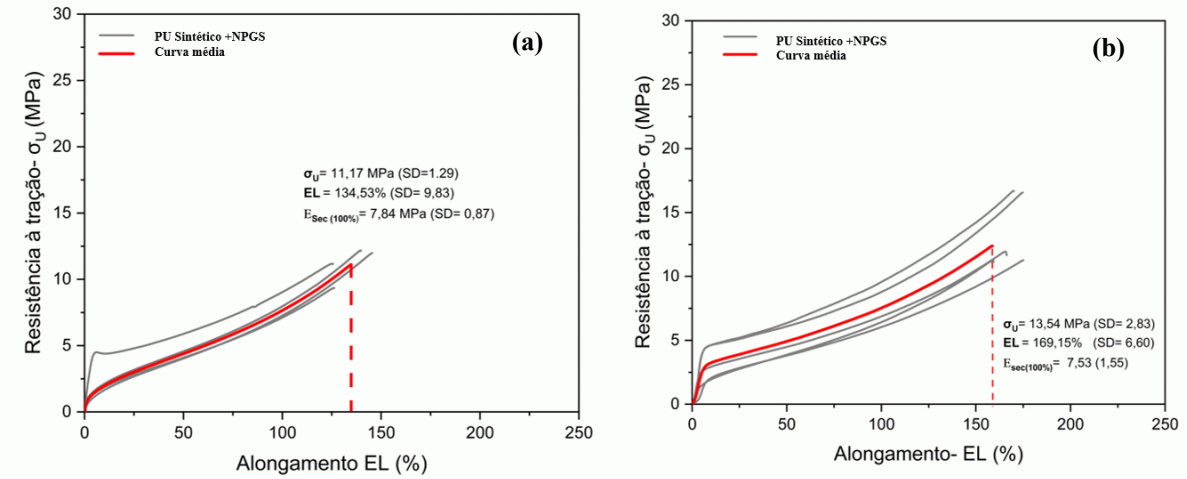
A comparação das curvas médias (Figura 6), à luz da classificação de Callister (2018), sugere que o PU vegetal com NPGs se desloca para resposta mais elastomérica, enquanto as demais formulações mantêm perfil mais próximo de polímeros plásticos dúcteis. Para impermeabilização, esse ganho de deformabilidade é relevante porque pode favorecer a acomodação de movimentações do substrato, embora a capacidade de ponteamento de fissuras (*crack bridging ability-CBA*) deva ser confirmada por ensaios específicos.

Figura 4 - Curvas tensão-deformação do PU vegetal (a) e do PU vegetal + NPGs (b).



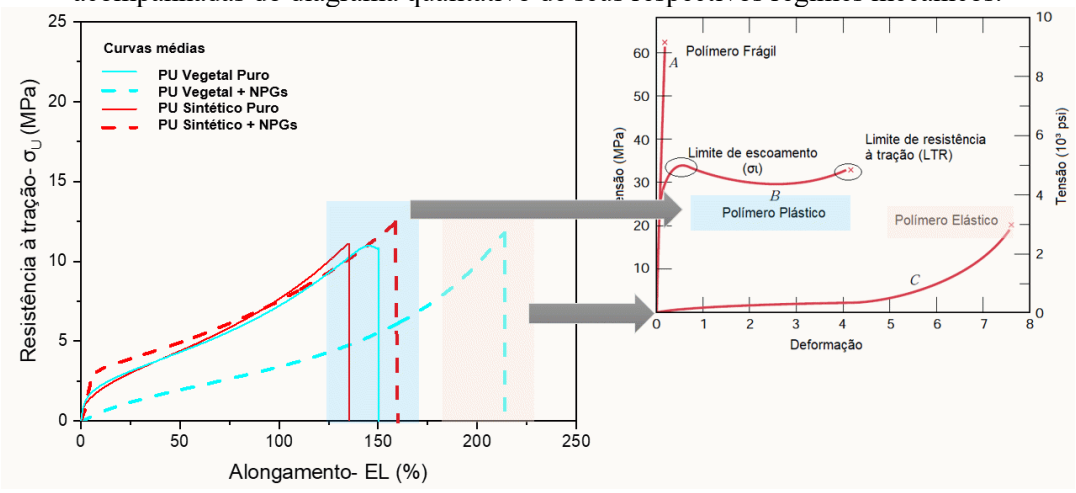
Fonte: os autores.

Figura 5 - Curvas tensão-deformação do PU sintético (a) e do PU sintético + NPGs (b).



Fonte: os autores.

Figura 6 - Curvas representativas de tensão versus deformação para as matrizes poliméricas, acompanhadas do diagrama qualitativo de seus respectivos regimes mecânicos.



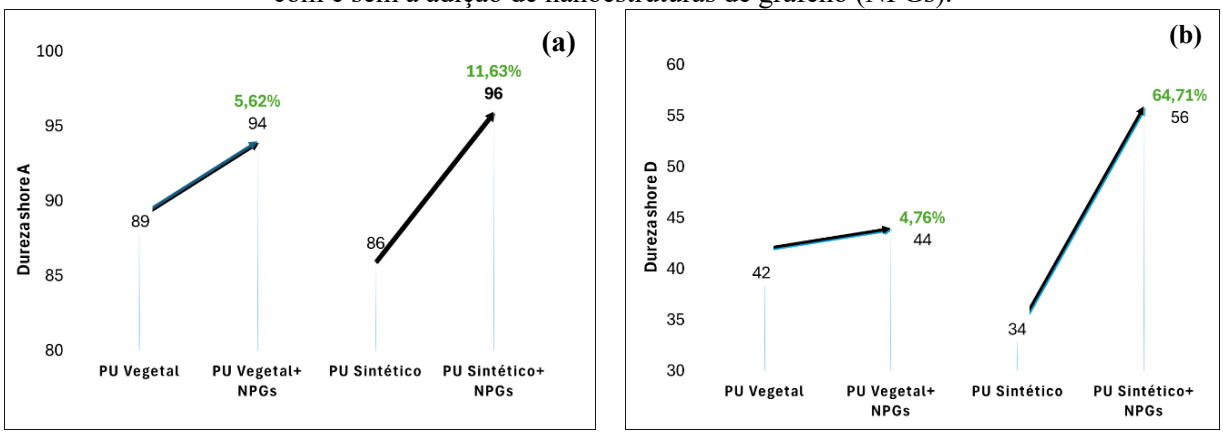
Fonte: os autores (curvas) e adaptado de CALLISTER (2018).

4.3.2 Dureza Shore A e Shore D

A Figura 7 apresenta a dureza Shore A e Shore D. Na escala Shore A, o PU vegetal variou de 89 ± 1 para 94 ± 1 com NPGs (+5,62%) e o PU sintético de 86 ± 1,73 para 96 ± 1 (+11,63%). Na escala Shore D, o PU vegetal variou de 42 ± 1 para 44 ± 1 (+4,76%) e o PU sintético de 34 ± 1 para 56 ± 1 (+64,71%).

O aumento de dureza é coerente com a presença de fase rígida dispersa e maior restrição local à deformação. O ganho em Shore D no PU sintético pode indicar transferência de tensão mais eficiente ou maior contribuição de regiões rígidas, em consonância com a literatura sobre reforço de poliuretanos por cargas grafênicas em baixo teor (CHEN et al., 2023).

Figura 7 - Valores médios de dureza Shore A (a) e Shore D (b) dos compósitos de PU (vegetal e sintético) com e sem a adição de nanoestruturas de grafeno (NPGs).



Fonte: os autores.

4.4 Molhabilidade: ângulo de contato

A Tabela 1 e a Figura 8 apresentam os ângulos de contato com água. O PU vegetal puro apresentou 81,05 ± 3,02°, valor superior ao do PU sintético puro (58,73 ± 2,04°). Com NPGs, o PU vegetal atingiu 90,06 ± 3,23° e o PU sintético 79,74 ± 5,77°. Assim, a adição de NPGs aumentou experimentalmente a hidrofobicidade superficial nas duas matrizes, com o PU vegetal modificado atingindo o limiar usual de superfície hidrofóbica ($\theta \geq 90°$). A diferença entre as matrizes pode ser relacionada à composição química. O PU vegetal contém longos segmentos alifáticos derivados do óleo de mamona, que tendem a reduzir a energia superficial, embora a rede também contenha grupos polares. O PU sintético, por sua vez, apresentou maior molhabilidade inicial, indicando superfície mais favorável à interação com água.

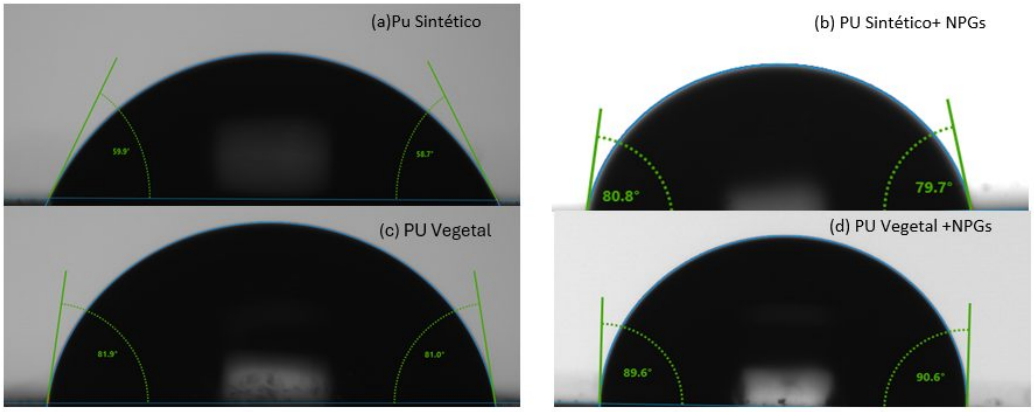
Convém distinguir essa resposta superficial do comportamento volumétrico. O ângulo de contato descreve a interação inicial gota/superfície e é afetado por energia superficial, composição da camada externa e rugosidade. Ele não mede, isoladamente, a difusão de água pelo volume da membrana, que depende de polaridade interna, microvazios, conectividade de caminhos e interface carga/matriz. O incremento do ângulo de contato após a incorporação das NPGs pode estar associado à alteração da energia superficial e à formação de rugosidade micro/nanométrica, mecanismos descritos para PUs modificados com materiais carbonáceos (YARI et al., 2021; SUTHAR et al., 2022; OGUZ et al., 2023).

Tabela 1 – Valores médios de ângulo de contato com água deionizada para as membranas de poliuretano (PU) vegetal e sintético, puras e modificadas com NPGs.

PU	Ângulo de contato (°)	Desvio padrão (°)
Vegetal	81,05	3,02
Vegetal + NPGs	90,06	3,23
Sintético	58,73	2,04
Sintético + NPGs	79,74	5,77

Fonte: os autores.

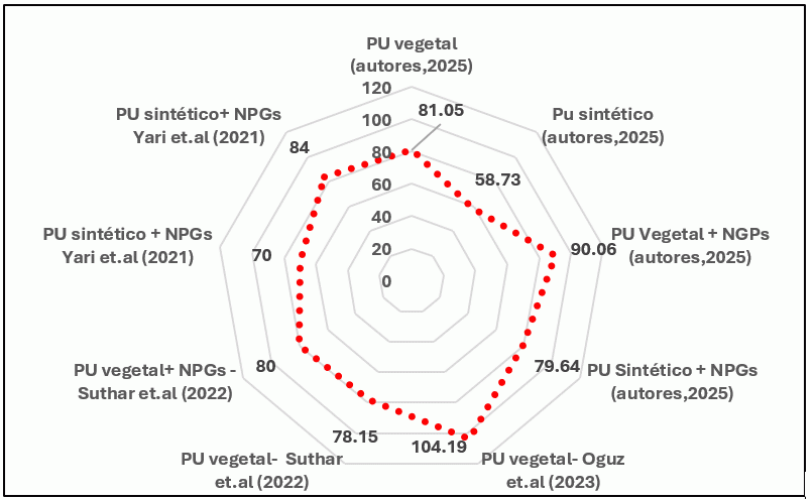
Figura 8 - Imagens representativas do ensaio de ângulo de contato utilizando água deionizada sobre as diferentes superfícies poliméricas: (a) PU sintético (controle); (b) PU sintético modificado com NPGs; (c) PU vegetal (controle); e (d) PU vegetal modificado com NPGs.



Fonte: os autores.

A eficácia das nanoestruturas de grafeno como agente promotor de hidrofobicidade está em consonância com o comportamento reportado na literatura, conforme ilustrado na Figura 9, corrobora a tendência dessas nanoestruturas carbonáceas de elevar o ângulo de contato em matrizes poliméricas.

Figura 9 - Comparação de ângulos de contato obtidos neste estudo com valores reportados na literatura para PUs e nanocompósitos com grafeno.

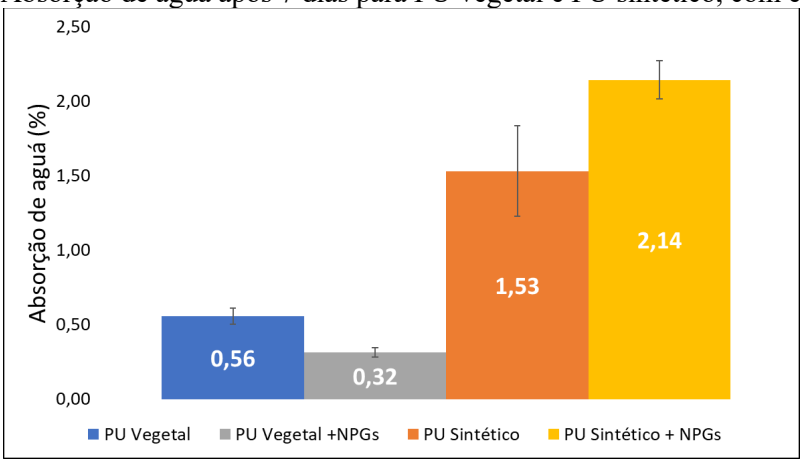


Fonte: os autores, a partir de YARI et al. (2021), SUTHAR et al. (2022) e OGUZ et al. (2023).

4.5 Absorção de água

A Figura 10 apresenta a absorção de água após 7 dias. O PU vegetal apresentou menor absorção em relação ao PU sintético (0,56% contra 1,53%), em coerência com sua maior hidrofobicidade superficial e com a contribuição dos segmentos alifáticos da matriz vegetal.

Figura 10 - Absorção de água após 7 dias para PU vegetal e PU sintético, com e sem NPGs.



Fonte: os autores.

Por outro lado, com a incorporação de NPGs, a absorção do PU vegetal diminuiu para 0,32% (redução de ~43%). Esse comportamento pode ser relacionado ao efeito de barreira descrito para nanocargas lamelares, nas quais a elevada razão de aspecto aumenta a tortuosidade do caminho difusivo da água no interior da matriz polimérica (LIANG et al., 2023). No caso do PU vegetal, esse efeito tende a ser favorecido pelo caráter predominantemente hidrofóbico das cadeias alifáticas do óleo de mamona, que reduz a afinidade global da rede pela água. Assim, mesmo havendo grupos polares na matriz e nas NPGs, a combinação entre matriz menos hidrofílica e fase lamelar dispersa pode dificultar a penetração e a retenção de água no volume da membrana.

No PU sintético, a absorção aumentou para 2,14% (+40%), apesar do maior ângulo de contato. Esse resultado reforça que molhabilidade superficial e absorção volumétrica dependem de fenômenos distintos: o ângulo de contato é controlado pela energia superficial e pela topografia da interface ar/sólido, enquanto a absorção depende da conectividade interna, da afinidade química da rede polimérica e da presença de caminhos difusivos no volume. A literatura sobre PU/GO mostra que grupos oxigenados presentes no óxido de grafeno podem aumentar a afinidade por água quando permanecem acessíveis na matriz, sobretudo se houver microvazios, interfaces mal compactadas ou alterações locais de microfaseamento (BASKAKOV et al., 2023). Portanto, no PU sintético, as NPGs podem ter elevado a hidrofobicidade aparente da superfície, mas simultaneamente favorecido maior retenção hídrica no volume por efeitos interfaciais e pela acessibilidade de grupos polares da nanocarga.

5. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que a incorporação de nanoestruturas derivadas do grafeno altera de forma distinta membranas de PU vegetal e sintético. Em ambas as matrizes, houve aumento de resistência à tração, alongamento e ângulo de contato; contudo, a absorção de água diminuiu apenas na matriz vegetal, enquanto aumentou na matriz sintética. A resposta mais favorável para impermeabilização foi observada no PU vegetal com NPGs, que combinou maior deformabilidade, resistência

mecânica compatível, aumento de dureza e menor absorção de água. No PU sintético, a nanocarga elevou resistência, alongamento e dureza, mas o aumento da absorção indica que a melhoria superficial não garante redução do transporte volumétrico de água.

Do ponto de vista tecnológico, os resultados reforçam a viabilidade de membranas de PU modificadas com derivados de grafeno para proteção de estruturas de concreto, desde que a seleção da matriz considere simultaneamente comportamento mecânico, molhabilidade e absorção. O uso de poliol de origem vegetal representa potencial redução parcial de dependência fóssil, mas sua contribuição ambiental deve ser quantificada futuramente por indicadores de ciclo de vida e desempenho em serviço.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Purcom Química, à CAPES e ao Fundo de Pesquisa Mackenzie (Projeto Mackpesquisa, nº 231021) pelo apoio ao desenvolvimento do estudo.

7. REFERÊNCIAS

AKINDOYO, J. O.; BEG, M. D. H.; GHAZALI, S.; ISLAM, M. R.; JEYARATNAM, N.; YUVARAJ, A. R. **Polyurethane types, synthesis and applications - a review**. RSC Advances, v. 6, n. 115, p. 114453-114482, 2016. DOI: 10.1039/C6RA14525F.

ALMUSALLAM, A. A.; KHAN, F. M.; DULAIJAN, S. U.; AL-AMOUDI, O. S. B. **Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability**. Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 4-5, p. 473-481, 2003. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00087-2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575:2021 - **Edificações habitacionais - desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15487-1:2023**. **Membrana de poliuretano para impermeabilização — Requisitos mínimos de desempenho — Parte 1: Lajes e coberturas em geral**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023

BASKAKOV, S. A. et al. **Mechanical and water absorption properties of waterborne polyurethane/graphene oxide composites**. Materials, v. 16, n. 1, 2023. DOI: 10.3390/ma16010178.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 4. ed. LTC, 2018.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA S478: Durability in buildings**. Toronto: CSA, 2019.

CHEN, Q. et al. **Boosting of polyurethane elastomer nanocomposites by low doped graphene**. FlatChem, v. 42, 2023. DOI: 10.1016/j.flatc.2023.100582.

CHEN, Q. et al. **The reinforcement of polyurethane by mini-sized graphene with superior performances**. Chemical Engineering Journal, v. 482, 2024. DOI: 10.1016/j.cej.2024.148668.

COUTINHO, F. M. B.; DELPECH, M. C. **Poliuretanos como materiais de revestimento de superfície**. Polímeros, v. 9, n. 1, p. 41-48, 1999. DOI: 10.1590/S0104-14281999000100006.

DAS, A.; MAHANWAR, P. **A brief discussion on advances in polyurethane applications**. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, v. 3, n. 3, p. 93-101, 2020. DOI: 10.1016/j.aiepr.2020.07.002.

DIMIAN, A. C. et al. **Innovative design and simulation of a castor oil biorefinery**. In: COMPUTER AIDED CHEMICAL ENGINEERING. Amsterdam: Elsevier, 2017. v. 40, p. 1111-1116. DOI: 10.1016/B978-0-444-63965-3.50187-2.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1504-2:2004 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures: definitions, requirements,**

quality control and evaluation of conformity - Part 2: Surface protection systems for concrete. CEN, 2004.

LIANG, G. et al. **Improvement of mechanical properties and solvent resistance of polyurethane coating by chemical grafting of graphene oxide**. Polymers, v. 15, n. 4, p. 882, 2023. DOI: 10.3390/polym15040882.

LUDWIG, B. W.; URBAN, M. W. Quantitative determination of isocyanate concentration in crosslinked polyurethane coatings. Journal of Coatings Technology, v. 68, n. 857, p. 93-100, 1996.

OGUZ, B.; HAYRI-SENEL, T.; KAHRAMAN, E.; NASUN-SAYGILI, G. **Improving corrosion resistance and electrical conductivity of sunflower oil based polyurethane coatings by graphene oxide/reduced graphene oxide. Polymer Testing**, v. 124, 2023. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108057.

PAN, X. et al. **A review on surface treatment for concrete - Part 2: Performance. Construction and Building Materials**, v. 133, p. 81-90, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128.

PELZ, U.; KARLOVŠEK, J. **Spray-applied waterproofing membranes in tunnelling: application and research directions in Australia. Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 122, 2022. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104364.

SINH, L. H.; LUONG, N. D.; SEPPÄLÄ, J. **Enhanced mechanical and thermal properties of polyurethane/functionalised graphene oxide composites by in situ polymerisation**. Plastics, Rubber and Composites, v. 48, n. 10, p. 466-476, 2019. DOI: 10.1080/14658011.2019.1664820.

SU, Y. et al. **High-performance castor oil-based polyurethane thermosets: facile synthesis and properties**. Reactive and Functional Polymers, v. 183, 2023. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105496.

SUTHAR, V.; ASARE, M. A.; DE SOUZA, F. M.; GUPTA, R. K. **Effect of graphene oxide and reduced graphene oxide on the properties of sunflower oil-based polyurethane films**. Polymers, v. 14, n. 22, p. 4974, 2022. DOI: 10.3390/polym14224974.

TAYOURI, M. I. et al. **Degradation of polymer nanocomposites filled with graphene oxide and reduced graphene oxide nanoparticles: a review of current status**. Polymer Degradation and Stability, v. 206, 2022. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110179.

TSUKAGOSHI, M.; MIYAUCHI, H.; TANAKA, K. **Protective performance of polyurethane waterproofing membrane against carbonation in cracked areas of mortar substrate**. Construction and Building Materials, v. 36, p. 895-905, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.072.

WONG, C. S.; BADRI, K. H. Chemical analyses of palm kernel oil-based polyurethane prepolymer. Materials Sciences and Applications, v. 3, p. 78-86, 2012. DOI: 10.4236/msa.2012.32012.

YANG, X. F. et al. **Weathering degradation of a polyurethane coating**. Polymer Degradation and Stability, v. 74, p. 341-351, 2001.

YARI, H.; MAHDAVIAN, M.; RAMEZANZADEH, B.; MAHMUDZADEH, M. **Enhanced outdoor durability of polyurethane nanocomposite coatings with green reduced graphene oxide nanoplatelets**. Progress in Organic Coatings, v. 154, p. 106212, 2021. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106212.

ZHAO, H. et al. **Recent advances in superhydrophobic polyurethane: preparations and applications**. Advances in Colloid and Interface Science, v. 303, p. 102644, 2022. DOI: 10.1016/j.cis.2022.102644.

ZHU, X. et al. **Current advances of polyurethane/graphene composites and its prospects in synthetic leather: a review**. European Polymer Journal, v. 161, 2021. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110837.