FLEXIBILIZAÇÃO DE RESINAS EPÓXI PARA A UTILIZAÇÃO EM COMPÓSITOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Autores: Rafaela Nanao Kaneko Ishii, Ariandy Botezini, Erika Peterson Gonçalves

[1]Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, rafaelankaneko@gmail.com, ariandybotezinii@hotmail.com.

Resumo
As resinas epóxi são amplamente utilizadas devido às suas excelentes propriedades mecânicas, químicas e térmicas. Entretanto, sua elevada rigidez está associada à fragilidade, limitando algumas aplicações estruturais. Nesse contexto, a flexibilização das matrizes epoxídicas é uma estratégia para aumentar a tenacidade, a resistência ao impacto e a dissipação de energia. Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre os principais métodos de flexibilização de resinas epóxi aplicadas a compósitos, incluindo elastômeros, termoplásticos, nanopartículas, flexibilizantes reativos e sistemas híbridos. Os estudos analisados indicam melhorias nas propriedades mecânicas e estruturais, embora possam ocorrer alterações na rigidez e na temperatura de transição vítrea. Entre as estratégias avaliadas, os sistemas híbridos apresentam grande potencial por promoverem equilíbrio entre tenacidade, resistência mecânica e estabilidade térmica. Conclui-se que a escolha do modificador deve considerar os requisitos da aplicação, sendo a combinação de diferentes estratégias promissora para o desenvolvimento de compósitos estruturais avançados.
Palavras-chave: resina epóxi. flexibilização. tenacidade. compósitos. modificadores poliméricos.

Área do Conhecimento: Engenharias Aeronáuticas

Introdução

A resina epóxi é um dos materiais poliméricos mais versáteis e importantes na indústria atual por conta de suas propriedades mecânicas, químicas e térmicas. A aplicação da resina em diversos setores como: aeronáutica, automobilístico, civil, eletrônica e de revestimentos industriais evidenciam sua relevância tecnológica e econômica. As razões pelas quais esse material é largamente utilizado estão associadas à sua elevada resistência mecânica, aderência, capacidade de adaptação a diferentes processos e durabilidade (LEE; NEVILLE, 1967; MAY, 1988).

O desenvolvimento das resinas epóxi teve início em 1916, quando o químico suíço Pierre Castan sintetizou o poliglicidiéter, a primeira resina epóxi sólida, essa descoberta se deu por conta do interesse do suíço em estudar reações químicas envolvendo epóxi e poliaminas. A resina no estado sólido foi a pioneira para a produção das resinas líquidas usadas atualmente, o que faz com que a descoberta tenha representado um marco importante para a área de materiais, principalmente por suas propriedades únicas e versáteis, dadas por consequência da sua estrutura molecular ser capaz de reagir com outros compostos (MAY, 1988).

Durante as décadas de 1940 e 1950, os avanços nessa área levaram ao desenvolvimento da resina epóxi, houve novas formulações proporcionando diferentes níveis de viscosidade, resistência e tempo de cura. Esses aprimoramentos ampliaram significativamente as aplicações industriais do material, consolidando a resina epóxi como um componente essencial em diversas áreas da engenharia e tecnologia (LEE; NEVILLE, 1967; MAY, 1988).

Nesse contexto, a flexibilização das matrizes surge como uma estratégia para modificar o comportamento mecânico do material, promovendo aumento da tenacidade, melhoria na resistência ao impacto e maior capacidade de dissipação de energia. Esse processo pode ser realizado por meio da incorporação de agentes flexibilizantes, elastômeros, termoplásticos, nanopartículas e outros modificadores capazes de alterar os mecanismos de deformação da matriz polimérica sem comprometer significativamente suas propriedades estruturais (KINLOCH, 2003; JOHNSEN et al., 2007).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a flexibilização de resinas epóxi aplicadas em compósitos, abordando os principais métodos de

modificação, os mecanismos envolvidos e os efeitos dessas alterações sobre as propriedades mecânicas, térmicas e estruturais dos materiais, buscando compreender os avanços científicos e tecnológicos relacionados ao tema.

Metodologia

A elaboração desta revisão fundamenta-se em publicações científicas nacionais e internacionais relacionadas às modificações estruturais e físico-químicas de matrizes epoxídicas, com o objetivo de promover melhorias na tenacidade, resistência ao impacto e capacidade de deformação desses materiais.

A busca bibliográfica foi realizada por meio de combinações de palavras-chave como “resina epóxi”, “flexibilização”, “tenacificação”, “epoxy resin”, “polymer modification” e “composites”, entre outros termos em português e inglês. Foram selecionados artigos que abordassem modificações em matrizes epoxídicas por meio da incorporação de elastômeros, termoplásticos, nanopartículas, flexibilizantes reativos e sistemas híbridos, com foco nos efeitos dessas modificações sobre as propriedades mecânicas, térmicas e estruturais dos materiais.

Após a seleção dos trabalhos, foi realizada uma análise comparativa das diferentes estratégias de flexibilização. Os parâmetros considerados incluíram tenacidade, resistência ao impacto, módulo elástico, temperatura de transição vítrea (Tg), estabilidade térmica e potencial de aplicação em materiais compósitos.

Além da comparação dos resultados obtidos pelos diferentes autores, foram analisados os mecanismos responsáveis pelas melhorias observadas nas propriedades das resinas epóxi. Também foram avaliadas as vantagens e limitações de cada método de flexibilização, visando identificar as técnicas com maior potencial para aplicação em compósitos estruturais.

Por fim, os dados extraídos dos artigos foram sintetizados em tabelas comparativas, permitindo relacionar os diferentes agentes modificadores utilizados, as condições experimentais adotadas e os principais ganhos ou perdas observados nas propriedades dos materiais. Dessa forma, foi possível estabelecer uma discussão crítica sobre a eficiência das metodologias encontradas na literatura, bem como sobre as tendências atuais de desenvolvimento na área.

Resultados

A análise dos estudos selecionados demonstrou que a flexibilização de resinas epóxi constitui uma estratégia amplamente empregada para reduzir a fragilidade dessas matrizes poliméricas. De modo geral, os trabalhos revisados evidenciaram que a incorporação de agentes modificadores promove melhorias na tenacidade e na resistência ao impacto, características importantes para aplicações em compósitos estruturais (Kinloch, 2003; Johnsen et al., 2007; Domun et al., 2015; Zhang et al., 2018; Bagheri, Marouf e Pearson, 2009; Marouf et al., 2016; Kausar, 2020; Rafiee et al., 2019; Kinloch et al., 1989; Chen et al., 2025).

Os principais métodos de flexibilização identificados na literatura incluem o uso de elastômeros, termoplásticos de alto desempenho, nanopartículas cerâmicas e nanomateriais carbonosos, nanocelulose, flexibilizantes reativos e sistemas híbridos. Suas principais características, vantagens, limitações e aplicações são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1- Principais estratégias de flexibilização de resinas epóxi e seus efeitos nas propriedades dos materiais.

Método de flexibilização	Agente modificador	Principais vantagens	Principais limitações	Aplicações em compósitos
Elastômeros	CTBN, ATBN e borrachas líquidas funcionalizadas	Elevado aumento da tenacidade e resistência ao impacto	Redução da rigidez e da temperatura de transição vítrea (Tg) em altas concentrações	Compósitos estruturais sujeitos a impacto
Termoplásticos de	PSU, PEI e PEEK	Aumento da	Maior custo e	Componentes

alto desempenho		tenacidade com menor perda de propriedades térmicas	processamento mais complexo	aeronáuticos e automotivos
Nanopartículas cerâmicas	Nano-SiO_2, Al_2O_3 e TiO_2	Melhora simultânea da resistência mecânica e estabilidade térmica	Possível aglomeração das partículas	Compósitos estruturais avançados
Nanomateriais carbonosos	Grafeno e nanotubos de carbono	Elevada resistência mecânica, elétrica e térmica	Dificuldade de dispersão homogênea	Materiais multifuncionais de alta performance
Nanocelulose	Nanocristais e nanofibras de celulose	Fonte renovável, baixa densidade e aumento da resistência mecânica	Sensibilidade à umidade	Compósitos sustentáveis
Flexibilizantes reativos	Éteres glicidílicos e derivados epoxídicos flexíveis	Boa compatibilidade química com a matriz	Possível redução da Tg e da rigidez	Adesivos e revestimentos
Sistemas híbridos	Elastômeros + nanopartículas ou termoplásticos + nanopartículas	Equilíbrio entre tenacidade, resistência e estabilidade térmica	Maior complexidade de formulação	Compósitos estruturais de alto desempenho

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Chen et al. (2025), Domun et al. (2015), Johnsen et al. (2007), Kausar (2020), Kausar e Ahmad (2024), Kinloch (2003), Marouf et al. (2016), Rafiee et al. (2009) e Zhang et al. (2018).

Os estudos também demonstraram que diferentes estratégias de modificação apresentam efeitos distintos sobre as propriedades das matrizes epoxídicas. Os elastômeros foram associados principalmente ao aumento da tenacidade e da resistência ao impacto, enquanto os termoplásticos apresentaram potencial para melhorar a tenacidade com menor comprometimento das propriedades térmicas (Bagheri e Pearson, 2000; Bagheri, Marouf e Pearson, 2009; Chen et al., 2025; Johnsen et al., 2007; Kausar, 2020; Kinloch, 2003; Marouf et al., 2016).

As nanopartículas e os nanomateriais carbonosos apresentaram potencial para promover melhorias simultâneas nas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. Entretanto, a eficiência desses modificadores esteve relacionada à qualidade da dispersão e da interface com a matriz (Domun et al., 2015; Dommelen et al., 2016; Marouf et al., 2016; Rafiee et al., 2009; Rafiee et al., 2019).

Os sistemas híbridos também apresentaram resultados promissores, especialmente pela possibilidade de combinar diferentes mecanismos de reforço e tenacificação. A associação entre elastômeros e nanopartículas, por exemplo, apresentou potencial para aumentar simultaneamente a tenacidade e a resistência mecânica (Chen et al., 2025; Kausar, 2020; Kausar e Ahmad, 2024; Marouf et al., 2016; Zhang et al., 2018).

Em compósitos reforçados com fibras de carbono, vidro e aramida, os estudos analisados indicaram melhorias na resistência ao impacto e na resistência interlaminar, além de redução da suscetibilidade à delaminação (Kinloch et al., 1989; Soutis, 2005).

Discussão

Os estudos também demonstraram que diferentes estratégias de modificação apresentam efeitos distintos sobre as propriedades das matrizes epoxídicas. Os elastômeros foram associados

principalmente ao aumento da tenacidade e da resistência ao impacto, enquanto os termoplásticos apresentaram potencial para melhorar a tenacidade com menor comprometimento das propriedades térmicas (Bagheri e Pearson, 2000; Bagheri, Marouf e Pearson, 2009; Chen et al., 2025; Johnsen et al., 2007; Kausar, 2020; Kinloch, 2003; Marouf et al., 2016).

As nanopartículas e os nanomateriais carbonosos apresentaram potencial para promover melhorias simultâneas nas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. Entretanto, a eficiência desses modificadores esteve relacionada à qualidade da dispersão e da interface com a matriz (Domun et al., 2015; Dommelen et al., 2016; Marouf et al., 2016; Rafiee et al., 2009; Rafiee et al., 2019).

Apesar dos benefícios proporcionados pela incorporação de agentes modificadores às matrizes epoxídicas, sua aplicação também apresenta desafios relacionados ao processamento, tanto em escala laboratorial quanto industrial. A adição de nanopartículas, por exemplo, pode provocar um aumento expressivo da viscosidade inicial da mistura antes da cura, dificultando etapas como a homogeneização, a desgaseificação e o processamento do material. Além disso, a tendência à aglomeração desses nanomateriais exige a utilização de métodos específicos de dispersão física ou química, como ultrassonicação e funcionalização de superfície, visando melhorar sua distribuição e interação com a matriz polimérica (Dommelen et al., 2016; Jojibabu et al., 2020; Rafiee et al., 2019). Dessa forma, o controle das condições de processamento constitui um fator fundamental para garantir a eficiência dos modificadores e a obtenção das propriedades desejadas no compósito.

Os sistemas híbridos também apresentaram resultados promissores, especialmente pela possibilidade de combinar diferentes mecanismos de reforço e tenacificação. A associação entre elastômeros e nanopartículas, por exemplo, apresentou potencial para aumentar simultaneamente a tenacidade e a resistência mecânica (Chen et al., 2025; Kausar, 2020; Kausar e Ahmad, 2024; Marouf et al., 2016; Zhang et al., 2018).

Em compósitos reforçados com fibras de carbono, vidro e aramida, os estudos analisados indicaram melhorias na resistência ao impacto e na resistência interlaminar, além de redução da suscetibilidade à delaminação (Kinloch et al., 1989; Soutis, 2005).

Conclusão

A revisão da literatura realizada permitiu verificar que a flexibilização de resinas epóxi constitui uma estratégia fundamental para ampliar o desempenho de materiais compósitos utilizados em aplicações estruturais. Os diversos métodos analisados demonstraram potencial para reduzir a fragilidade característica das matrizes epoxídicas, promovendo aumentos significativos na tenacidade, resistência ao impacto e capacidade de absorção de energia.

Entre as estratégias identificadas, os elastômeros destacam-se pela elevada eficiência no aumento da resistência à fratura, enquanto os termoplásticos de alto desempenho possibilitam ganhos de tenacidade com menor comprometimento das propriedades térmicas. Além disso, o uso de nanopartículas e nanomateriais tem proporcionado melhorias simultâneas em propriedades mecânicas, térmicas e, em alguns casos, elétricas. Os sistemas híbridos mostraram-se particularmente promissores por combinarem os benefícios de diferentes agentes modificadores, alcançando um equilíbrio mais adequado entre resistência, rigidez e estabilidade térmica.

Apesar dos avanços observados, verificou-se que não existe uma solução universal capaz de atender simultaneamente a todos os requisitos de desempenho. Dessa forma, a seleção da estratégia de flexibilização deve ser realizada de acordo com os objetivos desejados para o material final. Por fim, conclui-se que o desenvolvimento de novos modificadores, técnicas de funcionalização e sistemas híbridos continuará desempenhando papel extremamente necessário na evolução dos compósitos poliméricos, contribuindo para sua utilização em setores tecnológicos cada vez mais exigentes, como os segmentos aeronáutico, automobilístico e de engenharia estrutural.

Referências

BAGHERI, R.; MAROUF, B. T.; PEARSON, R. A. Rubber-toughened epoxies: a critical review. *Polymer Reviews*, v. 49, n. 3, p. 201–225, 2009.

BAGHERI, R.; PEARSON, R. A. Role of particle cavitation in rubber-toughened epoxies: I. Microvoid toughening. *Polymer*, v. 41, n. 1, 2000.

CHEN, X.; YU, R.; YUAN, X.; WANG, X. Toughening epoxy resins: recent advances in network architectures and rheological behavior. *Polymer*, v. 334, 128770, 2025.
DOMMELEN, J. A. W. et al. Mechanical, thermal, and electrical properties of graphene-epoxy nanocomposites—a review. *Polymers*, v. 8, n. 8, 281, 2016.
DOMUN, N. et al. Improvement of fracture toughness of epoxy nanocomposites using carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, v. 121, 2015.
JOHN SEN, B. B. et al. Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers. *Polymer*, v. 48, n. 2, 2007.
JOJIBABU, P.; ZHANG, Y. X.; PRUSTY, B. G. A review of research advances in epoxy-based nanocomposites as adhesive materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 96, 102454, 2020.
KAUSAR, A. Rubber toughened epoxy-based nanocomposite: a promising pathway toward advanced materials. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, v. 57, n. 7, p. 499–511, 2020.
KAUSAR, A.; AHMAD, I. State-of-the-art epoxy vitrimer nanocomposites with graphene, carbon nanotube and silica—fundamentals and applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2024.
KINLOCH, A. J. Toughening epoxy adhesives to meet today's challenges. *MRS Bulletin*, v. 28, n. 6, 2003.
KINLOCH, A. J. et al. Interlaminar fracture toughness and toughening of laminated composite materials: a review. *Composites*, v. 20, n. 5, p. 423–435, 1989.
LEE, H.; NEVILLE, K. *Handbook of epoxy resins*. New York: McGraw-Hill, 1967.
MAROUF, B. T.; MAI, Y.-W.; BAGHERI, R.; PEARSON, R. A. Toughening of epoxy nanocomposites: nano and hybrid effects. *Polymer Reviews*, v. 56, n. 1, p. 70–112, 2016.
MAY, C. A. *Epoxy resins: chemistry and technology*. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1988.
NEVES, R. M.; ORNAGHI JR., H. L.; ZATTERA, A. J.; AMICO, S. C. Recent studies on modified cellulose/nanocellulose epoxy composites: a systematic review. *Carbohydrate Polymers*, v. 255, 117366, 2021.
RAFIEE, M. A. et al. Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content. *ACS Nano*, v. 3, n. 12, 2009.
RAFIEE, R. et al. Graphene and carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites: a review. *Polymer*, v. 180, 121724, 2019.
SOUTIS, C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 41, n. 2, 2005.
ZHANG, J. et al. Synergistic effects of hybrid toughening agents on epoxy resin systems: a review. *Composites Part B: Engineering*, v. 136, 2018.