INFLUÊNCIA DO TEOR DE CARDANOL E EPOXICARDANOL NAS PROPRIEDADES FLEXURAIS DE BLENDAS COM DGEBA

Autores: Jaqueline Rodrigues Cindra de Lima Souza[1], Técio da Silva de Souza[1]; Noan Tonini Simonassi[2], Felipe Perissé Duarte Lopes[2]

[1]Instituto Federal de Educação do Espírito Santo, Avenida Rio Branco, Santa Lúcia - 29056-255 - Vitória – ES, Brasil, jrsouza@ifes.edu.br.tssouza@ifes.edu.br.
[2]Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000 Parque Califórnia, Campos - RJ, Brasil CEP: 28013-602, Brasil, noantoninisimonassi@gmail.com; perisse@uenf.br.

Resumo
A substituição parcial de resinas epóxi petroquímicas por matérias-primas renováveis tem sido uma estratégia para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico em flexão de resinas à base de DGEBA com substituição parcial por cardanol e epoxicardanol. Para isso, foram confeccionadas blendas de DGEBA com 0 a 50% dos componentes renováveis, as quais foram curadas com endurecedor amínico à temperatura ambiente e pós-cura a 60 °C por 2 horas. As propriedades mecânicas sob flexão foram avaliadas a partir das curvas tensão-deformação, com determinação dos módulos secante e elástico. Os resultados indicaram redução da rigidez com o aumento do teor de substituinte, sendo esse efeito mais acentuado nas blendas com cardanol. Ambos os substituintes apresentaram potencial para o desenvolvimento de sistemas epóxi parcialmente renováveis com diferentes aplicações, o cardanol favorecendo a maior deformabilidade, enquanto o epoxicardanol proporciona maior retenção da rigidez.
Palavras-chave: DGEBA. Cardanol. Epoxicardanol. Resinas termorrígidas. Materiais biobaseados.

Área do Conhecimento: Engenharias

Introdução

As resinas epóxi são uma importante classe de polímeros termorrígidos amplamente utilizadas em aplicações industriais e tecnológicas, como adesivos, revestimentos, encapsulantes e matrizes poliméricas, devido à elevada resistência química e mecânica, estabilidade térmica e excelente adesividade (Almutairi, 2024; Dallaev et al., 2023; Kandola et al., 2022; Shundo et al., 2022). Entre os sistemas comerciais, destacam-se as resinas à base de diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), reconhecidas pela versatilidade e pelo alto desempenho após a cura. Apesar dessas vantagens, as resinas à base de DGEBA são de origem petroquímica, o que tem motivado a busca por alternativas sustentáveis a partir de fontes renováveis (Da Silva et al., 2023; Schaulet et al., 2024).

Diversos subprodutos da agroindústria, como o Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC), têm sido explorados como fontes renováveis para o desenvolvimento de materiais poliméricos. Obtido durante o processamento das castanhas de caju, o LCC contém uma mistura complexa de compostos fenólicos, entre eles o cardanol, o qual pode ser funcionalizado para obtenção de derivados, como epoxicardanol, ampliando suas possibilidades de aplicação em sistemas epóxi (Lawan et al., 2024; Nwuzor et al., 2021; Da Silva et al., 2023; Iliyasu et al., 2023; Lawan et al., 2024; Nwuzor et al., 2021).

A utilização de cardanol e epoxicardanol em sistemas à base de DGEBA pode, contudo, alterar o desempenho das resinas em função das diferenças estruturais entre os componentes, especialmente pela presença de cadeias alifáticas longas, capazes de influenciar a mobilidade molecular e o comportamento mecânico do material (Kinaci et al., 2020). Essas diferenças estruturais, associadas ao teor de substituição, podem resultar em alterações na rigidez, resistência e deformabilidade (Ladarola, 2025). Nesse sentido, a análise do comportamento em flexão permite avaliar a influência da composição sobre a rigidez e o desempenho mecânico do material.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento em flexão de resinas à base de DGEBA com substituição parcial por cardanol ou epoxicardanol, buscando estabelecer relações entre a composição dos sistemas e suas propriedades mecânicas.

Metodologia

O cardanol utilizado neste trabalho foi adquirido da empresa Resibras e o epoxidardanol foi sintetizado a partir da reação do cardanol com peróxido de hidrogênio e ácido fórmico. Para confecção das resinas, o cardanol e o epoxicardanol foram separadamente combinados com a resina epóxidica DGEBA nas proporções 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em massa. A metodologia de preparo das resinas foi baseada em estudos realizados por Gong *et al*. (2023), com adaptações, complementada por ensaios preliminares.

Para confecção dos corpos de prova foi feita a mistura entre resina epóxi AV 1005 (DGEBA) e os derivados do LCC (cardanol e epoxicardanol) de acordo com as proporções pré-definidas. Após homogeneização e repouso por cerca de 30 minutos, foi adicionado o endurecedor SQ 3131 (amina alifática modificada) na razão equivalente 1:1 (1 equivalente epóxi resina: 1 equivalente hidrogênio ativo amina). Imediatamente após a adição do endurecedor, a mistura foi homogeneizada cuidadosamente por 3 minutos e vertida em moldes de silicone, previamente lubrificados com vaselina líquida, com dimensões 73 mm x 16 mm x 5 mm. Os corpos de prova foram curados por 24 horas em temperatura ambiente, seguido de desmolde e pós cura por 2 horas à 60°C. A formulação da resina epoxídica DGEBA foi nomeada de A (0%), as blendas com epoxicardanol de B (10%), C (20%), D (30%), E (40%) e F(50%), e as blendas com cardanol G (10%), H (20%), I (30%), J (40%) e K (50%).

Após 7 dias, os corpos de prova foram lixados para ajuste dimensional e ensaiados em máquina universal de ensaios (INSTRON, Modelo 5582) de acordo com a norma ASTM D790 (ASTM, 2017), utilizando o método de três pontos, com velocidade de 1,6 mm/min em temperatura controlada de 25°C. A aplicação da carga prosseguiu até que uma deformação máxima de 5,0% fosse atingida (8 mm). Durante o ensaio foram registrados continuamente os valores de força aplicada (F) e deflexão no ponto central (δ), permitindo a obtenção da curva carga–deflexão.

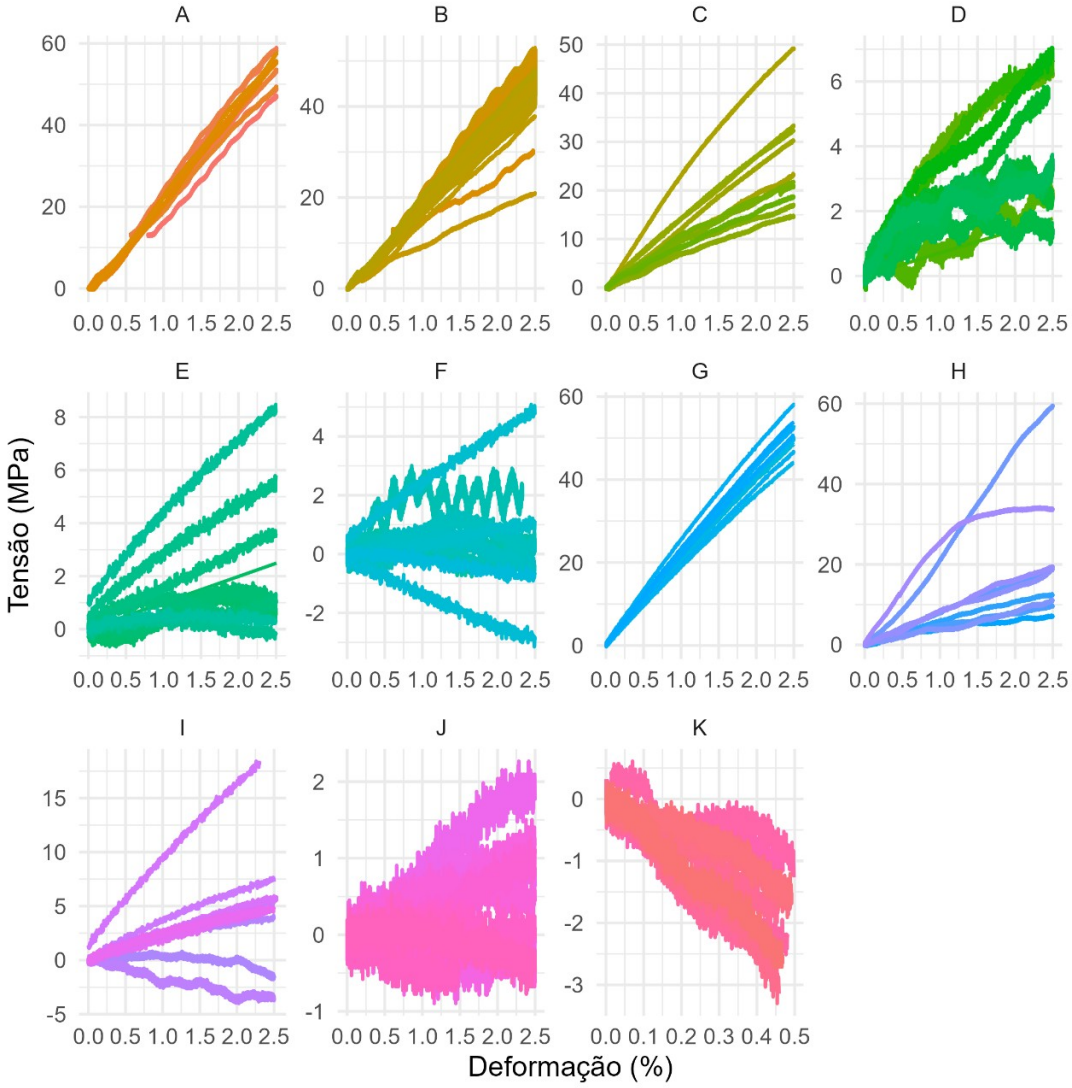
A partir desses dados foram calculadas a tensão de flexão (σf) e a deformação em flexão (εf) pelas relações $\sigma f = 3FL/(2bd^2)$ e $\varepsilon f = 6d\delta/L^2$, em que F é a carga aplicada (N), L é o vão entre os apoios (mm), b é a largura do corpo de prova (mm), d é a espessura do corpo de prova (mm) e δ é a deflexão no ponto central (mm). Para as amostras que apresentaram comportamento linear inicial, na curva tensão–deformação foram determinados os módulos de elasticidade em flexão (Ef) pelo coeficiente angular da reta ajustada. Para comparar as amostras, incluindo as com comportamento não linear, o módulo de elasticidade foi estimado pelo método do módulo secante de todas as amostras, determinado entre a origem e o ponto da curva correspondente a uma deformação específica, de 0,01 mm.

Após foi feita uma triagem dos dados, com identificação e remoção de outliers pelo método do Intervalo Interquartílico (IQR), considerando como discrepantes os valores situados fora dos limites de 1,5 × IQR. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de reduzir a influência de valores extremos e garantir maior homogeneidade e confiabilidade estatística. A análise estatística foi conduzida no software R, adotando-se delineamento inteiramente casualizado para comparação entre os grupos. Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) de um fator (one-way) e, quando observadas diferenças significativas, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey HSD (α = 0,05).

Resultados

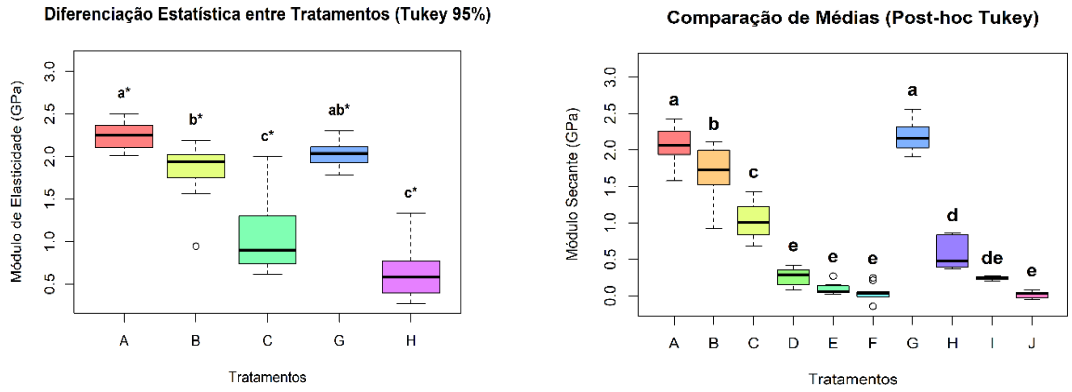
Os resultados do ensaio de flexão de três pontos são apresentados por meio das curvas tensão–deformação (Figura 1). Essas curvas permitem uma avaliação qualitativa da resposta mecânica dos materiais, evidenciando diferenças na rigidez, na linearidade inicial e na dispersão dos dados entre as formulações. Já os módulos secante e elasticidade são apresentados graficamente por meio de boxplots, acompanhados por letras indicativas de significância estatística (compact letter display), nas quais grupos que compartilham a mesma letra não diferem estatisticamente entre si, facilitando a interpretação visual das diferenças entre as médias (Figura 2).

Figura 1 - Comportamento mecânico dos corpos de prova submetidos a ensaio de flexão de 3 pontos. Sendo A (resina DGEBA), B-F (blendas com 10 a 50% de epoxicardanol) e G-K (blendas com 10-50% de cardanol)



Fonte: o autor

Figura 2 - Boxplot dos módulos de Elasticidade e Secante dos corpos de prova submetidos a ensaio de flexão de 3 pontos. Sendo A (resina DGEBA), B-F (blendas com 10 a 50% de epoxicardanol) e G-K (blendas com 10-50% de cardanol)



Fonte: O autor

Discussão

As formulações de resinas A, B e G apresentam comportamento linear bem definido na região inicial das curvas, com elevada inclinação, indicando materiais com alta rigidez e resposta predominantemente elástica. Esse comportamento é característico de redes poliméricas altamente reticuladas e estruturalmente homogêneas. À medida que se avança para C e H, observa-se redução significativa da inclinação inicial e aumento da dispersão entre os corpos de prova, indicando maior heterogeneidade estrutural e menor rigidez. Já D, E, F, I, J e K apresentam curvas com baixa inclinação e ausência de uma região linear bem definida, além de maior nível de ruído. Nesses casos, o comportamento mecânico é tipicamente mais deformável, indicativo da predominância de mecanismos viscoelásticos e de uma rede polimérica com baixa densidade de reticulação.

Observa-se na Figura 2, que a formulação A (0% de substituinte), apresentou os maiores valores de módulo de elasticidade, comportamento esperado devido à elevada densidade de reticulação característica das resinas epóxi petroquímicas. A alta rigidez estrutural dessas resinas está diretamente associada à formação de uma rede tridimensional altamente reticulada, o que resulta em maior resistência à deformação mecânica e em um comportamento predominantemente rígido. À medida que aumenta o teor de cardanol ou epoxicardanol verifica-se uma diminuição progressiva dos módulos de elasticidade em decorrência da estrutura molecular desses compostos, caracterizada pela presença de longas cadeias alifáticas. Embora a epoxidação aumente a funcionalidade química do epoxicardanol e possibilite a formação de ligações cruzadas com o agente de cura, a presença da cadeia alifática reduz a densidade de reticulação e aumenta a mobilidade das cadeias poliméricas, promovendo maior flexibilidade da rede e resultando em materiais com menor rigidez, baixos valores de módulo e ausência de uma região elástica bem definida.

Ao analisar o módulo secante, observa-se a mesma tendência de redução com o aumento do teor de substituição. No entanto, essa queda é mais acentuada nas formulações contendo cardanol. A formulação com 10% de cardanol apresentou módulo estatisticamente semelhante ao da DGEBA, indicando que pequenas quantidades não comprometem significativamente a rigidez do sistema. Contudo, a partir de 20%, os valores de módulo tornam-se inferiores aos obtidos com epoxicardanol, comportamento associado à menor funcionalidade química do cardanol, que não possui grupos epóxi capazes de participar efetivamente da reação de reticulação. Na formulação com 50% de cardanol, o módulo secante não pôde ser mensurado, indicando elevada deformabilidade do material e limitação na capacidade de suportar tensões mecânicas, o que evidencia a menor compatibilidade estrutural do cardanol com a matriz epóxi quando utilizado em altas proporções.

Conclusão

Os resultados demonstram que tanto a incorporação do cardanol como do epoxicardamol promovem uma transição controlada no comportamento mecânico da matriz epóxi, passando de um material rígido

e frágil para sistemas progressivamente mais dúcteis e, em altas concentrações, com características elastoméricas, sendo possível uma maior incorporação de epoxicardanol em comparação ao cardanol, uma vez que o primeiro mantém níveis mais elevados de rigidez e estabilidade mecânica em maiores teores de substituição.

De modo geral, que ambos os substituintes apresentam potencial para o desenvolvimento de sistemas epóxi parcialmente renováveis, porém com comportamentos distintos. O cardanol promoveu maior redução da rigidez, característica que pode ser de interesse em aplicações que demandem maior deformabilidade e menor rigidez. Por outro lado, o epoxicardanol proporcionou maior retenção das propriedades mecânicas, indicando maior potencial para aplicações nas quais a manutenção da rigidez e do desempenho mecânico seja um requisito.

Referências

ALMUTAIRI, A. D. Comprehensive Investigation of Epoxy Adhesives for Structural Applications in Saudi Arabia: Mechanical Performance, Environmental Impacts, and Analysis on Health. **Polymers**, v. 16, n. 22, p. 3185, 2024., https://doi.org/10.3390/polym16223185

DALLAEV, R., PISARENKO, T., PAPEŽ, N., SADOVSKÝ, P., & HOLCMAN, V. A brief overview on epoxies in electronics: properties, applications, and modifications. **Polymers,** v. 15, n. 19, p. 3964, 2023. https://doi.org/10.3390/polym15193964.

DA SILVA, K. T., OLIVEIRA, B. S., DA SILVA, L. R., MATTOS, A. L., MAZZETTO, S. E., LOMONACO, D. Bio-based novolac resins from cashew nut processing waste: Alternative resource for the development of high-value sustainable products. **Journal of Applied Polymer Science,** v. 140, n. 13, p. e53661, 2023. Diponível em: https://doi.org/10.1002/app.53661.

ILIYASU, I., YAHAYA, H., STEPHEN, M. Dielectric application of agro-waste reinforced polymer a review. **Phys. Access**, v. 3, p. 59-68, 2023. https://doi.org/10.47514/phyaccess.2023.3.1.010.

KANDOLA, B. K., MAGNONI, F., EBDON, J. R. Flame retardants for epoxy resins: application-related challenges and solutions. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, v. 28, n. 1, p. 17-49, 2022. https://doi.org/10.1002/vnl.21890.

KINACI, E., CAN, E., SCALA, J. J. L., PALMESE, G. R. (2020). Influence of epoxidized cardanol functionality and reactivity on network formation and properties. **Polymers**, v. 12, n. 9, p. 1956, 2020. .

LADAROLA, A., DI MATTEO, P., CIARDIELLO, R., GAZZA, F., LAMBERTINI, V. G., BRUNELLA, V., PAOLINO, D. S. Mechanical Characterization of Cardanol Bio-Based Epoxy Resin Blends: Effect of Different Bio-Contents. **Polymers**, v. 17, n. 3, p. 296, 2025. https//:doi.org/10.3390/polym17030296.

LAWAN, I., ARGUNAM, H., OKHAWILAI, M., AHN, C. H., RIMDUSIT, S. Bio-based treatment of hemp fiber for use as reinforcement of a composite: An effort towards development of green and sustainable polybenzoxazine brake pad. **Tribology International**, v. 193, p. 109394, 2024. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109394.

NWUZOR, I. C., CHUKWUNEKE, J. L., EWULONU, C. M., OKOLIE, P. C. Development and Characterization of Cardanol-Based Polymer Reinforced Fibre Bicomposites. **International Journal of Trend in Scientific Research and Development**, v. 5, n. 3, p. 895–904, 2021. https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd40010.pdf.

PATEL, M., YADAV, M., RAJ, M., RAJ, L., RATHVA, P. Comparative studies of composites based on commercial epoxy resin with renewable resources-based tetra functional epoxy resin. **Polymers from Renewable Resources**, v. 16, n. 1, p. 56-81, 2025. https//:doi.org/10.1177/20412479251313791.

SCHAULET, N. S., RIBEIRO, V. G., DE JACQUES, J. J. Polymers and Sustainability: Overview of the use of convencional and biodegradable polymers. **MIX Sustentável**, v. 10, n. 4, p. 113-125, 2024. https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2024.v10.n4.113-125.

SHUNDO, A., YAMAMOTO, S., TANAKA, K. Network formation and physical properties of epoxy resins for future practical applications. **Jacs Au**, v. 2, n. 7, p. 1522, 2022. https://doi.org/10.1021/jacsau.2c00120.