



Melhoria das propriedades mecânicas de compósitos verdes adicionando carvão vegetal oriundo de florestas plantadas

Fabiola Martins Delatorre¹
Álison Moreira da Silva²
Fernanda Aparecida Nazário de Carvalho¹
Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino¹
Michel Picanço Oliveira¹
Ananias Francisco Dias Júnior¹

¹ Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil; ² Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, Brasil.

RESUMO: Neste estudo, compósitos foram preparados usando carvão vegetal de espécie florestal como reforço para melhoria de suas propriedades. Deste modo, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da adição de carvão vegetal nas propriedades mecânicas dos compósitos. A madeira de *Eucalyptus spp.* foi pirolisada na temperatura de 800°C, taxa de aquecimento de 6°C.min⁻¹, com tempo de permanência de duas horas. O efeito da proporção de carvão vegetal (0, 10, 20 e 30%) com resina poliéster nas propriedades de resistência à flexão e tração dos compósitos foram investigados. Os resultados experimentais indicam que os compósitos com maior porcentagem de carvão vegetal na resistência à ruptura e módulo de elasticidade se demonstram com aumento superior ao compósito de 0%.

Palavras-chaves: resistência à flexão, resistência à tração, reforço natural, biomassa florestal

Introdução

Os compósitos são muito utilizados em indústrias aeronáuticas, construção civil, automobilística, biomedicina, dentre outros segmentos. Esses materiais são produzidos a partir de reagentes de fontes fósseis, que apresenta baixa velocidade de degradação. Com isso, a disposição inadequada desses materiais contribui para a geração de resíduos e tem se tornado cada vez mais um fator preocupante na atualidade, sendo um dos principais responsáveis pelos impactos no meio ambiente e nos oceanos. Como podemos mudar esse cenário? Com os impactos enfrentados nos últimos anos, estudos para a geração de novos bioprodutos vem sendo investigados. A incorporação de finos naturais em compósitos poliméricos como material de reforço levou o surgimento de compósitos de reforço de finos naturais. O uso de finos naturais como bio-reforço está aumentando rapidamente, pois aumenta significativamente a resistência à flexão, tração e rigidez, enquanto reduz o custo do compósito resultantes (Fang et al., 2013; Saxena & Gupta, 2019). Uma vez que compósitos verdes são obtidos diretamente de recursos naturais, são mais atrativos em termos de sustentabilidade e consciência ambiental. Em busca de se obter eficiência, sustentabilidade e inovação, diversos estudos estão sendo investigados em prol de materiais renováveis, ou que consiga diminuir o máximo possível a utilização de materiais de fonte petrolífera (Zhao et al., 2019).



A produção de carvão vegetal no território brasileiro posiciona o país como o maior produtor global desta matéria-prima, a qual assume papel crucial em outras cadeias produtivas. O carvão vegetal oriundo de florestas plantadas, tem o potencial de substituir aqueles de origem de fóssil, reduzindo significativamente a emissão de gases de efeito estufa na siderurgia e em outras áreas afins. Segundo informações divulgadas pelo Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ), a produção de carvão vegetal nos principais estados produtores, como Minas Gerais e Espírito Santo, atingiu um total de 3,6 milhões de toneladas em 2021, apresentando um crescimento de 9,4% em relação a 2020 (IBÁ, 2022). O carvão vegetal representa uma possibilidade atraente para a reconstituição de novos produtos, dada sua abundância, ecológica, baixo custo e renovabilidade. Além disso, a estrutura rica em carbono, alta área superficial e natureza hidrofóbica desses materiais permitem seu uso como enchimento, com capacidade de aprimorar de maneira significativa as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos verdes (Delatorre et al., 2022).

Assim, o presente trabalho focou no desenvolvimento de um material inovador altamente poroso e carbono, que ao ser adicionado na matriz polimérica, poderá ter um positivo nas propriedades físicas, mecânicas, químicas, morfológicas dos compósitos verdes, visando insights e tomadas de decisões para a geração de novos bioprodutos. Com isso, o presente estudo teve como objetivo investigar a influência da temperatura de pirólise em diferentes proporções nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Material e métodos

A madeira utilizada no experimento foi retirada de um plantio de florestas plantadas experimentalmente da espécie de *Eucalyptus* spp., com dez anos de idade. Posteriormente passou no moinho de martelo e moinho de facas, para diminuição da sua área superficial. As amostras para a produção do carvão vegetal foram secas em estufa a 105 ± 2 °C, até que o peso constante fosse atingido. Utilizou-se um forno de pirólise em escala laboratorial, com temperatura final de 800°C, taxa de aquecimento de $6^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, após atingir a temperatura desejada, permaneceu durante duas horas na temperatura final. Com o intuito de se ter um material mais homogêneo, os finos de carvão vegetal foram peneirados, obtendo granulometria final de 250 mesh (0,056 mm). Os compósitos com resina poliéster da marca Redealese com e sem finos de carvão vegetal foram preparados nas proporções de (0, 10, 20 e 30% em peso de finos de carvão vegetal) e foram pré-misturados em um misturador mecânico durante três minutos. Após o tempo de 24h, tempo de cura, foram submetidos aos testes mecânicos. Os testes de flexão e tração foram conduzidos de acordo com os padrões da ASTM, utilizando máquina de ensaio modelo EMIC de 10kN, a resistência à flexão foi delimitada



segundo os parâmetros da norma ASTM D-7264 (ASTM, 2021), e os ensaios de tração seguiram as prescrições da norma ASTM D-3039 (ASTM, 2017).

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (*Shapiro-Wilk*) e de homocedasticidade (*Bartlett*). A análise de variância foi realizada seguindo delineamento inteiramente aleatorizado, com a variável preditora relacionada à proporção de finos de carvão vegetal adicionada a matriz polimérica (0, 10, 20 e 30%). Identificando diferenças significativas com relação a variável dependente, foi realizado o ajuste de modelo de regressão. Os testes foram executados a 95% de probabilidade. Medidas de dispersão do erro padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para a variável estudada.

Resultados e discussão

O resultado da resistência à flexão dos compósitos com carvão vegetal está disposto na Figura 1.

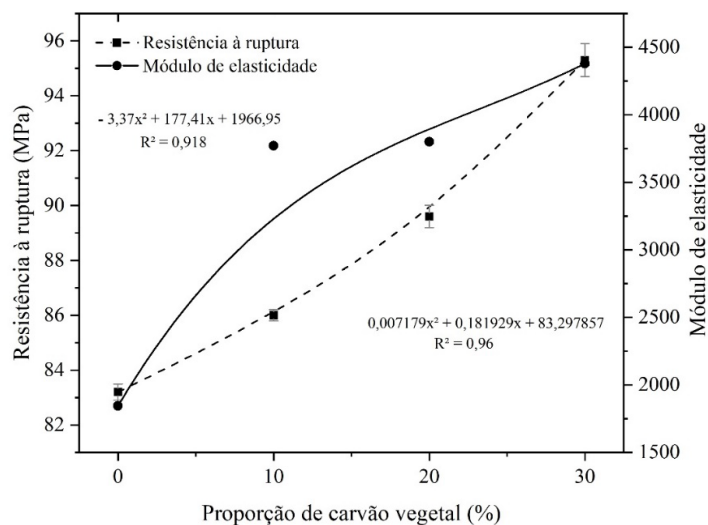


Figura 1. Resistência à flexão dos compósitos em diferentes proporções de carvão vegetal.

A adição de carvão vegetal causa aumento significativo na resistência à ruptura e elasticidade dos compósitos. Os compósitos produzidos com maior porcentagem de carvão vegetal (10, 20 e 30%) têm impacto positivo nas propriedades mecânicas dos compósitos em comparação com o compósito de 0%. A resistência à ruptura aumentou em 3,37, 7,7 e 14,54%, em média, nas proporções de 10, 20 e 30%, respectivamente, em comparação ao de 0%. O mesmo comportamento de aumento ocorreu no módulo de elasticidade, teve-se um acréscimo de 104,5% (10% de carvão), 106% (20% de carvão) e 137,4% (30% de carvão), quando comparado ao tratamento com 0%. O carvão vegetal preparado em temperaturas mais altas, como do presente estudo, é geralmente caracterizado pela presença de



grande número de microporos e de natureza apolar, com isso, a estrutura porosa oferece oportunidade para o polímero ficar amaranhado no carvão, resultando na maior resistência mecânica (Chen et al., 2017). No entanto, a penetração do polímero nos poros do carvão vegetal dependerá da viscosidade do polímero e tamanho dos poros. A Figura 2 demonstra a resistência a tração dos compósitos com carvão vegetal.

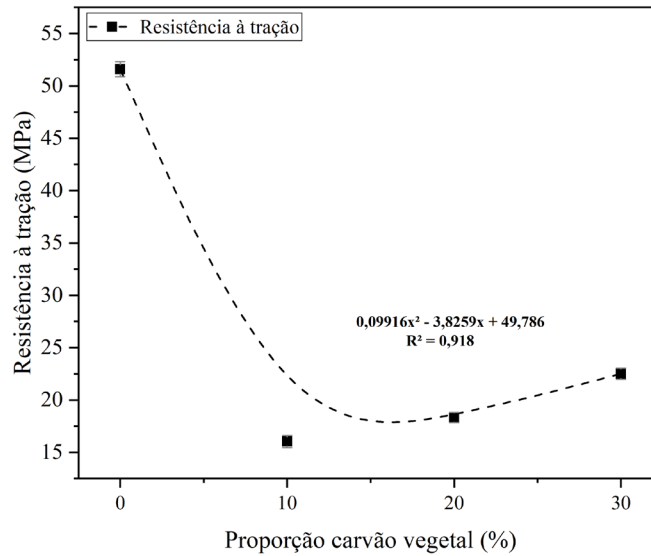


Figura 2. Resistência à tração dos compósitos em diferentes proporções de carvão vegetal.

A resistência à tração teve uma queda acentuada de 0 a 10%, com decréscimo de 68,91%. A resistência à tração foi inferior nos compósitos com carvão vegetal, percebe-se que possivelmente houve baixa adesão interfacial, causando assim diminuição na resistência à tração (Das et al., 2022). Ademais, com o aumento da proporção de carvão vegetal, percebe-se um aumento significativo na resistência. A resistência aumentou 14,28% (20% de carvão vegetal) e 40,34% (30% de carvão vegetal) em comparação a 10%. Este aumento pode ser devido à alta rigidez no enchimento de carvão vegetal. Foi relatado na literatura por Chen et al. (2015) que a resistência à tração é mais sensível a interação interfacial do que a resistência à flexão.

Conclusão

As melhores propriedades mecânicas foram obtidas com o aumento da proporção de carvão vegetal. Em contrapartida, na resistência à tração os compósitos demonstraram resistência mecânica menor, com a adição de carvão vegetal. No entanto, é notório um aumento gradual com o aumento da proporção de carvão vegetal. Sugerimos que em pesquisas futuras seja analisado o comportamento dos compósitos com outras resinas poliméricas, sintética ou de base natural, outras granulometrias de carvão vegetal e diferentes temperaturas de pirólise.



Referências bibliográficas

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7264M-21: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, 2021.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3039-17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken 2017.

CHEN H.; CHEN X.; QIN Y.; WEI J.; LIU H. Effect of torrefaction on the properties of rice straw high temperature pyrolysis char: Pore structure, aromaticity and gasification activity. *Bioresource Technology*, v. 228, p. 241–249, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.074>

CHEN R.S.; GHANI M.H.; SALLEH M.N.; AHMAD S.; TARAWNEH M.A. Mechanical, water absorption, and morphology of recycled polymer blend rice husk flour biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 132, n. 8, 2015. <https://doi.org/10.1002/app.41494>

DAS O.; BABU K.; SHANMUGAM V.; SYKAM K.; TEBYETEKERWA M.; NEISIANY R.E.; FÖRSTH M.; SAS G.; GONZALEZ-LIBREROS J.; CAPEZZA A.J.; HEDENQVIST M.S.; BERTO F.; RAMAKRISHNA S. Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 158, p. 112054, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112054>

DELATORRE F.M.; CUPERTINO G.F.M.; OLIVEIRA M.P.; GOMES F.S.; PROFETI L.P.R.; PROFETI D.; JÚNIOR M.G.; AZEVEDO M.G.; SALONI D.; DIAS A. A Novel Approach to Charcoal Fine Waste: Sustainable Use as Filling of Polymeric Matrices. *Polymers*, 14 (24). <https://doi.org/10.3390/polym14245525>

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório atual 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes>. Acesso em 25 de março de 2023.

ZHAO Y.; LIN S.; CHOI J.W.; BEDIAKO J.K.; SONG M.H.; KIM J.A.; CHO C.W.; YUN Y.S. Prediction of adsorption properties for ionic and neutral pharmaceuticals and pharmaceutical intermediates on activated charcoal from aqueous solution via LFER model. *Chemical Engineering Journal*, v. 362, p. 199–206, 2019.

