

EFEITO DA UMIDADE DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS E CERÂMICOS NAS PROPRIEDADES COMPRESSIVAS DE COMPÓSITOS PARTICULADOS*

Rogério Rabello da Rocha Júnior¹

David Coverdale Rangel Velasco²

Felipe Perissé Duarte Lopes³

Noan Tonini Simonassi⁴

Sergio Neves Monteiro⁵

Carlos Maurício Fontes Vieira⁶

Resumo

A gestão adequada de recursos materiais é um dos maiores desafios da humanidade. Esta tem se apoiado no reaproveitamento de materiais (resíduos) para confecção de novos compósitos, o que minimiza os resíduos depositados em aterros e a demanda por recursos materiais. No entanto, a presença de umidade nos resíduos pode influenciar negativamente o desempenho dos compósitos, prejudicando a interface entre a matriz e a fase dispersa e/ou resultando na formação de bolhas durante a confecção do compósito. Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência na umidade dos particulados na resistência a compressão de compósitos de matriz polimérica. Utilizou-se como matriz um sistema epóxi e como fase dispersa o chamote e/ou pó da casca de coco, sendo estas utilizadas em duas configurações: com e sem secagem. Os resultados do ensaio de compressão, através da análise de variância, não indicaram variação significativa da rigidez e resistência dos materiais, embora fosse observada uma maior porosidade nos corpos de prova utilizando particulados em estado seco. Entretanto, a confecção de corpos de prova maiores pode ensejar em uma maior influência da umidade na criação de defeitos e conseqüentemente nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Resistência à compressão; Resíduos; Pó da casca do coco; Umidade.

EFFECT OF HUMIDITY OF LIGNOCELLULOSIC AND CERAMIC RESIDUES ON THE COMPRESSION PROPERTIES OF PARTICULATE COMPOSITES

Abstract

Proper management of material resources is one of humanity's greatest challenges. This has been based on the reuse of materials (waste) to make new composites, which minimizes the waste deposited in landfills and the demand for material resources. However, the presence of moisture in the waste can negatively influence the performance of the composites, impairing the interface between the matrix and the dispersed phase and/or resulting in the formation of bubbles during the manufacture of the composite. This work aims to evaluate the influence of particulate moisture on the compressive strength of polymeric matrix composites. An epoxy system was used as matrix and chamotte and/or coconut husk powder as dispersed phase, which were used in two configurations: with and without drying. The results of the compression test, through analysis of variance, did not indicate significant variation in the stiffness and strength of the materials, although greater porosity was observed in the test specimens using particulates in the dry state. However, the manufacture of larger specimens may lead to a greater influence of moisture in the creation of defects and consequently in the mechanical properties.

Keywords: Compressive strength; Residues; Coconut husk powder; Moisture.

- ¹ *Engenheiro Civil, Mestrando em Engenharia e Ciência dos Materiais, Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ² *Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais, LAMAV, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ³ *Engenheiro Metalúrgico e de Materiais, Doutor em Ciências dos Materiais, Pós-Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais, LAMAV, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalúrgico e de Materiais, Doutor em Ciências dos Materiais, Pós-Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais, LAMAV, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Metalúrgico, Doutor em Ciência dos Materiais e Engenharia dos Materiais, Pesquisador Colaborador, LAMAV, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro Mecânico, Doutor em Ciências dos Materiais, Professor Titular, LAMAV, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade atualmente é o reaproveitamento dos resíduos gerados, tendo em vista a enorme quantidade produzida e o descarte inadequado. Por vezes, esses resíduos podem ser convertidos em matéria-prima para outros processos produtivos e se tornarem um bom substituto ou componente para outros materiais [1]. Dentre os benefícios possíveis, podem ser observadas a diminuição da dependência em fontes de materiais não renováveis e a redução das emissões de gases do efeito estufa [2].

A produção de cerâmica brasileira produz pouco mais de 6,5 bilhões de peças anuais, que se divide em 71,43% de blocos, 28,56% de telhas e menos de 1% de tubos cerâmicos, sendo tal produção majoritariamente consumida no mercado brasileiro [3,4]. Não obstante, este segmento tem um impacto significativamente nocivo ao meio ambiente em virtude de uma grande produção de gases do efeito estufa e produção de resíduos sólidos [5], tal como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1. Resíduos de tijolos queimados gerados em uma indústria de tijolos [6].

Visando o aproveitamento destes resíduos sólidos, é comum a trituração de peças defeituosas ou quebradas de cerâmicas cozidas. Tal processamento produz particulados cerâmicos denominados como chamote [5]. Este resíduo tem sido estudado para aplicações diversas como a produção de rochas e compósitos de matriz poliméricas [7]. Gomes et al [8] realizaram a produção e caracterização de rochas artificiais a partir de chamote e brita em matriz epóxi. Em seu trabalho foram observadas propriedades mecânicas satisfatórias, como resistência à flexão e à abrasão, sendo indicado seu uso para materiais como revestimento para alto tráfego.

Além de resíduos do setor industrial, o uso de resíduos agrícolas tem se intensificado [9]. O coco, por exemplo, é cultivado em cerca de 100 países, com produção estimada em 64 milhões de toneladas por ano [10]. A principal fonte de valor agregado da casca de coco são suas fibras, que apresentam diversas vantagens em relação às fibras sintéticas, como: baixo custo, resistência à corrosão,

alta tenacidade e baixa densidade, entre outras propriedades específicas que variam de acordo com o tipo de fibra estudada [11]. No entanto, durante o processo de produção das fibras de coco, é gerado um resíduo particulado denominado pó da casca de coco, que apresenta o dobro do volume das próprias fibras [12].

Velasco *et al.* [13] avaliaram o comportamento de compósitos de matriz epóxi reforçados com o pó da casca de coco em duas configurações, utilizando particulados processados e não processados. Neste trabalho foi observado que o emprego deste material pode gerar ganhos de resistência ao impacto e compressão em até 30%, especialmente quando processado.

Contudo, o uso de resíduos, deve considerar a possibilidade de diferença de natureza entre a resina e particulado. A resina utilizada neste trabalho (epóxi), por exemplo, é hidrofóbica, enquanto os resíduos são hidrofílicos. Acrescenta-se ainda que a presença de umidade dos particulados pode influenciar nas propriedades mecânicas, visto que o corpo de prova tende a apresentar maiores quantidades de vazios com maior umidade de fase dispersa [14].

Este trabalho visa caracterizar o desempenho de compósitos reforçados com o pó da casca de coco e chamote em duas configurações: com umidade e seco.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As formulações avaliadas neste trabalho foram desenvolvidas utilizando um sistema epóxi Éter bisfenol A diglicidílico (DGEBA) / trietileno tetramina (TETA), adquirido da empresa AVIPOL, situada em São Paulo-SP, Figura 2.



Figura 2. Sistema SQ 2050 / SQ 3131.

Os resíduos utilizados, chamote e pó da casca de coco, foram obtidos de empresas locais em Campos dos Goytacazes, RJ. Tais resíduos foram moídos em um moinho de bolas cerâmico, e peneirados, sendo utilizados os particulados que passaram pela malha de 100 mesh, tal como é observado na Figura 3. O processamento do pó da casca de coco foi realizado, ainda que originalmente este já se encontrasse sobre forma de particulados, possibilitando um maior aproveitamento do resíduo, bem como melhoria nas propriedades do compósito [13].



Chamote



Pó da casca de coco

Figura 3. Particulados utilizados.

A Tabela 1 apresenta as formulações, em fração volumétrica, que foram confeccionadas neste trabalho: sistema epóxi puro (EP), com pó da casca de coco (CC), com chamote (CH) e híbridos (HB). A formulação EP é utilizada como referência, enquanto as demais formulações foram utilizadas para avaliar a influência da retirada da umidade dos particulados pela estufa. Em todas as formulações foi utilizada a mesma proporção de endurecedor em relação a resina, 20:100 em massa.

Tabela 1. Formulações utilizadas e as concentrações de seus componentes em frações volumétricas.

ID	Sistema epóxi	Particulados de chamote	Particulados da casca de coco
EP	100%	-	-
CC	97,5%	-	2,5%
CH	80%	20%	-
HB	80%	17,5%	2,5%

Os corpos de prova foram fabricados em moldes abertos de silicone, diferindo pela umidade dos particulados utilizados: um grupo foi produzido com particulados que passaram por um processo de secagem em estufa a 60°C por 24 horas, enquanto o outro grupo foi produzido com particulados não desumidificados.

O ensaio de compressão foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca Instron, modelo 5582, localizada no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), seguindo a norma ASTM D695 [15]. Os corpos de prova, que possuíam dimensões prismáticas de 12 x 12 x 6 mm (largura x altura x espessura), foram ensaiados 5 por formulação, a uma velocidade de 2 mm/min.

Inicialmente, a análise estatística foi conduzida por meio de uma Análise de Variância (ANOVA), a fim de determinar se existem diferenças significativas entre os grupos em estudo, sendo em sequência realizado o teste de Tukey para identificar quais grupos possuem diferença entre si. Essas análises foram realizadas utilizando o software "Past", considerando um nível de significância de 5% e a metodologia de Copenhaver e Holland [16].

Posteriormente, a resistência à flexão foi avaliada com uma confiabilidade de 90%. Para isso, será realizada uma análise de Weibull, utilizando o software "Weibull Analysis" para estimar os parâmetros de localização, escala e forma.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação à resistência à compressão, apresentada na Figura 4, a ANOVA demonstrou um comportamento com a ausência de variações significativas ao comparar os grupos com e sem retirada de umidade, ou quando comparado qualquer um desses grupos com a referência EP. Entretanto, observou-se uma tendência de redução no coeficiente de variação ao se utilizar particulados que foram submetidos à estufa. Essa redução pode ser atribuída à umidade presente nos particulados durante o processo de cura do compósito gera bolhas como as que podem ser observadas na Figura 5 [15,17]. É importante destacar que essa variável deve ser controlada também após a retirada dos materiais da estufa, uma vez que ambos os particulados são higroscópicos e têm a tendência de absorver a umidade do ar [18,19].

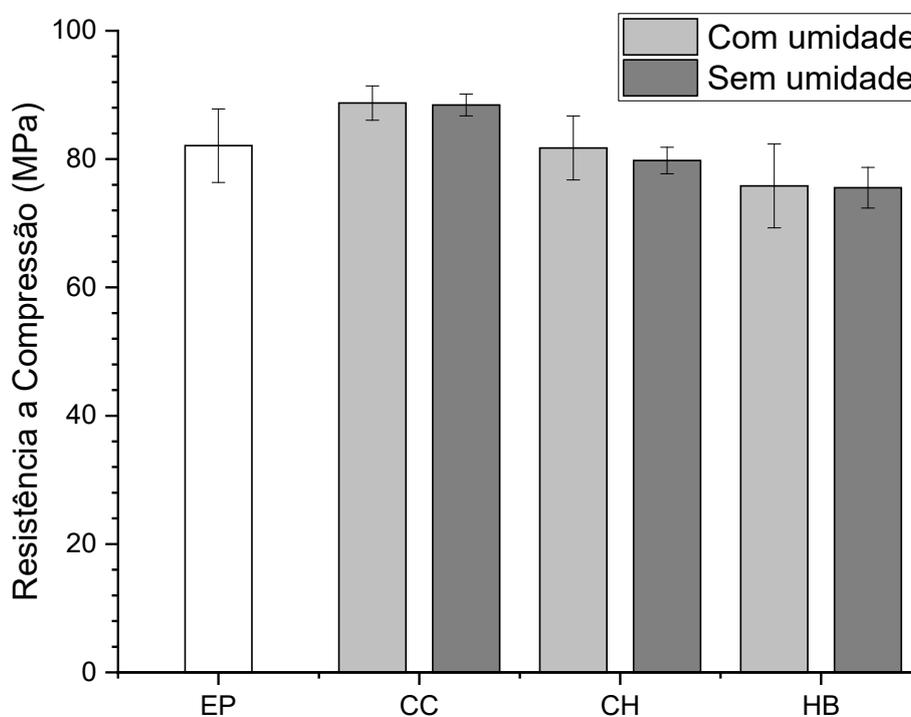


Figura 4. Resistência a compressão dos compósitos.

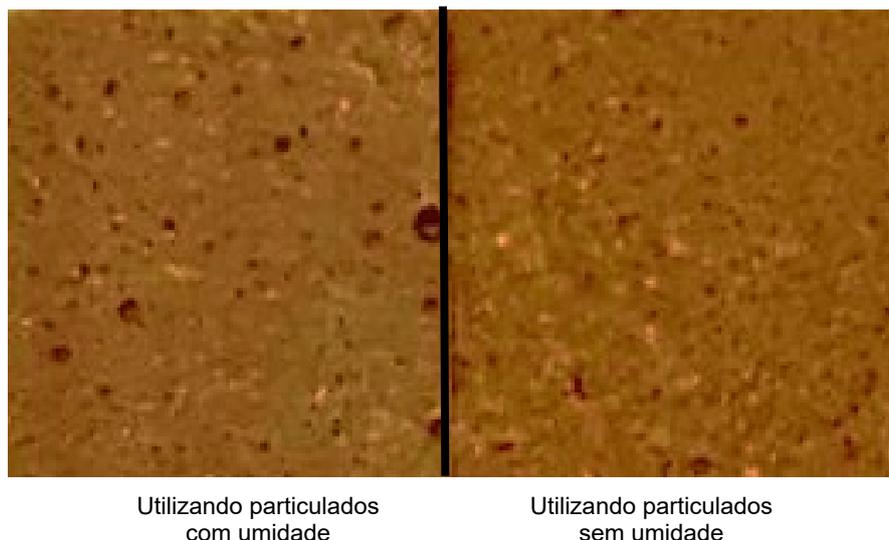


Figura 5. Foto macroscópica dos compósitos HB produzidos com e sem remoção de umidade.

A Figura 6 exhibe o módulo de elasticidade dos materiais analisados neste estudo. Através da ANOVA, pode-se constatar que não houve alterações significativas na rigidez quando se compararam as formulações que utilizaram particulados que foram submetidos à estufa com aquelas que não foram. Além disso, destaca-se que a inclusão de partículas em qualquer configuração não induziu redução significativa na rigidez quando comparada à matriz de referência. Porém, quando são comparadas as médias, as formulações com particulados da casca do coco obtiveram uma tendência de aumento na rigidez após secagem da fase incorporada, com uma variação de 18,1% para CC e 26,1% para os compósitos híbridos HB, indicando que as interfaces entre as partículas e a matriz epoxídicas tendem a melhorar a interação criando uma resistência a propagação de trincas. Entretanto, diferente do esperado, essa tendência não foi observada nos compósitos com chamote (CH), pelo contrário houve uma tendência de redução da média em 16,2%, esse comportamento pode estar relacionado a aglomeração dos particulados mais finos, durante o processo de secagem desse particulado, criando partículas maiores e fragilizando o material como um todo.

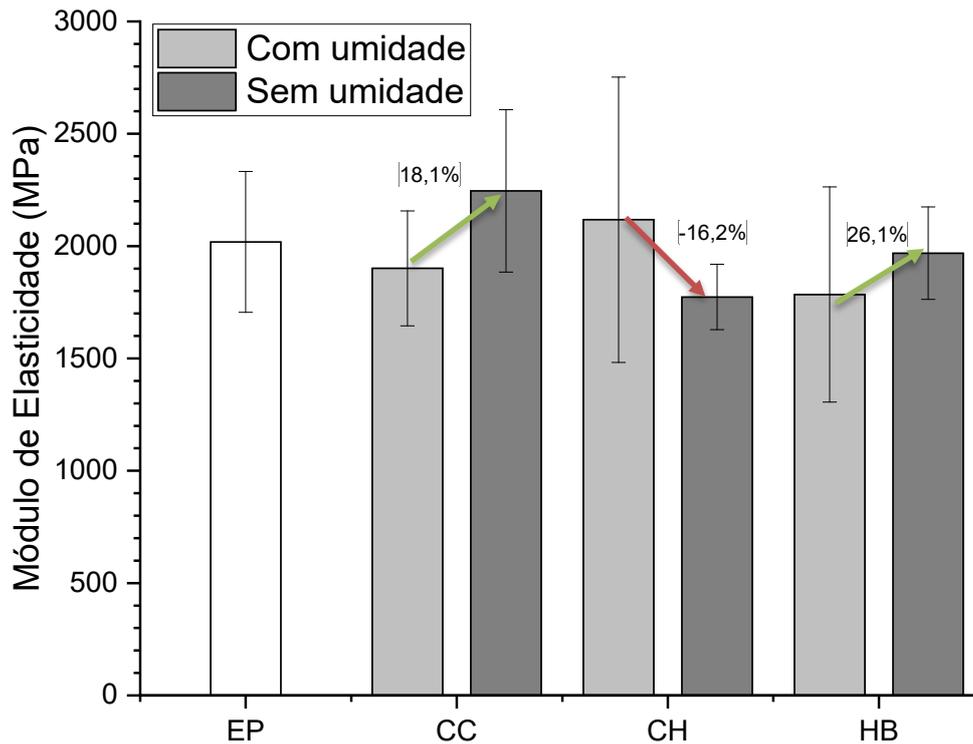


Figura 6. Módulo de elasticidade de amostras com e sem retirada de umidade os particulados.

Por meio da análise de Weibull, foi possível determinar a relação entre a probabilidade de falha dos materiais e a tensão aplicada. As distribuições resultantes apresentaram um coeficiente de determinação (r^2) médio de 0,95 e permitiram estimar a resistência à compressão com uma confiabilidade de 90%, conforme demonstrado na Figura 7. Foi observado que a remoção de umidade dos particulados gera uma variação, em torno de 3% da resistência. Este comportamento é atribuído à redução do desvio padrão. Acrescenta-se ainda que, uma pequena adição de pó da casca de coco (2,5%) foi responsável por variações significativas nas propriedades do sistema epóxi, gerando um aumento de cerca de 15% na resistência a compressão.

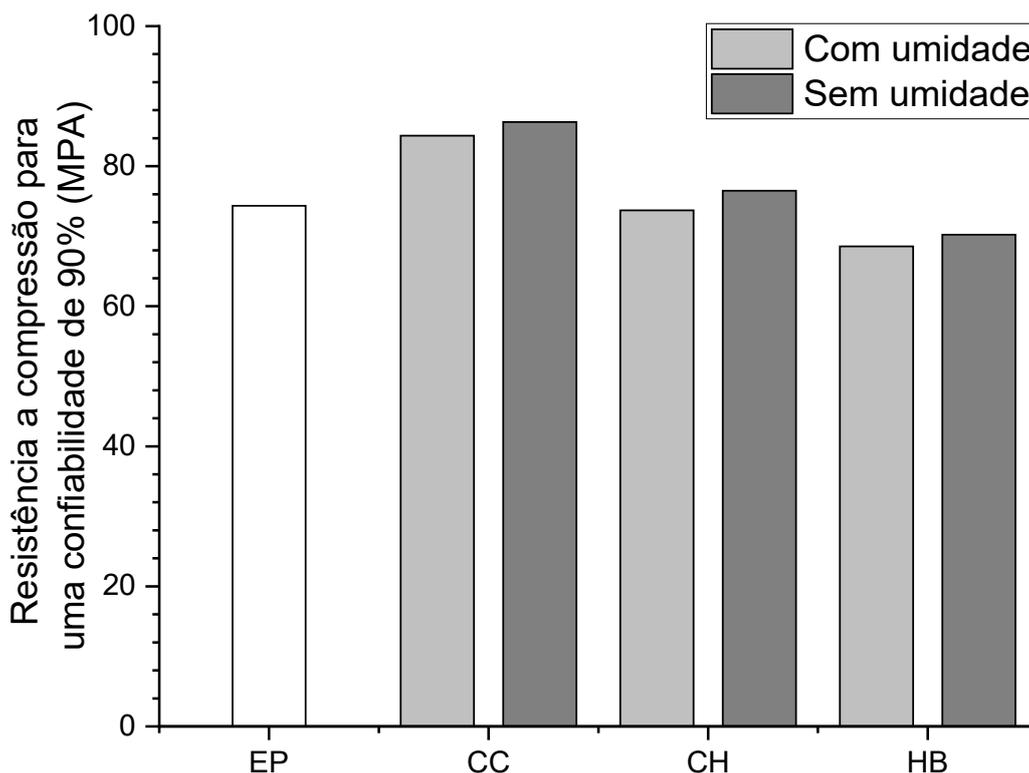


Figura 7. Resistência a compressão para uma confiabilidade de 90%.

Por fim, há de se ressaltar que os corpos prova utilizados nesta análise possuem dimensões relativamente pequenas e na fabricação de peças maiores poderá ser observada uma maior influência da umidade, aumentando tanto a quantidade, quando o tamanho dos defeitos [20].

4 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos neste estudo, constatou-se que a secagem dos particulados não exerceu influência significativa no módulo de elasticidade e na resistência à compressão dos compósitos. Acrescenta-se ainda que a remoção da umidade reduziu a formação de bolhas e o coeficiente de variação da resistência dos compósitos, gerando um pequeno de confiabilidade dos materiais. Entretanto, tal impacto pode ser mais significativo na produção de peças e corpos de prova maiores.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer às agências de fomento: CAPES, CNPQ (proc. nº 302976/2022-1) e FAPERJ (nº de processo E-26/205.832/2022, E-26/203.874/2022, E-26/200.847/2021, e E-26/201.628/2021).

REFERÊNCIAS

- 1 Zaccaron A, Galatto SL, Nandi V de S, Fernandes P, Zaccaron A, Galatto SL. Incorporação de Chamote na Massa de Cerâmica Vermelha como Valorização do Resíduo. Cerâmica Industrial. 2017 Jan 11;19(3):1–16. DOI: 10.4322/cerind.2014.077.

- 2 Somashekhar TM, Naik P, Nayak V, Mallikappa, Rahul S. Study of Mechanical Properties of Coconut Shell Powder and Tamarind Shell Powder Reinforced with Epoxy Composites. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2018 Jun;376(1):12105. DOI: 10.1088/1757-899X/376/1/012105.
- 3 Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Dados do setor [página da internet]. Rio de Janeiro: ANICER, 2022 [acesso em 5 fev 2023]. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor>.
- 4 Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Relatório anual: 2022. ANICER; 2022 [acesso em 5 Fev 2023]. Disponível em: https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2022/12/Relatorio_2022.pdf.
- 5 Carrillo-Beltran R, Corpas-Iglesias FA, Terrones-Saeta JM, Bertoya-Sol M. New geopolymers from industrial by-products: Olive biomass fly ash and chamotte as raw materials. Constr Build Mater. 2021;272:121924. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121924.
- 6 Portal Ambiente Legal. Reciclagem: resíduo da cerâmica vermelha no concreto faz diferença 2016. [acesso em 12 Abr 2023]. Disponível em: <https://www.ambientelegal.com.br/reciclagem-residuo-da-ceramica-vermelha-no-concreto-faz-diferenca/>
- 7 Velasco DCR, Lopes FPD, Simonassi NT, Vieira CMF. Influência da incorporação de resíduos na permeabilidade ao vapor de água de compósitos de matriz epoxídica / Influence of the incorporation of waste on the water vapor permeability of epoxide matrix composites. 2022;8(4):24272-8. DOI: 10.34117/bjdv8n4-101.
- 8 Gomes MLPM, Costa EASC, Sobrinho LN, Monteiro SN, Rodriguez RJS, Vieira CMF. Produção e caracterização de rocha artificial a partir de chamote e brita em matriz epoxídica. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. p. 1817-1825. In: 72nd ABM Annual Congress, São Paulo, 2017. DOI: 10.5151/1516-392X-30549.
- 9 Gunasekaran K, Annadurai R, Kumar PS. Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete. Constr Build Mater. 2012;28(1):208–15. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.072.
- 10 Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crops and livestock products [página da internet]. Rome: FAOSTAT, 2022 [acesso em 6 fev 2023]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>.
- 11 Jayavani S, Deka H, Varghese TO, Nayak SK. Recent development and future trends in coir fiber-reinforced green polymer composites: Review and evaluation. Polym Compos. 2016;11(37):3296–309. DOI: 10.1002/pc.23529.
- 12 Mattos ALA, Rosa M de F, Crisóstomo LA, Bezerra FC, Correia D, Veras L de GC. Beneficiamento da casca de coco verde. Embrapa Agroindústria Tropical; 2014 [acesso em 4 abr 2020]; 25. Disponível em: http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_3830.pdf.
- 13 Velasco DCR, Lopes FPD, Souza D, Lopera HAC, Monteiro SN, Vieira CMF. Evaluation of Composites Reinforced by Processed and Unprocessed Coconut Husk Powder. Polymers. 2023;15(5). DOI: 10.3390/polym15051195.
- 14 Mehdikhani M, Gorbatikh L, Verpoest I, Lomov S V. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. J Compos Mater. 2019;53(12):1579–669. DOI: 10.1177/0021998318772152
- 15 American Society for Testing and Materials, D695-15. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International; 2016. DOI: 10.1520/D0695-15.
- 16 Copenhaver MD, Holland B. Computation of the distribution of the maximum studentized range statistic with application to multiple significance testing of simple effects. J Stat Comput Simul. 1988;30(1):1–15. DOI: 10.1080/00949658808811082.
- 17 Grunenfelder LK, Nutt SR. Void formation in composite prepregs – Effect of dissolved moisture. Compos Sci Technol. 2010;70(16):2304–9. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.09.009.

- 18 Kazimirova M, Stibraniova I. Tick salivary compounds: their role in modulation of host defences and pathogen transmission. *Front Cell Infect Microbiol.* 2013;3:43. DOI: 10.3389/fcimb.2013.00043
- 19 Fabris DCN, da Silva JR, Rodrigues AP, Montedo ORK, Júnior AN. Efeito de Aditivo Defloculante no Processamento de Massa para a Obtenção de Blocos Cerâmicos Estruturais. *Cerâmica Industrial.* 2017;22(1):31–6. DOI: 10.4322/cerind.2017.004.
- 20 Liu T, Sun B, Gu B. Influence of specimen size and inner defects on high strain rates compressive behaviors of plain woven composites. *Polym Test.* 2017;64:55–64. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.09.035.