

Reaproveitamento de resíduos industriais como cargas em compósitos: resistência mecânica e à chama

Reuse of industrial waste as loads in composites: mechanical and flame resistance

DOI:10.34117/bjdv6n10-651

Recebimento dos originais: 26/09/2020

Aceitação para publicação: 28/10/2020

Gabriel da Cruz Oliveira

Graduando em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Pará

Instituição: Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua.

Endereço: Universidade Federal do Pará, Bairro: Cidade Nova, Ananindeua - PA, Brasil, 67130-660.

E-mail: gdco.cruz@gmail.com

Karla Suellen Lino Barbosa

Bacharela Interd. em Ciência e Tecnologia com ênfase em Mecânica, Mestranda em Engenharia

Química pela Universidade Federal do Pará

Instituição: Universidade Federal do Pará – Campus Belém.

Endereço: Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa n° 1, Bairro: Guamá, Belém – PA, Brasil, 66075-110.

E-mail: karllaslb@gmail.com

Lucas Rezende Almeida

Graduando em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Pará

Instituição: Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua.

Endereço: Universidade Federal do Pará, Bairro: Cidade Nova, Ananindeua - PA, Brasil, 67130-660.

E-mail: lucasreezende@gmail.com

Ingrid Moreira Reis

Bacharela Interd. em Ciência e Tecnologia com ênfase em Mecânica

Instituição: Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua.

Endereço: Universidade Federal do Pará, Bairro: Cidade Nova, Ananindeua - PA, Brasil, 67130-660.

E-mail: ingridmoreira593@gmail.com

Denilson da Silva Costa

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas (Tecnologia Mineral) pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Instituição: Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Professor do magistério superior, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente – Campus Marabá.

Endereço: Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá-PA, Brasil, 68505-080.

E-mail: denilson@unifesspa.edu.br

Disterfano Lima Martins Barbosa

Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará.

Instituição: Universidade Federal do Pará, Professor do magistério superior, Faculdade de Ciência e Tecnologia – Campus Ananindeua.

Endereço: Universidade Federal do Pará, Bairro: Cidade Nova, Ananindeua - PA, Brasil, 67130-660.

E-mail: delimamb@gmail.com

José Antônio da Silva Souza

Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia pela Universidade Federal do Pará.

Instituição: Universidade Federal do Pará, Professor do magistério superior, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia – Campus Belém.

Endereço: Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa n° 1, Bairro: Guamá, Belém – PA, Brasil, 66075-110.

E-mail: jass@ufpa.br

Deibson Silva da Costa

Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia pela Universidade Federal do Pará.

Instituição: Universidade Federal do Pará, Professor do magistério superior, Faculdade de Engenharia de Materiais – Campus Ananindeua.

Endereço: Universidade Federal do Pará, Bairro: Cidade Nova, Ananindeua - PA, Brasil, 67130-660.

E-mail: deibsonsc@yahoo.com.br

RESUMO

Os materiais compósitos são versáteis e possuem elevado condicionamento de aplicação, justamente por apresentar uma boa conduta para propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Neste trabalho, foram produzidos compósitos, seguindo o método Hand Lay up, utilizando uma matriz polimérica com adição de resíduos de alumínio e de mármore e granito classificados em faixas de 100 mesh, nas proporções de 10 e 20 % em massa para termos comparativos. A matriz utilizada foi à resina poliéster isoftálica com auxílio do acelerador de cobalto (1,5 % v/v) e catalisador (1 % v/v). Foram realizados ensaios físicos (NBR 12766), de resistência à tração (ASTM D 3039) e flamabilidade (ASTM D 635). Os resultados dos ensaios físicos dos compósitos mostraram-se bem relativos para porosidade aparente, porém, observou-se valores inversamente proporcionais para absorção de água em relação ao enchimento em massa. O teste de tração permitiu avaliar que os compósitos não apresentaram aumentos significativos para o comportamento mecânico conforme o aumento gradual da carga de reforço. Para a resistência a chama, todas as composições mostraram boas taxas de queima, indicando que são materiais retardantes a propagação das chamas. Assim, tais aspectos justificam a utilização dos compósitos em diversos setores que exige materiais com boas propriedades mecânicas e térmicas.

Palavras-chave: Resíduos Industriais; Novos materiais; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Composite materials are versatile and have high application conditioning, precisely because they present a good conduct for physical, mechanical and thermal properties. In this work, composites were produced, following the Hand Lay up method, using a polymeric matrix with the addition of aluminum and marble and granite residues classified in bands of 100 mesh, in the proportions of 10 and 20 % by mass for comparative terms. The matrix used was the isophthalic polyester resin with the aid of cobalt accelerator (1.5 % v/v) and catalyst (1 % v/v). Physical (NBR 12766), tensile strength (ASTM D 3039) and flammability (ASTM D 635) tests were performed. The results of the physical tests of the composites showed to be very relative to the apparent porosity, however, it was observed inversely proportional values for water absorption in relation to the mass filling. The traction test allowed to evaluate that the composites did not present significant increases for the mechanical behavior according to the gradual increase of the reinforcement load. For the flame resistance, all composites showed good burning rates, indicating that they are flame retardant materials. Thus, such

aspects justify the use of composites in several sectors that require materials with good mechanical and thermal properties.

Keywords: Industrial waste; New materials; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A ciência dos materiais aponta gradativamente para o desenvolvimento de novos materiais, atenuando até mesmo mecanismos inéditos de aplicação, de modo apresentar principalmente boas propriedades. Os compósitos são comumente apresentados como materiais de alta flexibilidade e de boa conduta para valores como segurança, meio ambiente e economia. A classe dos compósitos poliméricos reforçados com resíduos industriais propõe versatilidade e, em consequência, garantem uma potencialização de variadas características como resistência térmica e mecânica.

A divisão entre as fases matriz e reforço (ou fase dispersa) define um material compósito, contudo, é importante destacar a conduta da interação das fases, de modo a considerar a homogeneização paralelo a particularidade de cada material. Albinante *et al.* (2013) ao estudar fibras naturais para mistura com poliolefinas descreve que a compatibilidade das fases são dependentes do estado químico, associado principalmente a ligações covalentes e força de Van der Waals.

O resíduo de alumínio, oriundo do beneficiamento da bauxita, classifica propriedades interessantes, condicionando este como um bom aditivo em uma matriz polimérica. Uma justificativa da sua utilização em compósito é sua baixa densidade, além de apresentar alto grau de condutibilidade elétrica e térmica, embora seja um material com aspecto hidrofóbico (ABAL, 2020).

A indústria de mármore e granito produz elevada quantidade de resíduos sólidos, provenientes de alguns processos de extração e mineração. Com isso, faz-se necessário seu reaproveitamento na formulação de novos materiais. O estudo de Costa (2017) justifica compósitos com resíduos de mármore e granito como ótimos condutores térmicos, com aumento de até 37 % em relação a matriz plena.

Nesse sentido, o trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento dos compósitos de alumínio e os compósitos de mármore e granito, conforme as caracterizações físicas, mecânicas e de resistência à queima, visando obter um comparativo dos resultados propostos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

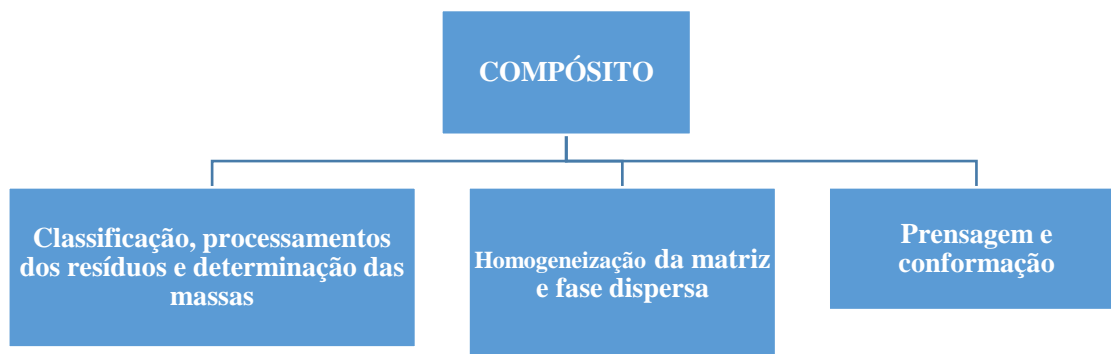
Os resíduos de alumínio (AL) e de mármore e granito (MG) utilizados neste trabalho provêm de empresas oriundas do estado do Pará, fornecidos para o grupo de pesquisa da Engenharia Química e ao Grupo de Materiais Compósitos da Universidade Federal do Pará. A resina utilizada foi o poliéster

insaturada isoftálica juntamente com os auxiliares da reação: iniciador MEK-P (Butanox) na proporção 1 % (v/v) e o acelerador de cobalto na proporção 1,5 % (v/v).

Os materiais de reforço foram submetidos a aquecimento em estufa na temperatura de 105 ° C por 24 h para secagem e, logo após, classificados em peneira de 100 mesh (0,149 mm) da série Tyler, de forma a obter uma faixa granulométrica semelhante entre as partículas.

O processo de fabricação dos compósitos utilizado foi o *Hand Lay-up* associado a prensagem em molde fechado, confeccionando placas para composições em termos percentuais de 0 %, 10 % (Al-10/MG-10) e 20 % (Al-20/MG-20). A homogeneização foi conduzida pela agitação manual da matriz com a fase dispersa, considerando uma margem de erro até o tempo de polimerização, minimizando assim, o tempo de inércia do material e a tendência à sedimentação da carga. Assim, o produto da reação foi despejado em um molde metálico com formato retangular, com dimensões de 320x170 mm, no qual se submeteu a uma compressão de 25 kN por um período de 20 min. A Figura 1 mostra o processo de fabricação dos compósitos.

Figura 1- Fluxograma da fabricação dos compósitos.



As placas foram separadas conforme suas frações mássicas e, após o processo de reação final (24 h), foram submetidas a processos de corte conforme as normas para os ensaios físicos, mecânicos de tração e flamabilidade.

Os testes físicos realizados foram difundidos conforme as equações 1, 2 e 3, as quais determinam a absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) respectivamente, de acordo com a Norma NBR 12766/1992.

$$AA (\%) = \left(\frac{M_u - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$PA (\%) = \left(\frac{P_t - P_e}{P_t} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$MEA \frac{g}{cm^3} = \left(\frac{M_s}{M_s - M_i} \right) \times \rho_{H_2O} \quad (3)$$

Onde, (Ms) é a massa seca, (Mu) é a massa úmida e (Mi) é a massa imersa em água destilada.

Para os ensaios de tração os corpos de prova dispuseram de dimensões de 25x250 mm conforme a norma ASTM D 3039. A resistência à chama foi calculada de acordo com a Norma ASTM D 635, com corpos de prova com dimensões de 12,5x127 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Tabela 1 apresenta os resultados para as propriedades físicas dos compósitos produzidos, de forma a esclarecer a absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA), com dados em variação proporcional ao desempenho do particulado.

Tabela 1. Propriedades físicas dos compósitos de alumínio (AL) e de mármore e granito (MG)

Resíduo (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)
Resina	0,28±0,05	0,34±0,06	1,22±0,0006
AL-10	0,47±0,04	0,69±0,06	1,47±0,0044
AL-20	0,38±0,04	0,68±0,08	1,79±0,0102
MG-10	1,64±0,49	2,22±0,64	1,35±0,0108
MG-20	1,62±0,64	2,42±0,99	1,50±0,0922

De acordo com os estudos realizados por Carashi *et al.* (2002), descreve-se que em termos físicos o aumento quantitativo de particulado aumenta a absorção de água, indicado justamente pela presença de falhas conforme o enchimento e/ou a natureza hidrofílica da fase dispersa. Porém, é possível observar na Tabela 1 que houve uma diminuição da absorção de água conforme o aumento gradual dos resíduos (AL/MG), condicionando que as frações mássicas apresentam efeitos significativos. Esse fenômeno está associado principalmente a distribuição das partículas em um meio molecular, embora os materiais que constituem as duas fases possuam características hidrofóbicas.

Adhikary *et al.* (2008) ao estudarem compósitos poliméricos com adição de pó de madeira descrevem que o aumento das proporções do material de reforço em intervalos de 2 e 3 % diminuem a absorção de água, relacionando a densidade da matriz utilizada. Esse fator justifica que frações mesmo que com intervalos baixos causam influência direta no comportamento físico do compósito final.

Observa-se que nas proporções (AL-10/AL-20) a porosidade aparente apresentou relativa diminuição, este aspecto pode indicar uma boa percolação dos fluidos na matriz, de modo a considerar a baixa absorção de moléculas de água que ocasionalmente difundem a presença de vazios dentro da

estrutura molecular. Em contrapartida, as proporções (MG-10/MG-20) apresentaram aumento na propriedade de porosidade de acordo com o acréscimo da fase dispersa.

Avaliando os valores da massa específica aparente é possível observar que os compósitos atenuaram um acréscimo proporcional a quantidade das cargas de reforço em relação ao desempenho da resina, indicando que tais frações correspondem a regra da mistura, onde as fases que constituem o material devem colaborar para o comportamento final do mesmo (CALLISTER, 2016).

3.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO

Os corpos de prova dos compósitos de alumínio e de mármore e granito foram submetidos a ensaios para determinação da resistência à tração, cujo os resultados foram relativos conforme a variação das frações mássicas dos materiais de reforço. Os valores são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados mecânicos de resistência à tração para os compósitos (AL) e (MG).

Resíduo (%)	Tensão de Resistência (MPa)	Alongamento Máximo (mm)	Módulo Elástico (GPa)
MP	17,93±6,29	5,72±0,91	0,60±0,72
AL-10	27,11±3,49	8,60±0,95	0,76±0,12
AL-20	23,21±0,86	6,76±0,44	0,85±0,04
MG-10	31,45±5,28	2,50±0,53	2,28±0,15
MG-20	34,61±2,86	2,26±0,28	2,77±0,29

Constata-se que as cargas corroboraram a um efeito significativo em relação a matriz plena (MP), ou seja, apresentaram-se como cargas de reforço efetivo.

A resistência dos compósitos com resíduo de alumínio (AL-10 e AL-20) diminuíram conforme aumento de carga, demonstrando que o valor da resistência à tração é dependente da distribuição das partículas na matriz polimérica, descritos também pelos estudos de José Neto *et al.* (2007).

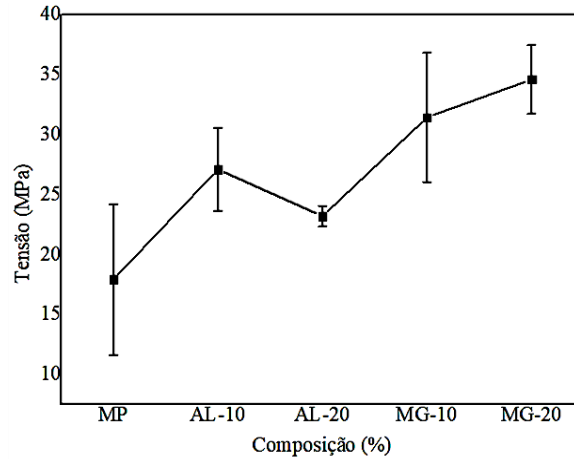
A quantidade de água absorvida no sistema também indica mudanças no valor da resistência, uma vez que este termo é condizente com a porosidade aparente. Além disso, nota-se um aumento do módulo de elasticidade proporcional a quantidade de resíduo, considerando dessa forma que a adição da fase dispersa particulada diminui o movimento das cadeias poliméricas.

As frações MG-10 e MG-20 mostraram que a resistência depende também das condições químicas e físicas do material, obtendo um aumentativo de até 9,13 % entre os teores de carga de mármore e granito propriamente ditos. Outro fator a ser levado em consideração é o escoamento elástico deste material, especificando melhor flexibilidade e principalmente mobilidade molecular, visto que a

homogeneização do mármore e granito tende a empregar variadas condições para interação com as moléculas da resina poliéster.

A Figura 2 mostra um gráfico comparativo entre os compósitos dos diferentes resíduos utilizados neste trabalho, condicionando a composição mássica e a resistência a tração.

Figura 2. Relação das frações mássicas dos compósitos com suas propriedades mecânicas.



Observa-se que o aumento gradual dos resíduos de mármore e granito possuem maior resistência com relação ao alumínio. Berger *et al.* (1997) ditam que o comportamento da carga de reforço em solicitações baixas depende do tamanho da partícula, correlacionando as interações partícula-partícula e logicamente como estes são dispersos no sistema. Ademais, a superfície de contato de cada fase dispersa também altera os resultados de resistência mecânica dos compósitos.

A Tabela 3 apresenta um comparativo dos compósitos com melhores resultados deste trabalho com outros tipos de compósitos reforçados com partículas e/ou fibras.

Tabela 3. Comparativo dos melhores resultados com outras literaturas

Resíduo (%)	Tensão de Resistência (MPa)	Fonte
AL-10	27,11±3,49	Este trabalho
MG-20	34,61±2,86	Este trabalho
Lama vermelha (10 %)	41,57±4,82	Santos <i>et al.</i> (2019)
Caulim Flint (30 %)	25,76±4,38	Barbosa <i>et al.</i> (2018)

3.3 RESISTÊNCIA À CHAMA (FLAMABILIDADE)

Os ensaios de resistência às chamas foram conduzidos de acordo com a taxa de queima, calculada pela relação do comprimento do corpo de prova com o tempo de queima. Os valores são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Taxas de flamabilidade

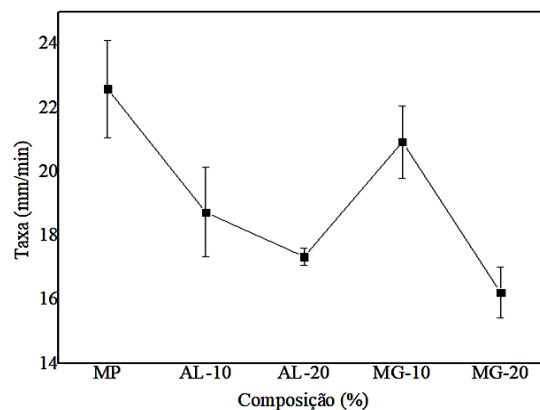
Resíduo (%)	Taxa (mm/min)
MP	22,60±1,52
AL-10	18,74±1,40
AL-20	17,35±0,27
MG-10	20,94±1,13
MG-20	16,23±0,79

Conforme os dados obtidos é possível notar que os resultados apontaram para os compósitos de 20 % como resultado progressivo, para os dois resíduos atuantes, com isso, neste teste a adição de reforço também concorda com a probabilidade de significância, onde afirma que as composições são diferentes entre si.

A margem de erro entre os compósitos se mostrou pequena, apontando comportamentos semelhantes de resistência à chama. Segundo a Resolução do CONTRAN/14 os revestimentos internos da indústria automobilística devem possuir uma taxa de propagação de queima de 100 mm/min, portanto, em comparação com os dados dos compósitos estudados os materiais se mostraram muito abaixo do limite proposto pela norma, cerca de 83 % para o melhor resultado (MG-20), indicando que estes possuem tendências de um bom retardante de chamas.

Uma análise gráfica esclarece melhor a comparação dos compósitos em relação ao desempenho da resina (Figura 3).

Figura 3. Comportamento térmico das frações estudadas



Nota-se que 20 % de carga de mármore e granito obtiveram o melhor resultado, embora o conceito de resistência a queima não esteja apenas associado a este fator, mas sim, a própria composição mineralógica. A presença de minerais como feldspato, mica e quartzo torna o granito um material extremamente resistente, até mesmo do que o próprio mármore.

Os compósitos finais também ratificam um efeito positivo na relação com a Norma ASTM D 635 (Tabela 5), onde em termos percentuais todas as proporções se mostraram efetivas.

Tabela 5. Comparativo das taxas de propagação das chamas nos compósitos

Resíduo (%)	Taxa (mm/min)	Fonte
AL-20	17,35	Este trabalho
MG-20	16,23	Este trabalho
ASTM 635	40,00	-

4 CONCLUSÃO

Os resíduos utilizados no trabalho apresentaram compatibilidade com a matriz poliéster e, logicamente, um efeito significativo conforme a adição de particulado. Em termos de comparação das fases dispersas para os ensaios físicos, os compósitos apresentam baixa absorção, indicado principalmente pela dispersão e natureza físico-química das fases.

Nesse contexto, a porosidade aparente também se relaciona diretamente com os fatores citados acima, cujo os vazios internos podem ser explicados pela presença de gases causados pela dificuldade de percolação dos fluidos.

Para os testes mecânicos, o resíduo de mármore e granito apresentou melhores propriedades de resistência à tração. Em termos percentuais, o corpo de prova mais resistente apresentou intervalo de até 48,19 % em relação a resina plena.

O ensaio de flamabilidade assegurou que todos os compósitos produzidos neste estudo estão de acordo com as normas, apresentando uma margem de 79 % - 83 % para a Resolução CONTRAN/14, além de classificação HB pela norma ASTM 635.

Com base no disposto, conclui-se que os resíduos estudados possuem, pelas propriedades analisadas, potencial utilização para incorporar novos materiais, podendo empregar revestimentos internos em gerais. Contudo, os resultados deste estudo não garantem fidedignidade para diferentes contextos de aplicação, podendo ser necessário realização de outros ensaios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao laboratório de Engenharia Química (LEQ), a Universidade Federal do Pará, ao Grupo de Materiais Compósitos e a CAPES.

REFERÊNCIAS

- ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). Características Químicas e Físicas. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>. Acesso em: 20/07/20.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) – NBR 12766 – Rochas para Revestimento, Determinação da Massa Específica Aparente, Porosidade Aparente e Absorção D'água Aparente, BR, 1992.
- ADHIKARY, K.B.; PANG, S.; STAIGER, M.P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composite Part B* 39: 807-815, 2008.
- ALBINANTE, S. R., PACHECO, É. B. A. V., VISCONTE, L. L. Y. (2013) Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. *Química Nova*, vol. 36, n. 1, p. 114-122.
- ASTM D 3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (Metric). Annual Book of Standards, American Society for Testing and Materials, EUA, 2008.
- ASTM D 635. Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extend and Time of Burning of Plastic in a Horizontal Position. Annual Book of Standards, American Society for Testing and Materials, EUA, 2008.
- BARBOSA, K. S. L. Compósitos de matriz poliéster isoftálico com carga de resíduo industrial e reforço de fibras naturais curtas. In 73º Congresso Anual da ABM, São Paulo-SP, P. 1868-1878, 2018.
- BERGER, M.J.; STARK, N.M. Investigations of species effects in na injection-molding-grade, wood-filled polypropylene. Fourth International Conference on Wood/fiber-Plastic Composites. Madison, 1997.
- CALLISTER W. *Ciência e Engenharia de Materiais - uma introdução*. 9 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- COSTA, L. C. F. Obtenção e Estudo de um Compósito de Matriz de Poliéster e Carga de Resíduos de Mármore. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2017.
- CARASCHI, J.C. et al. Compósitos biodegradáveis de polihidroxibutirato (PHB) reforçado com farinha de madeira: propriedades e degradação. *Maringá, Paraná*. vol. 24, n. 6, p. 1609-1614, 2002.
- JOSÉ R. A. NETO *et al.* Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta, Campina Grande (PB), vol. 17, n. 1, P. 10-15, 2007.
- SANTOS, E. R. S. *et al.* Análise da variação da granulometria da lama vermelha nas propriedades dos compósitos. In XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados ENEMP 2019, Belém-PA. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2019.