

USO DE RESÍDUO INDUSTRIAL (GESSO) COMO REFORÇO A COMPRESSÃO DE SISTEMAS EPÓXI

Data de submissão: 20/08/2023

Data de aceite: 01/09/2023

Walisson Pogian de Jesus

Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/7454495480955258>

David Coverdale Rangel Velasco

Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/9356476964884212>

Júlia Audrem Gomes de Oliveira

Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/6012000864762349>

Felipe Perissé Duarte Lopes

Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/1944239448019813>

Djalma Souza

Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/5013801434143344>

Carlos Maurício Fontes Vieira

Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/6309884585355966>

RESUMO: A indústria de processos desempenha um papel vital na fabricação de diversos produtos, mas também enfrenta desafios decorrentes da geração de resíduos. Transformar esses subprodutos em recursos de valor agregado é uma meta crescente para promover a sustentabilidade econômica e ambiental. Os compósitos, conhecidos por combinar propriedades distintas de materiais diversos, estão emergindo como uma abordagem promissora na engenharia de materiais, permitindo a obtenção de materiais otimizados que possuem o potencial de utilizar os resíduos como os supracitados. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da incorporação de resíduos da produção de ácido lácteo, gesso industrial, na resistência a compressão de um sistema epóxi DGEBA/DETA. Formulações com 0, 5, 10, 15 e 20% de resíduos foram

produzidas e ensaiadas conforme a ASTM D695. Os resultados deste trabalho indicaram que a adição de particulados de gesso pode ensejar em ganhos significativos de resistência e rigidez de sistemas epóxi quando sujeitos a compressão, o que implica em ganhos tecnológicos e ambientais dos compósitos desenvolvidos.

PALAVRAS-CHAVE: Co-produtos; Compósitos; Gesso Industrial; Resistência à compressão; Sulfato de Cálcio.

USE OF WASTE INDUSTRIAL (GYPSUM) AS A REINFORCEMENT IN THE COMPRESSION OF EPOXY SYSTEMS

ABSTRACT: The process industry plays a vital role in the manufacture of various products, but it also faces challenges arising from waste generation. Turning these by-products into value-added resources is a growing goal to promote economic and environmental sustainability. Composites, known for combining different properties of different materials, are emerging as a promising approach in materials engineering, allowing the obtainment of optimized materials that have the potential to use wastes such as those mentioned above. In this sense, this work aims to evaluate the influence of the incorporation of residues from the production of lactic acid, industrial gypsum, on the compressive strength of a DGEBA/DETA epoxy system. Formulations with 0, 5, 10, 15 and 20% residues were produced and tested according to ASTM D695. The results of this work indicated that the addition of gypsum particulates can lead to significant gains in strength and stiffness of epoxy systems when subjected to compression, which implies technological and environmental gains for the composites developed.

KEYWORDS: Co-products; Composites; Industrial Gypsum; Compressive Strength; Calcium Sulfate.

1 | INTRODUÇÃO

A indústria de processos desempenha um papel fundamental na produção de uma vasta gama de produtos, desde alimentos e produtos químicos até materiais de construção e energia. No entanto, essa atividade industrial também gera uma quantidade significativa de resíduos, que podem variar em composição e grau de toxicidade. Esses resíduos incluem efluentes líquidos, emissões gasosas, resíduos sólidos e subprodutos indesejados, muitos dos quais apresentam desafios ambientais e de gerenciamento. A busca por práticas de produção mais sustentáveis e o desenvolvimento de tecnologias de reutilização desses resíduos são áreas de foco crescente na indústria de processos, visando minimizar os impactos negativos e maximizar a eficiência no uso de recursos (OSSOLI *et al.*, 2023; MARVILA *et al.*, 2023; BRITO *et al.*, 2023; TURKBEN *et al.*, 2023; AHMED *et al.*, 2023).

Nessas produções é comum a geração de materiais que geralmente são descartados em aterros. A utilização de aterros acarreta custos de transporte, disposição e da ótica ambiental, deve ser utilizada como último recurso. Neste sentido, é crescente o empenho em transformar estes resíduos sólidos em coprodutos, que deixariam de ser um custo adicional, e se tornariam uma fonte de renda (DE ABREU; FORTES; BRITO, 2019).

Um exemplo notável é a produção de ácido láctico, que envolve a fermentação de hidratos de carbono. Como subproduto desse processo, é produzido cerca de uma tonelada de gesso, que deve ser descartada para cada tonelada de ácido láctico produzida pelo método convencional de fermentação e recuperação. Esses fatores prejudicam na rentabilidade dos processos produtivos, e até mesmo, podem ensejar na inviabilidade econômica, devido aos custos de descartes dos resíduos (OJO; SMIDT, 2018).

Adicionado a isto, a busca por materiais avançados que atendam às exigências contemporâneas de desempenho, sustentabilidade e economia tem sido uma constante na área de engenharia de materiais. Nesse contexto, os compósitos têm ganhado destaque, oferecendo a possibilidade de combinar propriedades distintas de diferentes materiais para criar sistemas híbridos otimizados (SANGMESH *et al.*, 2023; LUNETTO *et al.*, 2023).

O resíduo de gesso tem potencial para desempenhar diversas funções, como revestir paredes e tetos, funcionar como forro e retardador do tempo de solidificação do cimento. Além disso, encontra aplicações na área médica, como em cirurgias e traumatologia, assim como na agricultura como condicionador de solo. Na indústria cerâmica, metalúrgica e de plásticos, é empregado para criar moldes, destacando-se entre uma variedade de outros aplicações. Por outro lado, o gesso, composto majoritariamente por sulfato de cálcio, é conhecido por sua baixa resistência à compressão, limitando seu uso. Entretanto, quando utilizado como reforço em certas aplicações, apresenta propriedades interessantes (BARTOLOMEI; WIEBECK, 2019).

Lewis *et al.* (2006), utilizou o sulfato de cálcio (CS) incorporado à matriz polimérica de carboximetilcelulose (CMC) com hialuronano (HY). Observou-se que houve um aumento significativo da resistência à compressão em concentrações de 7,5% e 10% de CMC com CS comparado ao CMC puro. A resistência aumentou em 88% e 85%, respectivamente (LEWIS; THOMES; PULEO, 2006).

Dentre os polímeros mais utilizados como matriz para compósitos, a resina epóxi devido à sua combinação de resistência mecânica e aderência, conferindo aos materiais compósitos uma boa durabilidade. As resinas epóxi são polímeros sintéticos, com um nome que deriva do grego: “epi” (sobre ou entre) e “oxi” (oxigênio). Essa designação está intrinsecamente ligada à estrutura química do grupo epóxi, que consiste em um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, Figura 1 (JIN; LI; PARK, 2015).

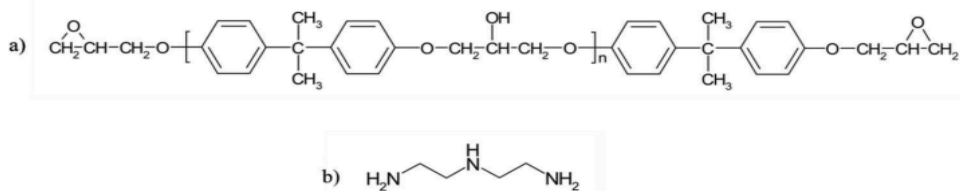


Figura 1. Estruturas químicas de (a) DGEBA (n = 0,03) e (b) DETA.

Fonte: BOUTIN *et al.* (2021).

A resina epóxi éter diglicidílico de bisfenol A (DGEBA) combinada com o agente de cura dietilenotriamina (DETA) tem sido amplamente estudada devido às suas propriedades mecânicas e resistência química. Essa combinação resulta em uma matriz polimérica de alta rigidez e durabilidade, tornando-a ideal para diversas aplicações, como na indústria aeroespacial, automotiva e construção civil (ZACHARUK *et al.*, 2011).

Velasco *et al.* (2023) demonstraram que materiais particulados usados como cargas como um potencial agente modificador para composições epóxi, provando que a utilização de resíduos alterou positivamente e melhoram o desempenho dos compósitos epoxídicos. Foi observado que o processamento das partículas teve um impacto positivo na resistência à compressão dos compósitos, onde pode-se observar que as formulações contendo 10% e 20% de carga processada apresentaram resultados superiores em comparação com a resina epóxi pura, enquanto a formulação contendo 30% apresentou desempenho comparável.

Uma das principais vantagens da incorporação de resíduos industriais, como o gesso, no compósito é a gestão sustentável de resíduos. A reutilização de resíduos industriais como carga reforçadora em compósitos não apenas confere uma destinação adequada a esses materiais, mas também reduz a demanda por recursos in natura e minimiza o impacto ambiental associado à produção de materiais. Além disso, essa abordagem contribui para uma sustentabilidade econômica, em que resíduos são transformados em recursos, causando impacto positivo em toda uma cadeia produtiva (TISSERANT *et al.*, 2017).

No entanto, a composição adequada desse compósito é fundamental para garantir um equilíbrio entre as propriedades desejadas. A proporção entre a matriz polimérica e a carga de gesso desempenha um papel crucial na determinação das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão. Reduzir a porcentagem de resina epóxi na matriz do compósito pode resultar em uma maior permeabilidade do material, afetando sua resistência e durabilidade (SIENKIEWICZ; CZUB, 2023; STAROKADOMSKY; ISHENKO, 2019).

Neste sentido, esse estudo visa avaliar a otimização da composição, levando em consideração tanto as propriedades mecânicas quanto as considerações ambientais. Sendo explorados os efeitos da proporção entre os componentes, bem como o impacto da reutilização do resíduo industrial, o gesso, na propriedade mecânica de resistência à compressão do compósito. Tendo como objetivo avançar no entendimento das potencialidades desses compósitos híbridos para diversas aplicações, contribuindo para a convergência entre tecnologia e responsabilidade ambiental.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os particulados utilizados nesse estudo são resíduos oriundos da produção de ácido láctico da Corbion (Purac), Campos dos Goytacazes – RJ, conhecido como gesso industrial. Após processo de amostragem, o subproduto foi seco por 24 horas a 70°C em uma estufa para remoção do excesso umidade. Posteriormente, foi realizado um peneiramento com peneira de 100 mesh, sendo utilizado o material que passasse por esta.

O sistema epóxi utilizado neste trabalho foi o DGEBA/DETA, que é fabricado pela Silaex e comercializado pela Avipol sob respectivamente nome SQ1005 e SQ3131. A quantidade de endurecedor utilizada para cada 100 partes de resina (phr), em peso, foi igual à 16.

Foram examinados 5 corpos de prova para cada composição, com frações volumétricas de 0, 5, 10, 15 e 20% de Gesso. Os corpos de prova foram produzidos utilizando o gesso imediatamente após a sua retirada da estufa, para evitar absorção de umidade do ar, e confeccionados utilizando moldes de silicone. Após a cura em temperatura ambiente, os corpos de prova passaram por uma pós-cura na estufa a 70°C durante 2,5 horas. Em seguida, eles foram lixados para adquirir dimensões de 12,5x12,5x6 mm e ensaiados a 1,5 mm/min, de acordo com a ASTM D695-23 (ASTM, 2023). Para a condução deste experimento, empregou-se equipamento de ensaios mecânicos universal da marca Instron, modelo 34FM-100-SA, conforme a Figura 2.



Figura 2: Máquina Universal de Ensaios - Instron 34FM-100.

Fonte: Adaptado de INSTRON (2019).

Por fim, foi conduzida uma análise de variância (ANOVA) juntamente com o teste de Tukey, visando a observação de discrepâncias estatísticas potenciais entre os grupos amostrais. O nível de significância estatística adotado foi de 5%. Estas estimativas foram executadas empregando o programa PAST, seguindo a abordagem algorítmica proposta por Copenhaver e Holland (1988).

3 | RESULTADOS

A resistência a compressão dos compósitos pode ser observada na Figura 3. Por meio desta, pode-se observar que a inserção de particulados de gesso pode ensejar em ganhos de resistência de 12 a 23,5%, sendo todas as formulações com a incorporação de gesso significativamente mais resistentes segundo a ANOVA/teste de Tukey. Acrescenta-se ainda que, há uma tendência de redução de resistência nas formulações com 20% de gesso, quando comparada com as formulações com 10 e 15% de gesso. Contudo está ainda não é significativa segundo a ANOVA.

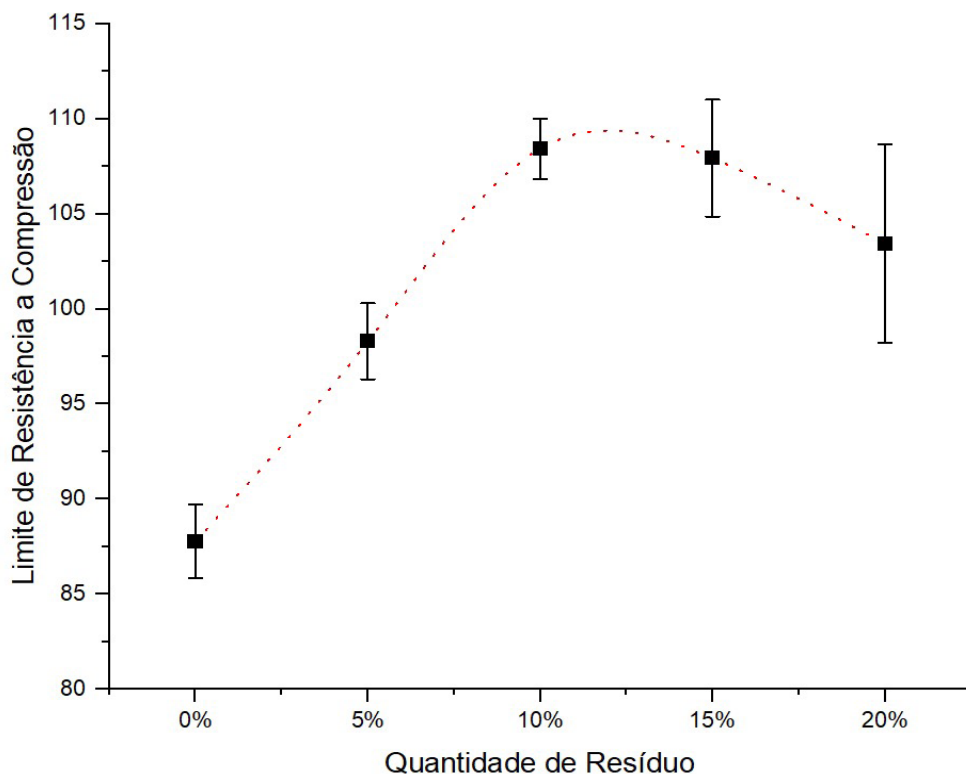


Figura 3: Resistência a compressão em função da quantidade de resíduos.

Este comportamento está em linha com a literatura que aponta que a inserção de particulados pode elevar a resistência da matriz epóxi, mas a partir de determinado valor de incorporação se observa uma queda de resistência a compressão e aumento de desvio padrão (VELASCO *et al.*, 2023). Isto pode ser explicado pelo resíduo possuir uma boa interface com a matriz, e inicialmente atuar como reforço. Contudo, a partir de uma determinada quantidade de particulados, estes tendem a elevar a presença de vazios e a se aglomerar, o que não só insere defeitos na matriz, mas também prejudica na interface entre reforço e particulado (LUO *et al.*, 2021; GONÇALVES *et al.*, 2019; RUEDA *et al.*, 2017).

A cerca da rigidez, pode-se observar um aumento conforme se inseria particulados na formulação, Figura 4. Isto pode ser explicado pela natureza do reforço que é rígido, bem como que a inserção destes particulados tende a diminuir a mobilidade das cadeias poliméricas e, portanto, elevar o módulo de elasticidade dos particulados (BOCCARUSSO *et al.*, 2021; DANILAEV *et al.*, 2022).

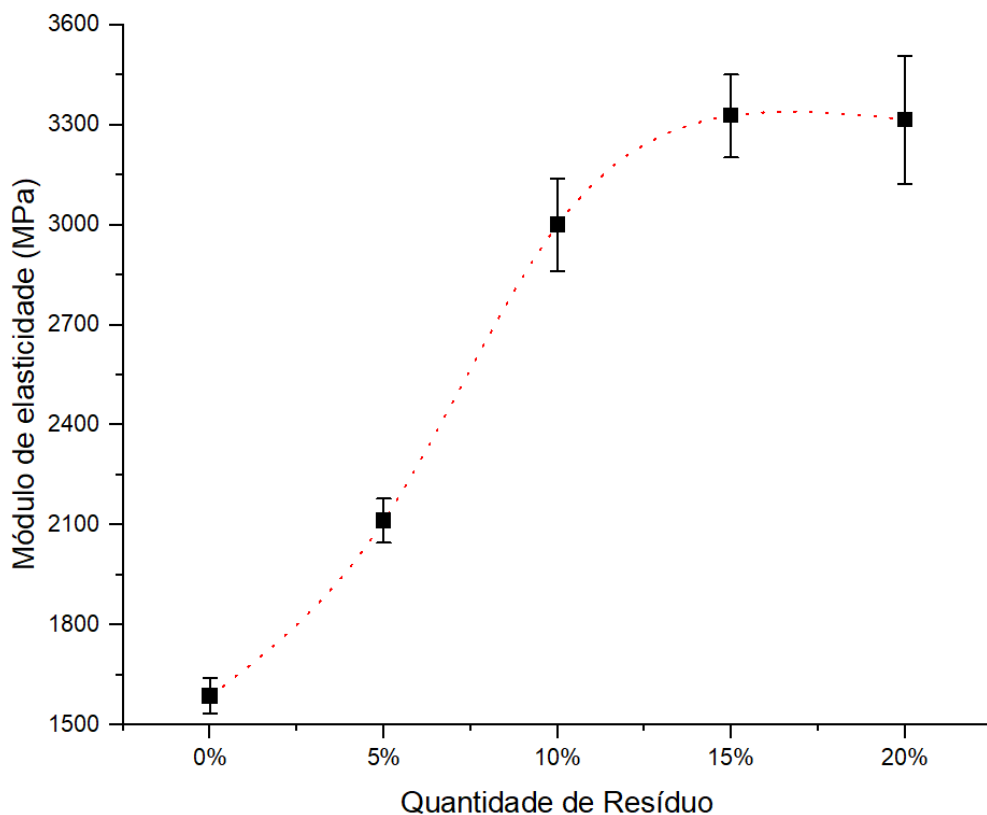


Figura 4: Módulo de elasticidade em função da quantidade de resíduos.

A aplicação da ANOVA e teste de Tukey, ressaltou os ganhos de rigidez observados a cada adição de 5% de particulados são significativos. Esta tendência, entretanto, não se manifestou nas formulações contendo 15% e 20% de gesso, uma vez que não se observou diferenças significativas entre esses grupos amostrais. O que está em linha com comportamento de outros materiais da literatura, sendo isto justificado também pela inserção de defeitos e piora de interface matriz e reforço (VELASCO *et al.*, 2023; LUO *et al.*, 2021; GONÇALVES *et al.*, 2019; RUEDA *et al.*, 2017).

4 | CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho pode-se observar que a adição dos particulados de gesso permite ganhos de resistência e rigidez significativos do sistema epóxi, quando sujeito a compressão. Neste sentido, observou-se uma viabilidade da utilização deste resíduo tanto do ponto de vista ambiental, quanto do ponto de vista tecnológico.

REFERÊNCIAS

AHMED, K. Z.; FAIZAN, M.; AZAM, F.; FAHEEM, A. Hardness assessment of novel waste tire rubber-polypropylene composite. **Materials today: proceedings**, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.445

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D695-23: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken: **ASTM International**, 2023. DOI: 10.1520/D0695-23

BARTOLOMEI, S.S.; WIEBECK, H. Characterization of gypsum waste from civil construction to obtain polymer composites. **Materials science forum**, v. 958, p. 47–51, 2019. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.958.47

BOCCARUSSO, L.; MOCERINO, D.; DURANTE, M.; IUCOLANO, F.; MINUTOLO, F. M. C.; LANGELLA, A. Recyclability Process of Gypsum Reinforced with Hemp Fabrics: Impact and Flexural Behaviour. **ESAFORM 2021**, 2021. DOI: 10.25518/esaform21.4044

BOUTIN, M.; ROGEON, A.; AUFRAY, M.; PIQUET, R.; ROUILLY, A. Influence of flax fibers on network formation of DGEBA/DETA matrix. **Composite interfaces**, v. 28, n. 1, p. 17–34, 2021. DOI: 10.1080/09276440.2020.1736454

BRITO, M. R.; MARVILA, M. T.; LINHARES JUNIOR, J. A. T. AZEVEDO, A. R. G. Evaluation of the properties of adobe blocks with clay and manure. **Buildings**, v. 13, n. 3, p. 657, 2023. DOI: 10.3390/buildings13030657

COPENHAVER, M. D.; HOLLAND, B. Computation of the distribution of the maximum studentized range statistic with application to multiple significance testing of simple effects. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 30, n. 1, p. 1-15, 1988. DOI: 10.1080/00949658808811082

DANILAEV, M. P.; KARANDASHOV, S. A.; KIYAMOV, A. G.; KLABUKOV, M. A.; KUKLIN, V. A.; SIDOROV, I. N.; ENSKAYA, A. L. Formation and Behavior of Residual Stresses in Particulate-Filled Polymer Composites with a Partially Crystalline Structure. **Phys Mesomech**, v. 25, p. 335-343, 2022. DOI: 10.1134/S1029959922040075

DE ABREU, J. A.; FORTES, A. C. C.; BRITO, J. S. Reaproveitamento das cascas de coco verde em teresina-pi: perspectivas e possibilidades. In **Anais do 2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, 2019. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/IV-118.pdf>. Acesso em: 15 Ago. 2018.

GONÇALVES, J.A.V.; CAMPOS, D.A.T.; OLIVEIRA, G.J.; ROSA, M.L.S.; MACÊDO, M.A. Mechanical properties of epoxy resin based on granite stone powder from the Sergipe fold-and-thrust belt composites. **Materials Research**, v. 17, p. 878-887, 2014. DOI: 10.1590/S1516-14392014005000100

INSTRON. Request 3d cad model of your 3400 series frame. Cairo: **INSTRON Corporation**, 2022. Disponível em: <https://www.instron.com/pt-br/products/testing-systems/universal-testing-systems/low-force-universal-testing-systems/3400-series/request-3d-cad-model>. Acesso em: 10 Ago. 2018.

JIN, F.; LI, X.; PARK, S. Synthesis and application of epoxy resins: A review. **Journal of industrial and engineering chemistry**, v. 29, p. 1–11, 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.03.026

LEWIS, K. N.; THOMAS, M. V.; PULEO, D. A. Mechanical and degradation behavior of polymer-calcium sulfate composites. **Journal of materials science: Materials in medicine**, v. 17, n. 6, p. 531–537, 2006. DOI: 10.1007/s10856-006-8936-0

LUNETTO, V.; GALATI, M.; SETTINERI, L.; IULIANO, L. Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future research. **Journal of manufacturing processes**, v. 85, p. 858–874, 2023. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.020

LUO, X.; GAO, J.; LIU, C.; HE, Z. Effects of polymers on workability and early microstructure of gypsum-based materials. **ACI materials journal**, v. 118, n. 5, p. 29–34, 2021. DOI: 10.14359/51732929

MARVILA, M. T.; DE AZEVEDO, A. R. G.; LINHARES JÚNIOR, J. A. T.; Vieira, C. M. F. Activated alkali cement based on blast furnace slag: effect of curing type and concentration of Na₂O. **Journal of materials research and technology**, v. 23, p. 4551–4565, 2023. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.088

OJO, A. O.; DE SMIDT, O. Lactic acid: A comprehensive review of production to purification. **Processes**, v. 11, n. 3, p. 688, 2023. DOI: 10.3390/pr11030688

OSSOLI, E.; VOLTINTESTA, F.; STABILE, P.; REGGIANI, A.; SANTULLI, C.; PARIS, E. Upcycling of composite materials waste into geopolymer-based mortars for applications in the building sector. **Materials letters**, v. 333, n. 133625, 2023. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.133625

RUEDA, M. M.; AUSCHER, M. C.; FULCHIRON, R.; PÉRIÉ, T.; MARTIN, G.; SONNTAG, P.; CASSAGNAU, P. Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding. **Progress in polymer science**, v. 66, p. 22–53, 2017. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007

SANGMESH, B.; PATIL, N.; JAISWAL, K. K.; GOWRISHANKAR, T. P.; SELVAKUMAR, K. K.; JYOTHI, M. S.; JYOTHILAKSHMI, R.; KUMAR, S. Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review. **Construction and building materials**, v. 368, n. 130457, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130457

SIENKIEWICZ, A.; CZUB, P. Modification of epoxy compositions by the application of various fillers of natural origin. **Materials**, v. 16, n. 8, p. 3149, 2023. DOI: 10.3390/ma16083149

STAROKADOMSKY, D.L.; ISHENKO, A.A. Epoxy Composites Filled with Gypsum (Alabaster G-5): Possible Ways for Strengthening, Stabilization, and Structuration. In **Composite Materials for Industry, Electronics, and the Environment**; Apple Academic Press: Waretown, NJ, p. 25–44, 2019.

TISSERANT, A.; PAULIUK, S.; MERCIAI, S.; SCHMIDT, J.; FRY, J.; WOOD, R.; TUKKER, A. Solid waste and the circular economy: A global analysis of waste treatment and waste footprints: Global analysis of solid waste and waste footprint. **Journal of industrial ecology**, v. 21, n. 3, p. 628–640, 2017. DOI: 10.1111/jiec.12562

TURKBEN, M.; KOCAMAN, S.; ÖZMERAL, N.; SOYDAL, U.; CERIT, A.; AHMETLI, G. Sustainable production of recycled rubber waste composites with various epoxy systems: A comparative study on mechanical and thermal properties. **Industrial crops and products**, v. 195, n. 116490, 2023. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116490

VELASCO, D.C.R.; LOPES, F.P.D.; SOUZA D.; LOPERA, H.A.C.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. Evaluation of composites reinforced by processed and unprocessed coconut husk powder. **Polymers**, v. 15, n. 5, p. 1195, 2023. DOI: 10.3390/polym15051195

ZACHARUK, M.; BECKER, D.; COELHO, L. A.; PEZZIN, S. H. Estudo da reação entre polietileno glicol e resina epoxídica na presença de N,N-dimetilbenzilamina. **Polímeros**, v. 21, n. 1, p. 73–77, 2011. DOI: 10.1590/S0104-14282011005000009