RESÍDUOS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP) NA CONSTRUÇÃO CIVIL: SUSTENTABILIDADE, ESTRATÉGIAS E DESAFIOS

Fiber-Reinforced Polymer (FRP) waste in construction: sustainability, strategies, and challenge

Daniela de Ávila Modesto Barcelos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG | daniela.barcelos@aluno.cefetmg.br

Peter Ludvig
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG | peter@cefetmg.br

Eduardo Romeiro Filho
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG | romeiro@dep.ufmg.br

Ricardo Filipe Mesquita Silva Mateus
Universidade do Minho | Guimarães, Braga (PT) | ricardomateus@civil.uminho.pt

Hélvio Júnio Barcelos
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG | helviojunio@gmail.com

Fabiana de Ávila Modesto
Universidade Federal de Itajubá | Belo Horizonte, MG | eng.fabianaavila@gmail.com

RESUMO

Os polímeros reforçados com fibras (FRP) são amplamente utilizados na indústria devido às suas propriedades mecânicas superiores e alta durabilidade. No entanto, o descarte inadequado desses materiais representa um desafio ambiental significativo, uma vez que a maioria dos resíduos ainda é destinada a aterros ou incinerada. Este estudo investiga alternativas sustentáveis para o reaproveitamento de resíduos de FRP na construção civil, considerando desempenho técnico, impacto ambiental e viabilidade econômica. A metodologia baseou-se em uma revisão integrativa da literatura, analisando diferentes técnicas de reciclagem, incluindo processos mecânicos, térmicos, químicos e eletroquímicos. Os resultados indicam que a reciclagem mecânica é a mais acessível, enquanto a térmica e a química permitem a recuperação de fibras de maior qualidade. Além disso, FRP reciclados podem ser aplicados em concretos, pavimentos e isolamentos. Conclui-se que estratégias combinadas e políticas públicas são essenciais para viabilizar soluções sustentáveis no setor da construção civil.

Palavras-chave: FRP; Reciclagem; Construção sustentável; Resíduos.

ABSTRACT

Fiber-reinforced polymers (FRP) are widely used in industry due to their superior mechanical properties and high durability. However, the improper disposal of these materials represents a significant environmental challenge, since most of the waste is still destined for landfills or incinerated. This study investigates sustainable alternatives for the reuse of FRP waste in civil construction, considering technical performance, environmental impact and economic viability. The methodology was based on an integrative literature review, analyzing different recycling techniques, including mechanical, thermal, chemical and electrochemical processes. The results indicate that mechanical recycling is the most accessible, while thermal and chemical recycling allow for the recovery of higher quality fibers. In addition, recycled FRP can be used in concrete, flooring and insulation. It is concluded that combined strategies and public policies are essential to enable sustainable solutions in the construction sector.

Keywords: FRP; Recycling; Sustainable construction; Waste.

1 INTRODUÇÃO

Os Polímeros Reforçados com Fibras (*FRPs*) são materiais compósitos constituídos por uma matriz polimérica reforçada com fibras de alta resistência, como vidro ou carbono. Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, baixa densidade, elevada durabilidade e resistência à corrosão, têm sido amplamente aplicados em setores como o aeroespacial, automotivo, naval e, mais recentemente, na construção civil, onde contribuem para o desenvolvimento de estruturas mais leves e duráveis (Karuppannan Gopalraj; Kärki, 2020a; Qureshi, 2022). A demanda global por *FRPs* tem crescido devido à necessidade de reduzir emissões de CO_2 e aumentar a eficiência estrutural (Fazio *et al.,* 2023). No entanto, esse aumento também gera mais resíduos, provenientes tanto da produção quanto do descarte de produtos em fim de vida útil (Wei; Hadigheh, 2022).

A destinação final dos *FRPs* ainda representa um desafio ambiental, já que grande parte desses materiais é atualmente descartada em aterros ou incinerada. Nesse contexto, a transição para um modelo de economia circular - fundamentado na reciclagem e no reaproveitamento - surge como uma estratégia promissora para reduzir a dependência de matérias-primas virgens e mitigar os impactos ambientais associados (DE Fazio *et al.,* 2023). Diferentes tecnologias de reciclagem de resíduos de *FRP*, como os processos mecânico, químico, térmico e eletroquímico, têm sido estudados (Fazio *et al.,* 2023, Isa *et al.*, 2022, Qureshi, 2022). No entanto, sua viabilidade em escala industrial exige uma análise integrada do desempenho técnico, dos impactos ambientais e da viabilidade econômica. Esta pesquisa avalia as alternativas mais promissoras para o reaproveitamento de resíduos de *FRP* na construção civil, com foco na identificação de estratégias sustentáveis que conciliem eficiência técnica, redução de impactos ambientais e viabilidade econômica.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida utilizando a revisão integrativa. Para a seleção do portfólio bibliográfico foram considerados “Artigos”, “Artigos de revisão” e “Artigos de pesquisa”, conforme nomenclatura das bases de dados, independentemente da data de publicação e idioma. As palavras-chave foram selecionadas de acordo com a questão específica deste estudo: alternativas viáveis e sustentáveis para o aproveitamento de resíduos de *FRPs* na construção civil, considerando sua contribuição para a economia circular e a sustentabilidade do ambiente construído. Assim, os seguintes descritores foram adotados na busca (("*fiber reinforced polymer waste*" OR "*FRP waste management*" OR "*composite recycling*" OR "*composite waste reuse*") AND ("*construction materials*" OR "*building materials*") AND ("*recycling method*" OR "*reprocessing technique*")) no título, resumo e palavras-chave dos documentos. As bases de dados Scopus, Web of Science, Science Direct e Dimensions foram utilizadas. A triagem dos artigos ocorreu em três etapas: (i) seleção inicial com base no título, excluindo estudos fora do escopo; (ii) leitura dos resumos para refinar a seleção; e (iii) análise integral dos artigos selecionados, garantindo a inclusão apenas dos estudos diretamente relacionados ao tema. Esse processo assegurou a construção de um portfólio bibliográfico sólido e relevante para a revisão.

2.1 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

A análise bibliográfica foi conduzida com base na relevância dos periódicos, no número de citações e na proeminência dos autores. A revisão bibliográfica identificou um total de 188 periódicos que abordam o tema. No entanto, observou-se que grande parte desses periódicos contém um único artigo publicado, o que evidencia a dispersão da literatura sobre o assunto. Para garantir uma análise mais representativa, a Figura 1 apresenta apenas os periódicos que possuem, no mínimo, cinco artigos publicados no portfólio selecionado, respondendo, em conjunto, por 43% dos documentos selecionados.

A influência dos autores foi avaliada por meio de análises de redes de coocorrência (clusters), realizadas com o uso do software VOSviewer, amplamente utilizado para visualizar correlações entre pesquisadores e as principais palavras-chave da literatura. As Figuras 2 e 3 apresentam as análises de clusters de autores e descritores do portfólio bibliográfico, respectivamente, evidenciando conexões entre diferentes grupos. No caso dos autores, observa-se que a produção acadêmica está fragmentada em múltiplos grupos de pesquisa, interligados por algumas pontes que sugerem colaboração entre instituições e abordagens complementares. De forma semelhante, as conexões entre clusters de descritores indicam associações temáticas entre ciência dos materiais, engenharia e sustentabilidade.

O primeiro grupo, centrado em ciência dos materiais, foca em propriedades mecânicas, destacando pesquisas sobre desempenho estrutural. O segundo, vinculado à engenharia e ciências ambientais, enfatiza a avaliação do ciclo de vida e economia circular, refletindo a crescente preocupação com impactos ambientais. O terceiro núcleo, abrangendo biologia e ecologia, aborda à gestão de resíduos e soluções

sustentáveis. Termos como pegada de carbono e lâmina de turbina indicam interesse em energias renováveis e eficiência energética.

Figura 01: Periódicos com ao menos cinco artigos no portfólio.

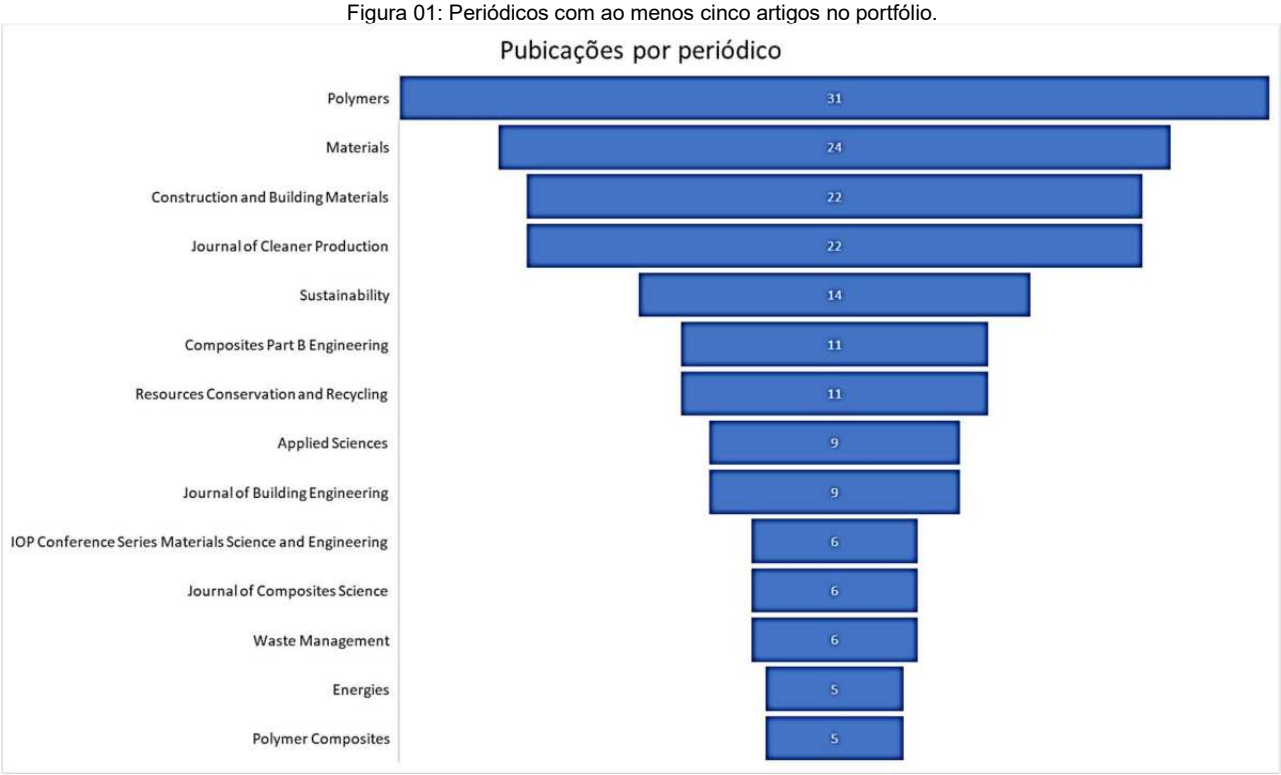
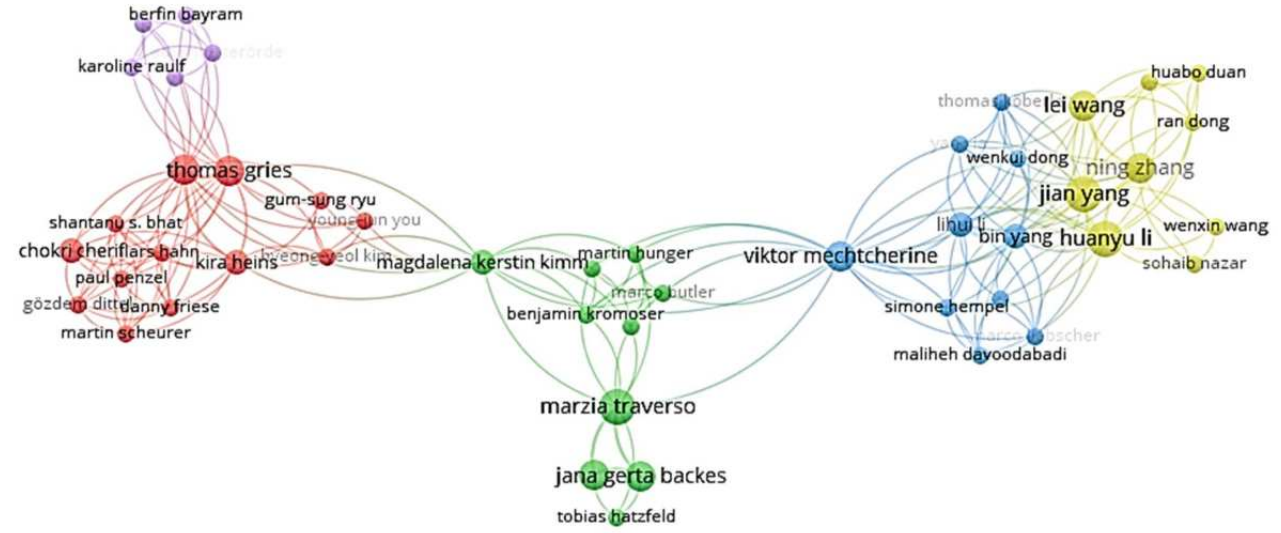


Figura 02: Análise de cluster dos autores.

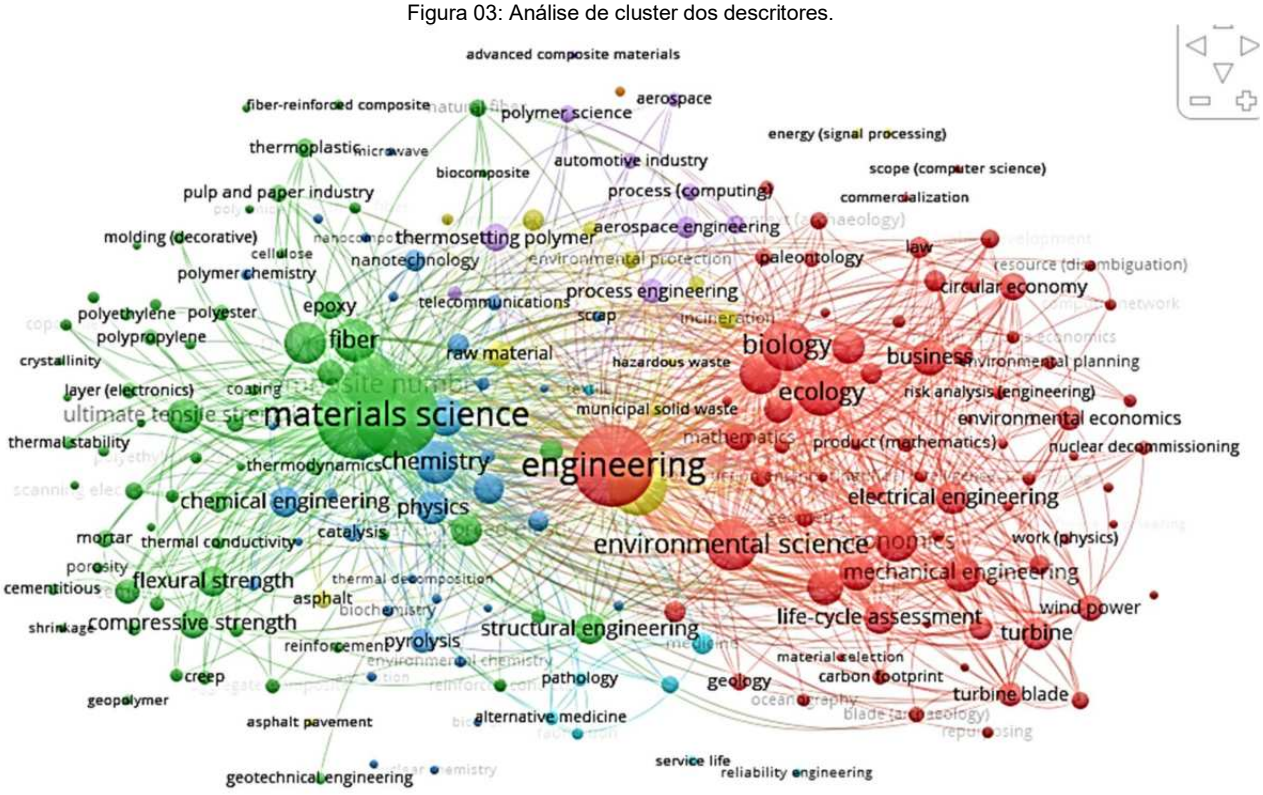


3 RESULTAOS E ANÁLISES

3.1 ESTRATÉGIAS DE DESCARTE E REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE FRP NA CONSTRUÇÃO

As estratégias de destinação de resíduos de *FRP*, em ordem de preferência, incluem prevenção, reutilização, reciclagem, incineração com ou sem recuperação energética e descarte em aterros (Qureshi, 2022). A alternativa mais sustentável é minimizar sua geração, sendo que o desperdício médio na fabricação de *FRP* é estimado em 10% do volume produzido (Bank; Yazdanbakhsh, 2014). Caso a eliminação do desperdício não seja viável, a reutilização e o reaproveitamento devem ser priorizados. A reutilização ocorre quando componentes de *FRP* são empregados novamente na mesma indústria, enquanto o reaproveitamento refere-se à aplicação em um novo uso, geralmente de menor valor (Schmid *et al.,* 2020).

Figura 03: Análise de cluster dos descritores.



A reciclagem pode ser mecânica, térmica, química ou eletroquímica (Wei; Hadigheh, 2022), gerando fibras com diferentes comprimentos, resistência mecânica e qualidade superficial. O desempenho do processo varia conforme o tipo do compósito (Fazio *et al.*, 2023). Quando minimização, reutilização ou reciclagem não forem viáveis, a recuperação energética por incineração pode ser uma alternativa. O coprocessamento em fornos de cimento para clínquer e a conversão parcial em combustível são opções viáveis. Na ausência de alternativas, a deposição em aterros deve ser o último recurso.

Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica de resíduos de *FRPs* fragmenta o material em pequenas partículas, sendo mais adequada para Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro (GFRP) (Fu *et al.,* 2021). Este processo não libera gases tóxicos (Isa *et al.,* 2022), mas gera produtos de baixo valor agregado (Qureshi, 2022). Sua principal limitação é o uso restrito como carga em compósitos, madeira artificial, asfalto e fonte mineral para a produção de cimento (Conroy; Halliwell; Reynolds, 2006). No concreto, resíduos moídos melhoram a resistência à flexão, tenacidade (Fu *et al.,* 2021) e durabilidade, (Tao; Hadigheh; Wei, 2023) mas reduzem a trabalhabilidade da mistura. Devido a essas aplicações, a reciclagem mecânica de GFRP já opera em escala industrial (Qureshi, 2022).

Reciclagem Térmica

A reciclagem térmica de *FRPs* utiliza calor para decompor a matriz polimérica, recuperando fibras e liberando energia da resina (Wei; Hadigheh, 2024). Viável especialmente para Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (CFRP), preserva a integridade das fibras de carbono (Meyer; Schulte; Grove-Nielsen, 2009), e justifica economicamente a reciclagem devido ao alto valor do material (Qureshi, 2022). As fibras recuperadas podem ser reutilizadas em novas matrizes poliméricas ou aplicações não estruturais. Os principais métodos térmicos são: (1) pirólise, (2) leitos fluidizados e (3) oxidação (Wei; Hadigheh, 2022). A pirólise, apesar do alto consumo energético, gera coprodutos e reaproveita energia, tornando-se economicamente atrativa (Wei; Hadigheh, 2022). A reciclagem térmica permite recuperar fibras (KARUPPANNAN GOPALRAJ; KÄRKI, 2020b), reduzindo a demanda por matérias-primas virgens e mitigando impactos ambientais. No entanto, desafios técnicos e custos operacionais ainda limitam sua ampla adoção, exigindo avanços para viabilização industrial (Ribeiro *et al.,* 2016).

Reciclagem Química

A reciclagem química de *FRP* ocorre por solvólise, que decompõe a resina e recupera fibras não danificadas, cargas e matriz despolimerizada (Yildirir; Onwudili; Williams, 2014). O processo varia conforme temperatura, pressão e reagentes, podendo utilizar fluidos catalíticos, subcríticos e supercríticos. Divide-se em alta (>200°C) e baixa temperatura (<200°C) (Isa *et al.,* 2022). Preserva cerca de 90% das propriedades mecânicas das fibras (Wei; Hadigheh, 2023), mas enfrenta altos custos e emissões nocivas. Alternativas sustentáveis, como água ou álcool, substituem reagentes perigosos, minimizando impactos ambientais (Oliveux; Dandy; Leeke, 2014).

Reciclagem Eletroquímica

A reciclagem eletroquímica remove a matriz de compósitos via altas correntes elétricas, recuperando fibras longas e limpas (Fazio *et al.,* 2023). No entanto, seu alto consumo energético inviabiliza a aplicação em GFRP, podendo demandar mais energia que a produção de fibras virgens (Mativenga *et al.,* 2016). O processo, realizado em solução aquosa, gera trincas e delaminação devido à formação de gases, comprometendo as propriedades mecânicas das fibras recuperadas (Fazio *et al.,* 2023).

Incineração

A incineração de resíduos de *FRP* promove a combustão da fração orgânica do material (Krauklis *et al.*, 2021), com ou sem recuperação de energia. Embora viável pelo alto poder calorífico do *FRP* (Qureshi, 2022), libera poluentes e gera resíduos para aterros (Krauklis *et al.,* 2021). A incineração sem recuperação energética, torna-se ainda menos sustentável, contrariando os princípios da economia circular. A coincineração em fornos de cimento, que incorpora a fração mineral ao clínquer e usa a resina como combustível, é uma alternativa mais responsável, mas exige trituração do resíduo, controle de metais pesados e gestão do boro, que afeta a resistência do cimento (Qureshi, 2022).

3.2 UTILIZAÇÕES POTENCIAIS PARA FRPS RECICLADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

FRPs reciclados tem grande potencial de uso na construção civil, tanto na forma de fibras moídas quanto em agregados estruturais, visando melhorar propriedades mecânicas, durabilidade e resistência de novos materiais. Entre as principais aplicações, destaca-se o uso de *FRP* moído na fabricação de madeiras artificiais e plásticos estruturais, criando materiais leves e resistentes, aptos a substituir a madeira natural em estacas marítimas, defensas, postes e passarelas. Esses materiais são trabalháveis e altamente duráveis em ambientes agressivos. A incorporação de *FRPs* reciclados em concretos reforçados é outra aplicação relevante, reduzindo fissurações precoces e melhorando a resistência mecânica e a durabilidade das estruturas. Fibras de vidro recuperadas têm se mostrado eficazes na mitigação de retração plástica e fissuração térmica, prolongando a vida útil das construções. No setor de infraestrutura, *FRPs* reciclados são empregados em pavimentação e reforço asfáltico, onde a adição de fibras melhora a resistência ao desgaste e a absorção de impacto. Estudos indicam que pequenas proporções de *FRP* triturado não comprometem as propriedades mecânicas do asfalto, tornando essa abordagem viável para rodovias (Lu *et al.,* 2023, *Nie et al.*, 2023). Adicionalmente, painéis de isolamento térmico e acústico derivados de *FRPs* reciclados são uma alternativa para construções sustentáveis, reduzindo a dependência de insumos convencionais e promovendo eficiência energética.

4 CONCLUSÃO

Esta pesquisa avaliou alternativas sustentáveis para resíduos de *FRP* na construção civil, priorizando a minimização, reutilização e reciclagem. A reciclagem mecânica, embora acessível, tem aplicação limitada devido à baixa qualidade das fibras recuperadas. As rotas térmica e química se mostraram mais eficazes na recuperação de fibras com boas propriedades, especialmente as de carbono, mas enfrentam desafios relacionados ao consumo energético, emissões e custos operacionais. A reciclagem química, por solvólise, preserva até 90% das propriedades das fibras, sendo promissora, mas ainda limitada por questões ambientais e econômicas. Já a eletroquímica, embora eficiente na remoção da matriz, apresenta alta demanda energética e degradação das fibras, restringindo sua aplicação em GFRPs. A incineração com recuperação energética possibilita a reutilização da fração mineral na produção de clínquer, reduzindo o consumo de matérias-primas virgens. A pesquisa identificou aplicações promissoras para *FRPs* reciclados, como fibras moídas em concreto e asfalto, painéis de isolamento térmico e acústico e madeira artificial para infraestrutura, contribuindo para a redução de impactos ambientais e o uso eficiente de recursos.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG e ao CEFET-MG pelo apoio institucional e pelo incentivo à pesquisa, que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BANK, L. C.; YAZDANBAKHSH, A. **Reuse of glass thermoset FRP composites in the construction industry—A growing opportunity**. Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE. **Anais**...2014.

CONROY, A.; HALLIWELL, S.; REYNOLDS, T. Composite recycling in the construction industry. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 8, p. 1216–1222, ago. 2006.

DE FAZIO, D. et al. A Review on the Recycling Technologies of Fibre-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Industrial Fields. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 4, p. 851, 18 abr. 2023.

FU, B. et al. Concrete reinforced with macro fibres recycled from waste GFRP. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125063, dez. 2021.

ISA, A. et al. A Review on Recycling of Carbon Fibres: Methods to Reinforce and Expected Fibre Composite Degradations. **Materials**, v. 15, n. 14, p. 4991, 18 jul. 2022.

KARUPPANNAN GOPALRAJ, S.; KÄRKI, T. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 3, p. 433, mar. 2020a.

KARUPPANNAN GOPALRAJ, S.; KÄRKI, T. A Study to Investigate the Mechanical Properties of Recycled Carbon Fibre/Glass Fibre-Reinforced Epoxy Composites Using a Novel Thermal Recycling Process. **Processes**, v. 8, n. 8, p. 954, 8 ago. 2020b.

KRAUKLIS, A. E. et al. Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 1, p. 28, 2021.

LU, D. et al. Enhancing sustainability in pavement Engineering: A-state-of-the-art review of cement asphalt emulsion mixtures. **Cleaner Materials**, v. 9, p. 100204, 2023.

MATIVENGA, P. T. et al. High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. **CIRP annals**, v. 65, n. 1, p. 45–48, 2016.

MEYER, L. O.; SCHULTE, K.; GROVE-NIELSEN, E. CFRP-recycling following a pyrolysis route: process optimization and potentials. **Journal of composite materials**, v. 43, n. 9, p. 1121–1132, 2009.

NIE, Y. et al. Performance and modification mechanism of recycled glass fiber of wind turbine blades and SBS composite-modified asphalt. **Applied Sciences**, v. 13, n. 10, p. 6335, 2023.

OLIVEUX, G.; DANDY, L.; LEEKE, G. **A step change in the recycling of composite materials**. 16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014. **Anais**...2014.

QURESHI, J. A Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16855, 15 dez. 2022.

RIBEIRO, M. C. S. et al. Recycling approach towards sustainability advance of composite materials' industry. **Recycling**, v. 1, n. 1, p. 178–193, 2016.

SCHMID, M. et al. Accelerating wind turbine blade circularity. **Brussels, Belgium, Wind Europe**, 2020.

TAO, Y.; HADIGHEH, S. A.; WEI, Y. Recycling of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite wastes in concrete: A critical review and cost benefit analysis. **Structures**, v. 53, p. 1540–1556, jul. 2023.

WEI, Y.; HADIGHEH, S. A. Cost benefit and life cycle analysis of CFRP and GFRP waste treatment methods. **Construction and Building Materials**, v. 348, p. 128654, set. 2022.

WEI, Y.; HADIGHEH, S. A. Development of an innovative hybrid thermo-chemical recycling method for CFRP waste recovery. **Composites Part B: Engineering**, v. 260, p. 110786, jul. 2023.

WEI, Y.; HADIGHEH, S. A. Enhancing carbon fibre recovery through optimised thermal recycling: Kinetic analysis and operational parameter investigation. **Materials Today Sustainability**, v. 25, p. 100661, mar. 2024.

YILDIRIR, E.; ONWUDILI, J. A.; WILLIAMS, P. T. Recovery of carbon fibres and production of high quality fuel gas from the chemical recycling of carbon fibre reinforced plastic wastes. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 92, p. 107–114, 2014.