

Avaliação de ciclo de vida de concretos com substituição parcial de areia natural por areia oriunda de resíduos plásticos

Life cycle assessment of concretes with partial replacement of natural sand by sand derived from plastic waste

Aldo Ribeiro de Carvalho, Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.

aldorcarvalho@outlook.com

Marcela Martins Carrara, Engenheira Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora.

marcelamartinscarrara@gmail.com

Artur Borges Oliveira Souza, Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora.

artur.borges.souza@gmail.com

Thaís Mayra de Oliveira, Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora.

thais.mayra@ufjf.br

Número da sessão temática da submissão – [02]

Resumo

O estudo realiza uma Avaliação do Ciclo de Vida de concretos produzidos com substituição parcial da areia natural por areia plástica residual proveniente de resíduos eletrônicos. Foram analisadas amostras com 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substituição, utilizando o software SimaPro 10.2.0.0 e a base de dados Ecoinvent 3, conforme as normas ISO 14040 e 14044. Os resultados indicaram que teores inferiores a 15% aumentam os impactos ambientais devido ao consumo energético no processamento do resíduo, enquanto substituições acima de 20% apresentaram melhorias expressivas. O concreto com 30% de substituição obteve reduções de 16,37% em uso do solo, 3,62% em eutrofização marinha, 3,57% em ecotoxicidade terrestre e 0,62% em aquecimento global. Conclui-se que a areia plástica residual é uma alternativa ambientalmente eficiente e alinhada aos princípios da economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Areia Residual Plástica; Concreto; Sustentabilidade

Abstract

This study performs a Life Cycle Assessment of concretes produced with partial replacement of natural sand by plastic residual sand derived from electronic waste. Samples containing 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% replacement levels were analyzed using SimaPro 10.2.0.0 software and the Ecoinvent 3 database, in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards. The results showed that replacement rates below 15% increased environmental impacts due to the energy consumption involved in waste processing, while replacements above 20% led to significant improvements. The concrete with 30% replacement achieved reductions of 16.37% in land use, 3.62% in marine eutrophication, 3.57% in terrestrial ecotoxicity, and 0.62% in global warming potential. It is concluded that plastic residual sand is an environmentally efficient alternative aligned with the principles of the circular economy and the United Nations Sustainable Development Goals.

Keywords: Life Cycle Assessment; Plastic Residual Sand; Concrete; Sustainability

1. Introdução

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, superado apenas pela água (CARVALHO, JÚNIOR, *et al.*, 2023). Na sua composição, os agregados representam entre 60% e 75% do volume total, exercendo influência direta sobre as propriedades físicas e mecânicas do material (DELSAUTE e STAQUET, 2020). No contexto brasileiro, a demanda por agregados na construção civil alcançou 640 milhões de toneladas em 2022, das quais 374 milhões corresponderam à areia natural (ANEPAC, 2023). Projeções indicam que a demanda global por agregados deve aumentar em cerca de 45% até 2060, intensificando a pressão sobre os recursos naturais e agravando os impactos ambientais decorrentes da extração em leitos de rios, como erosão, assoreamento e degradação de ecossistemas aquáticos (ANEPAC, 2023).

A areia natural, recurso não renovável amplamente empregado na produção de concreto, vem se tornando cada vez mais escassa, exigindo extração em regiões mais distantes dos centros consumidores (CARVALHO, JÚNIOR, *et al.*, 2023). Isso acarreta elevação de custos logísticos e energéticos, além de ampliar os impactos ambientais. Nesse contexto, torna-se necessário buscar alternativas sustentáveis que permitam substituir parcial ou totalmente a areia natural por materiais de origem residual ou reciclada, contribuindo para a redução da extração de recursos virgens.

Diversos estudos vêm explorando o uso de materiais residuais como substitutos do agregado miúdo, tais como resíduos de mármore (CARVALHO, JÚNIOR, *et al.*, 2023), vidro (SON, KIM, *et al.*, 2025) tijolos cerâmicos, granito, basalto, borracha triturada (SER, HUSSIN, *et al.*, 2025) e pneus (MIAH, HUAPING, *et al.*, 2023). A incorporação de resíduos no ciclo produtivo está alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o uso racional de recursos, a redução de passivos ambientais e o desenvolvimento sustentável das indústrias (CARVALHO, CALDERÓN-MORALES, *et al.*, 2023; CARVALHO, CARRARA, *et al.*, 2026).

Entre as cadeias produtivas com elevado potencial de reaproveitamento, destaca-se a indústria de equipamentos eletrônicos, que gera grandes volumes de resíduos. Após o fim da vida útil desses equipamentos, embora os componentes metálicos sejam amplamente recuperados, os plásticos residuais frequentemente têm destinação inadequada, como

aterros sanitários ou descartes irregulares. O relatório *The Global E-waste Monitor 2024*, da Organização das Nações Unidas (ONU), aponta que a geração de resíduos eletrônicos cresce cinco vezes mais rápido do que a reciclagem formalmente documentada. Em 2022, apenas 22,3% do lixo eletrônico global foi devidamente coletado e reciclado (GLOBAL E-WASTE MONITOR, 2025).

Pesquisas recentes demonstram que a substituição parcial de agregados naturais por resíduos plásticos pode melhorar o isolamento térmico, reduzir a densidade do concreto e favorecer o reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos (HAMADA, AL-ATTAR, *et al.*, 2024), ainda que, em teores mais elevados, possa ocorrer redução na resistência mecânica. Mesmo assim, essa aplicação mostra-se tecnicamente viável para elementos não estruturais, como blocos, pavimentos intertravados e vedações (PLESIUTSCHING, ALBU, *et al.*, 2021). Assim, a utilização de resíduos plásticos no concreto representa uma solução inovadora e ambientalmente responsável, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) (ONU, 2025).

Entretanto, a simples reinserção de um material residual na cadeia produtiva não garante, por si só, maior sustentabilidade. É essencial considerar os impactos energéticos e ambientais dos processos de coleta, tratamento e reprocessamento desses resíduos, bem como os subprodutos gerados durante essas etapas. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta fundamental para quantificar, de forma sistemática e abrangente, os impactos ambientais associados a todas as fases do ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até o descarte, reuso ou reciclagem, conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo realizar uma ACV de concretos produzidos com substituição parcial da areia natural por resíduos plásticos provenientes de equipamentos eletrônicos. Foram avaliadas diferentes proporções de substituição, de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, por meio do software SimaPro 10.2.0.0, de modo a determinar os impactos ambientais associados e contribuir para o desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis e alinhados aos princípios da economia circular.

2. Metodologia

A ACV foi conduzida para o concreto de referência (REF) e para as misturas com 5% (AP 5%), 10% (AP 10%), 15% (AP 15%), 20% (AP 20%), 25% (AP 25%) e 30% (AP 35%) de substituição da areia natural de rio por resíduo plástico. Nesse sentido, o traço básico adotado para esse concreto foi o mesmo do estudo de Carvalho *et al.* (2025), na proporção de cimento: areia natural: areia plástica residual : brita 0 : água de 1 : 2,577 : 0 : 3,047 : 0,52. Foi utilizado o software SimaPro 10.2.0.0, com a base de dados Ecoinvent 3. Os limites do sistema seguiram a abordagem do berço ao portão, conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044, adotando como unidade funcional 1 m³ de concreto produzido. A avaliação de impacto foi realizada pelo método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Os insumos de entrada foram selecionados optando, prioritariamente, por conjuntos de dados representativos do contexto brasileiro; na ausência destes, utilizaram-se valores médios globais, conforme também adotado por Carvalho et al. (2026). Foram considerados os seguintes processos do Ecoinvent:

- Cimento, CP V RS {BR} | mercado de cimento, CP V RS | Cut-off, U
- Químico orgânico {GLO} | mercado de produtos químicos, orgânicos | Cut-off, U
- Fábrica de mistura de concreto {GLO} | Mercado de fábrica de mistura de concreto | Cut-off, U
- Brita 0, triturado {BR} | mercado de cascalho, triturado | Cut-off, U
- Óleo lubrificante {RoW} | Mercado de óleo lubrificante | Cut-off, U
- Areia natural {BR} | Mercado de areia | Cut-off, U
- Aço, de baixa liga, laminado a quente {GLO} | Mercado de aço, de baixa liga, laminado a quente | Cut-off, U
- Borracha sintética {GLO} | Mercado de borracha sintética | Cut-off, U
- Água da torneira {BR} | Mercado de água da torneira | Cut-off, U
- Diesel, queimado em máquina de construção {GLO} | Mercado de diesel, queimado em máquina de construção | Cut-off, U
- Eletricidade, média tensão {BR} | Grupo de mercado de eletricidade, média tensão | Cut-off, U
- Sucata de aço {RoW} | Mercado de sucata de aço | Cut-off, U
- Resíduos de concreto {RoW} | Mercado de resíduos de concreto | Cut-off, U
- Resíduos de óleo mineral {RoW} | Mercado de óleos minerais usados | Cut-off, U
- Resíduos de borracha, não especificados {RoW} | mercado de resíduos de borracha, não especificados | Cut-off, U
- Águas residuais da produção de concreto {RoW} | Mercado de águas residuais da produção de concreto | Cut-off, U

3. Resultados

A ACV comparativa dos concretos avaliados é apresentada na Figura 1, evidenciando que a substituição parcial da areia por resíduo plástico não é benéfica em todas as categorias de análise do ACV, tão pouco em todas as proporções estudadas.

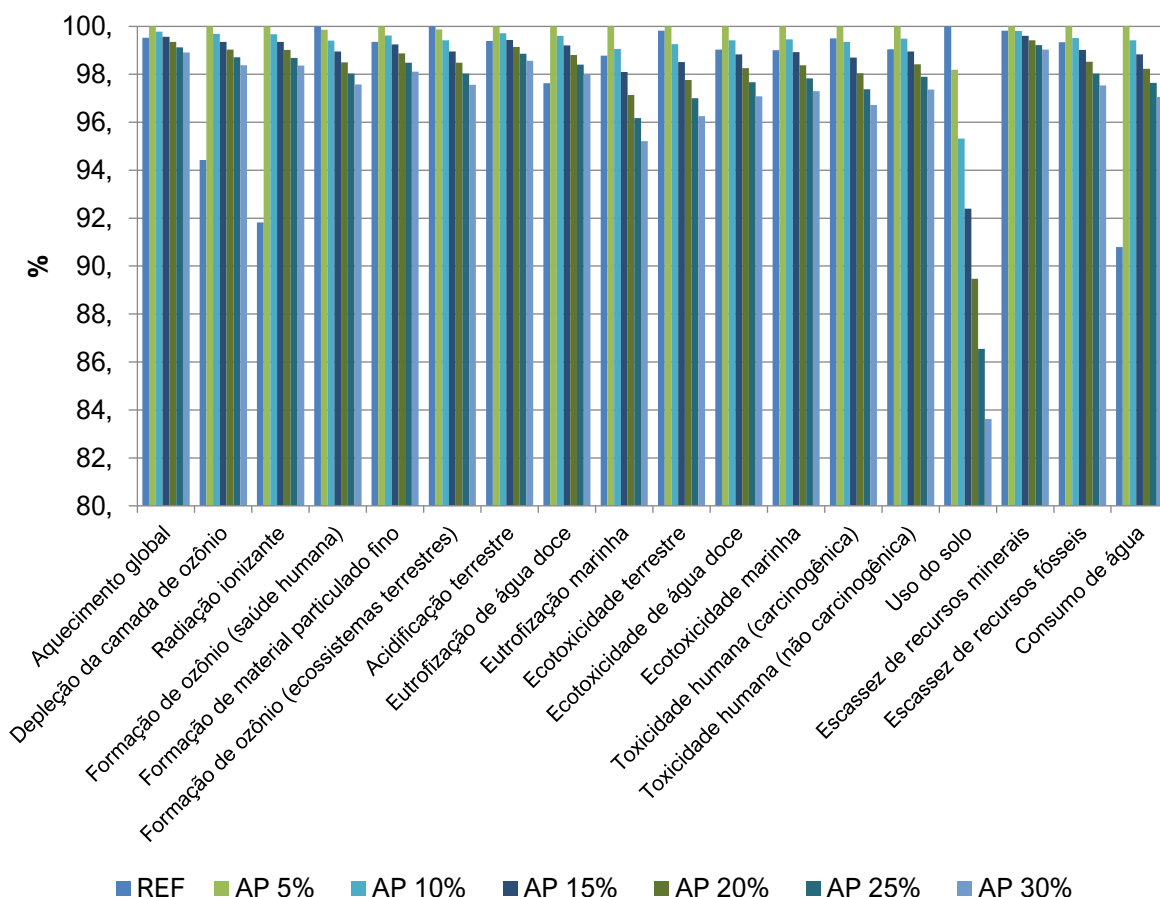


Figura 1: ACV comparativa entre os concretos. Fonte: Autores (2025).

4. Análises dos Resultados e Discussões

Os resultados da ACV revelam que a substituição parcial da areia natural por areia plástica residual influencia significativamente o desempenho ambiental dos concretos avaliados. Foram consideradas 18 categorias de impacto, modeladas no método ReCiPe 2016, e observou-se um comportamento não linear entre o aumento da fração de resíduo e a redução dos impactos ambientais. Enquanto teores baixos de substituição (5% e 10%) apresentaram desempenho inferior ao concreto de referência, os teores acima de 15% passam a demonstrar vantagens ambientais crescentes, consolidando-se a partir de 20% como uma alternativa ambientalmente favorável.

Nas misturas AP 5% e AP 10%, os impactos foram mais elevados que os do REF nas categorias relacionadas ao consumo energético. Em Aquecimento Global, a amostra AP 5% apresentou impacto 0,48% superior e a AP 10% 0,26% superior ao REF. Na categoria Radiação Ionizante, o aumento foi ainda mais expressivo, com a AP 5% registrando impacto 8,9% maior e a AP 10% 8,6% maior em relação ao REF. A Depleção da Camada de Ozônio também seguiu esse padrão, com elevações de 5,9% e 5,6%, respectivamente. Esse comportamento está diretamente relacionado ao processo de beneficiamento do resíduo plástico, que envolve

etapas de moagem, granulação e lavagem. Essas operações demandam energia elétrica adicional e, em alguns casos, água de processo, elevando o consumo energético por unidade de material produzido. Assim, em baixos teores de incorporação, o volume de resíduo reciclado é insuficiente para compensar os impactos associados ao seu próprio processamento. Esse resultado reforça a importância de considerar o balanço energético global do sistema, de modo que a substituição só se torne ambientalmente vantajosa quando a redução de impactos pela menor extração de areia natural supera os custos ambientais do processamento do resíduo.

A partir de 15% de substituição, observa-se uma inversão desse comportamento. As misturas AP 15%, AP 20%, AP 25% e, especialmente, AP 30% apresentam reduções progressivas em praticamente todas as categorias de impacto. O concreto AP 30% destacou-se com os melhores resultados em 14 das 18 categorias avaliadas. A maior eficiência ambiental ocorre nas categorias Uso do Solo (redução de 16,37%), Eutrofização Marinha (-3,62%), Ecotoxicidade Terrestre (-3,57%) e Formação de Ozônio tanto para Saúde Humana (-2,42%) quanto para Ecossistemas Terrestres (-2,43%). Esses ganhos refletem diretamente a diminuição das atividades de mineração, transporte e beneficiamento da areia natural, que são processos altamente intensivos em energia e responsáveis por impactos significativos em ecossistemas fluviais e terrestres.

Na categoria Aquecimento Global, a substituição de 30% resultou em uma redução de 0,62% em relação ao concreto de referência, demonstrando que, em níveis mais altos de incorporação, o resíduo plástico começa a compensar energeticamente o investimento de energia de sua reciclagem. Categorias como Formação de Material Particulado Fino (-1,26%) e Acidificação Terrestre (-0,83%) também evidenciam a vantagem ambiental do uso de agregados reciclados em maior proporção, uma vez que há menos emissões associadas ao transporte e à movimentação de materiais naturais.

Apesar dos ganhos observados, quatro categorias permaneceram desfavoráveis em todas as proporções de substituição, com o concreto REF apresentando desempenho superior. No Consumo de Água, o REF teve impacto 10,1% menor que a média das amostras com substituição, devido ao uso adicional de água nas etapas de lavagem do resíduo. Em Depleção da Camada de Ozônio, o REF foi 5,9% melhor que o pior desempenho (AP 5%) e 3,9% melhor que o AP 30%. Para Radiação Ionizante, a diferença chegou a 8,9% entre o REF e o AP 5%, e ainda 8,4% entre o REF e o AP 30%. Por fim, na Eutrofização de Água Doce, o REF manteve o menor impacto, 2,4% inferior ao observado nas amostras com substituição. Esses resultados indicam que, embora o resíduo plástico apresente elevado potencial ambiental, a sustentabilidade do processo depende da otimização operacional da cadeia de reciclagem, especialmente no controle de consumo de recursos e na adoção de fontes renováveis de energia.

De forma geral, a partir de 15% de substituição, a utilização da areia plástica residual começa a gerar benefícios líquidos em várias categorias, e acima de 20%, a tendência de melhoria se consolida de maneira abrangente. O concreto com 30% de resíduo demonstrou o melhor desempenho ambiental global, configurando-se como o ponto de equilíbrio entre o aproveitamento do resíduo e a mitigação dos impactos ambientais do ciclo produtivo. Esses resultados reforçam que a adoção de agregados reciclados deve ser planejada com base em

avaliações de ciclo de vida completas, capazes de identificar a proporção ótima de substituição sob a ótica da sustentabilidade.

A análise global demonstra que o uso de areia plástica residual contribui de maneira efetiva para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e o ODS 15 (Vida Terrestre). Recomenda-se que políticas públicas de incentivo à reciclagem de resíduos eletrônicos sejam acompanhadas de exigências de eficiência energética e hídrica, de modo a garantir que os benefícios ambientais da reutilização de plásticos superem os custos ambientais de sua transformação. Além disso, a criação de certificações ambientais e de parâmetros técnicos normativos para concretos com agregados reciclados pode ampliar a viabilidade de sua aplicação prática, favorecendo uma transição efetiva para modelos construtivos mais circulares e sustentáveis.

5. Considerações Finais

Este estudo inova ao realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de concretos desenvolvidos com substituição da areia de rio pelo agregado residual de plásticos de eletrônicos. Os resultados alcançados revelam que o uso de resíduos plásticos pode contribuir de forma relevante para a sustentabilidade da construção civil, desde que realizada em proporções adequadas. A ACV evidenciou que teores baixos de incorporação, como 5% e 10%, não geram benefícios ambientais, pois os impactos associados ao consumo de energia e de água durante o processamento do resíduo superam as reduções obtidas pela menor extração de areia natural. A partir de 15% de substituição, observa-se uma tendência de melhoria, que se consolida de maneira mais significativa acima de 20%, quando os ganhos ambientais tornam-se consistentes e superiores aos do concreto de referência.

O concreto com 30% de substituição (AP 30%) apresentou o melhor desempenho global, com reduções em 14 das 18 categorias de impacto avaliadas. Os resultados mais expressivos foram observados nas categorias Uso do Solo, com redução de 16,37%, Eutrofização Marinha, com 3,62%, Ecotoxicidade Terrestre, com 3,57%, Formação de Ozônio para Saúde Humana, com 2,42%, e Formação de Ozônio para Ecossistemas Terrestres, com 2,43%. Essas melhorias refletem a redução das atividades de extração e transporte de areia natural, processos que demandam grande consumo energético e geram impactos significativos em ecossistemas terrestres e aquáticos. Em contrapartida, quatro categorias permaneceram desfavoráveis em todas as proporções de substituição, sendo o concreto de referência até 10,1% superior no Consumo de Água, 5,9% na Depleção da Camada de Ozônio, 8,9% na Radiação Ionizante e 2,4% na Eutrofização de Água Doce. Esses resultados reforçam que, embora a reciclagem de resíduos plásticos seja ambientalmente promissora, sua eficiência depende da otimização das etapas de lavagem, trituração e granulação, bem como da utilização de fontes renováveis de energia.

A substituição da areia natural por plástico residual a partir de 15% mostrou-se uma estratégia ambientalmente eficiente para reduzir os impactos associados à produção de concreto. Essa solução está em consonância com os princípios da economia circular e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente os ODS 12, 13 e 15, que

tratam do consumo e produção responsáveis, da ação contra as mudanças climáticas e da preservação da vida terrestre.

A aplicação prática dessa tecnologia deve ser acompanhada por políticas públicas que incentivem o reaproveitamento de plásticos residuais de eletrônicos, bem como por diretrizes normativas que assegurem eficiência energética e hídrica na cadeia produtiva. A padronização técnica e a criação de certificações ambientais específicas para concretos com agregados reciclados podem ampliar a aceitação do material e impulsionar sua adoção em escala industrial.

Investigações como a conduzida neste estudo evidenciam que o uso de materiais residuais em materiais de construção representa um dos caminhos mais promissores para o futuro da construção civil. Essa perspectiva fortalece a transição para uma indústria mais eficiente, resiliente e comprometida com a preservação ambiental.

Referências

- ANEPAC. **Mercado**. Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. São Paulo. 2023.
- CARVALHO, Aldo R. D. et al. Influência do efeito filer do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Oct-Dec 2023.
- CARVALHO, Aldo R. D. et al. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, 3 November 2023. 133078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133078>.
- CARVALHO, Aldo R. D. et al. Evaluation of Mechanical Properties and Determination of the Optimal Concentration of a New Carbonyl-rich Graphene Oxide in Cementitious Composites. **Case Studies in Construction Materials**, December 2025. e05184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05184>.
- CARVALHO, Aldo R. D. et al. Effects of red ceramic waste on the thermomechanical properties of concrete and its life cycle assessment. **Materials and Structures**, 2026. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02880-x>.
- DELSAUTE, Brice; STAQUET, Stéphanie. Impact of recycled sand and gravels in concrete on volume change. **Construction and Building Materials**, 30 January 2020. 117279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117279>.
- GLOBAL E-WASTE MONITOR. **About Us**. Global Waste. [S.l.]. 2025.
- HAMADA, Hussein M. et al. Enhancing sustainability in concrete construction: A comprehensive review of plastic waste as an aggregate material. **Sustainable Materials and Technologies**, July 2024. e00877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00877>.
- ISO. **14040:2006 - Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. Geneva, Switzerland. 2006a.
- ISO. **14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines**. Geneva, Switzerland. 2006b.
- MIAH, Md J. et al. Performance of eco-friendly concrete made from recycled waste tire fine aggregate as a replacement for river sand. **Structures**, December 2023. 105463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105463>.
- ONU. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. **Nações Unidas Brasil**, 2025. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 23 Outubro 2025.

PLESIUTSCHING, Ernst et al. An In Situ Synchrotron Dilatometry and Atomistic Study of Martensite and Carbide Formation during Partitioning and Tempering. **Materials**, 2021. 3849. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14143849>.

SER, Mostafa et al. Enhancing the sustainable production of Foamed Concrete by using different waste materials as a full sand replacement. **Construction and Building Materials**, 7 February 2025. 139890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139890>.

SON, Minjae et al. Effect of pretreated waste glass sand on comprehensive performance of concrete based on mechanical properties, durability, and microstructure. **Construction and Building Materials**, 15 August 2025. 141963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141963>.