

Engenharia de materiais pela sustentabilidade: Soluções inovadoras para o meio ambiente na construção civil



**Everton Rangel Bispo
Igor Charles Siqueira Leite
Rachel Cristina Santos Pires
Organizadores**

 **epitaya**
Editora

EVERTON RANGEL BISPO
IGOR CHARLLES SIQUEIRA LEITE
RACHEL CRISTINA SANTOS PIRES
Organizador

**ENGENHARIA DE MATERIAIS PELA SUSTENTABILIDADE:
SOLUÇÕES INOVADORAS PARA O MEIO AMBIENTE NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

1^a Edição



Rio de Janeiro – RJ
2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

E57 Engenharia de materiais pela sustentabilidade [livro eletrônico] :
soluções inovadoras para o meio ambiente na construção
civil / organizador Everton Rangel Bispo [et al.]. – 1. ed. –
Rio de Janeiro, RJ: Epitaya, 2025.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
ISBN 978-65-5132-023-1

1. Materiais. 2. Sustentabilidade. 3. Construção civil. I.
Bispo, Everton Rangel. II. Leite, Igor Charles Siqueira. III. Pires,
Rachel Cristina Santos

CDD 620

Elaborado por Maurício Amormino Júnior - CRB6/2422

Epitaya Propriedade Intelectual Editora Ltda
Rio de Janeiro / RJ
 contato@epitaya.com.br
http://www.epitaya.com.br



CONSELHO EDITORIAL

EDITOR RESPONSÁVEL	Bruno Matos de Farias
ASSESSORIA EDITORIAL	Helena Portes Sava de Farias
ASSISTENTE EDITORIAL	Equipe Editorial
MARKETING / DESIGN	Equipe MKT
DIAGRAMAÇÃO/ CAPA	
REVISÃO	Everton Rangel Bispo

COMITÊ CIENTÍFICO

PESQUISADORES	Profa. Drª Kátia Eliane Santos Avelar
	Profa. Drª Fabiana Ferreira Koopmans
	Profa. Drª Maria Lelita Xavier
	Profa. Drª Eluana Borges Leitão de Figueiredo
	Profa. Drª Pauline Balabuch
	Prof. Dr. Daniel da Silva Granadeiro
	Prof. Dr. Rômulo Terminelis da Silva
	Prof. Dr. Everton Rangel Bispo

APRESENTAÇÃO

O livro ***Engenharia de Materiais pela Sustentabilidade: Soluções Inovadoras para o Meio Ambiente na Construção Civil*** reúne estudos técnicos e científicos que refletem os desafios contemporâneos da engenharia frente à necessidade de desenvolvimento sustentável. A obra apresenta contribuições de pesquisadores e profissionais comprometidos com a inovação, a eficiência dos sistemas construtivos e a redução dos impactos ambientais.

Os capítulos abordam temas estratégicos como o desempenho estrutural de materiais avançados, o reaproveitamento de resíduos da construção civil, a segurança viária, o saneamento ambiental e a gestão eficiente de recursos. Destacam-se ainda análises sobre biodigestores anaeróbicos e materiais alternativos, como o concreto geopolimérico, que apontam caminhos viáveis para práticas construtivas mais responsáveis e alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

Com rigor metodológico e diversidade temática, esta coletânea consolida-se como uma leitura relevante para estudantes, pesquisadores, engenheiros e gestores públicos, contribuindo para o avanço do conhecimento e para a construção de soluções técnicas inovadoras voltadas à preservação ambiental.

Desejamos a todos uma excelente leitura.

**Prof Dr Bruno Matos de Farias
Editor-Chefe Editora Epitaya**

SUMÁRIO

Capítulo 1.....	07
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DO REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NO BRASIL	
<i>Peron Alonso Leite da Silva; Rachel Cristina Santos Pires; Everton Rangel Bispo; Igor Charlles Siqueira Leite.</i>	
Capítulo 2.....	17
ANÁLISE DO USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS E ARGAMASSAS	
<i>Breno Gabriel Braga Januario ; Elcio Ricardo de Campos da Silva; Rachel Cristina Santos Pires; Everton Rangel Bispo; Igor Charlles Siqueira Leite.</i>	
Capítulo 3.....	27
ANÁLISE DOS FATORES CONTRIBUINTES PARA TOMBAMENTOS DE CARRETAS NO RETORNO DA BR-040 COM RODOVIA RIO-MAGÉ: DESAFIOS E SOLUÇÕES	
<i>Eduardo Damasceno de Oliveira; Emerson Clay Costa Guimarães de Oliveira ; Jucelene Ramos da Silva; Rachel Cristina Santos Pires; Everton Rangel Bispo; Igor Charlles Siqueira Leite.</i>	
Capítulo 4.....	39
USO DO BIODIGESTOR ANAERÓBICO PRODUZIDO EM PEAD (POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE) PARA TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO UNIFAMILIAR	
<i>Tainá dos Santos; Rafael Guanabara; Matheus Hermida; Rachel Cristina Santos Pires; Everton Rangel Bispo; Igor Charlles Siqueira Leite.</i>	
Capítulo 5.....	51
RECURSO PARA TRATAMENTO DO ESGOTO SANITÁRIO RURAL COM O USO DO BIODIGESTOR ANAERÓBIO MODELO EMBRAPA – REVISÃO	
<i>Daniel Viegas Gomes; Ana Fernanda Pereira Amorim; João Neri; Rachel Cristina Santos Pires; Everton Rangel Bispo; Igor Charlles Siqueira Leite.</i>	
Capítulo 6.....	61
GESTÃO DE SUPRIMENTOS COM APLICAÇÃO DE CUSTO IDEAL	
<i>Bruno Medeiros Souza da Silva; Jessica Vieira Silva Manhães; Rachel Cristina Santos Pires; Everton Rangel Bispo; Igor Charlles Siqueira Leite.</i>	

Capítulo 7.....75

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO MECÂNICO E CICLO DE VIDA ENTRE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO DE CINZA VOLANTE E CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Vitor Fonseca Costa; Rafael Dors Sakata; Douglas Queiroz Francisco; Alisson Passos Lopes; Danieli Martins do Carmo; Antonieta Middea; Everton Rangel Bispo; Renata Nunes Oliveira; Antonio Renato Bigansolli.

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DO REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NO BRASIL

Peron Alonso Leite da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
peronalonso@souunisuam.edu.br

Rachel Cristina Santos Pires

Mestre em Desenvolvimento Local, Engenheira Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
rachelpireseng@gmail.com

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

Igor Charles Siqueira Leite

Doutor em Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
Igor.leite@unisuam.edu.br

RESUMO

O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar o desempenho estrutural de elementos de concreto armado reforçados com sistemas de fibras de carbono, analisando comparativamente a eficiência das técnicas de colagem externa e inserção no cobrimento sob solicitações de flexão e cisalhamento. Foi empreendida uma revisão bibliográfica narrativa, de natureza qualitativa e caráter descritivo, assentada em material já publicado, como livros, artigos científicos, teses, dissertações e legislação pertinente. A presente pesquisa permitiu avaliar o desempenho estrutural de elementos de concreto armado reforçados com sistemas de fibra de carbono, confirmando que esta tecnologia representa um avanço frente às técnicas tradicionais de reabilitação. O uso de PRFC atende eficazmente à demanda por soluções que aliam leveza, resistência à corrosão e rapidez executiva, superando as limitações logísticas e de sobrecarga impostas pelo uso de chapas metálicas ou encamisamento de concreto. Por fim, infere-se que o sucesso da intervenção depende tanto da precisão do cálculo estrutural quanto da qualidade da execução.

Palavras-chave: Concreto Armado. Fibra de Carbono. Análise de desempenho. Engenharia Civil.

INTRODUÇÃO

O concreto armado consolidou-se, ao longo do século XX, como o material construtivo predominante na engenharia civil, permitindo a execução de estruturas de geometria complexa e elevada capacidade de carga (Benjamin; Lamêgo, 2021). Contudo, a despeito de sua versatilidade e durabilidade teórica, as estruturas de concreto também estão sujeitas à ação deletéria do tempo e do meio ambiente. Fatores como a corrosão das armaduras, falhas de projeto ou execução, alterações de uso que implicam em incrementos de sobrecarga não previstos originalmente, e a própria degradação natural dos materiais constituintes, impõem a necessidade premente de intervenções de recuperação e reforço estrutural (Araújo; Silva Júnior, 2018).

Historicamente, as técnicas de reforço, tais como a adição de chapas de aço coladas externamente ou o encamisamento de concreto, foram amplamente utilizadas (Barboza, 2023). No entanto, tais métodos apresentam limitações diversas, tais como o aumento do peso próprio da estrutura, alterações nas dimensões arquitetônicas, suscetibilidade à corrosão e dificuldades executivas em locais de difícil acesso (Benjamin; Lamêgo, 2021).

Surgem, diante disso, os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), especificamente os Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC), como uma alternativa tecnológica superior para a reabilitação de estruturas. A utilização destes compósitos na construção civil, iniciada na década de 1980 e impulsionada por demandas sísmicas no Japão, fundamenta-se nas excepcionais propriedades mecânicas das fibras de carbono, que apresentam elevada resistência à tração, alto módulo de elasticidade e imunidade à corrosão eletroquímica (Bronze, 2016; Oliveira, 2020).

Justifica-se a escolha do tema pela crescente demanda no cenário da engenharia brasileira por soluções de reforço que aliem rapidez executiva, durabilidade e mínima interferência na arquitetura existente. Os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono destacam-se por sua elevada relação resistência/peso e pela sua excelente resistência à fadiga e a ataques químicos (Ballesteros, 2023).

Embora o uso de PRFC seja crescente, o dimensionamento e a execução desses sistemas no país baseiam-se majoritariamente em diretrizes internacionais, notadamente a norma americana *ACI 440.2R - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, devido à ausência de uma norma brasileira específica que regulamente integralmente o reforço com compósitos de fibra de carbono.

Diante disso, o objetivo geral da presente pesquisa é avaliar o desempenho estrutural de elementos de concreto armado reforçados com sistemas de fibras de carbono, analisando comparativamente a eficiência das técnicas de colagem externa e inserção no cobrimento sob solicitações de

flexão e cisalhamento. O estudo visa quantificar os incrementos de capacidade de carga e analisar os modos de ruptura preponderantes.

DESENVOLVIMENTO

O concreto armado é, indiscutivelmente, o material de construção mais utilizado na infraestrutura moderna. Ele não é apenas a soma de dois materiais, mas sim o resultado de uma simbiose física e mecânica entre o concreto, uma mistura de cimento, água, agregados miúdos e graúdos, e eventuais aditivos, e o aço (Schneider et al., 2016).

A premissa básica deste compósito é a compensação de fraquezas. O concreto simples possui uma excelente resistência aos esforços de compressão, mas uma resistência quase desprezível, cerca de 10% da compressão, aos esforços de tração (Barbosa, 2023).

O aço, por sua vez, possui alta ductilidade e resistência à tração. Ao posicionar o aço nas regiões onde a estrutura tende a ser tracionada, cria-se um sistema capaz de vencer grandes vãos e suportar cargas elevadas. Para que essa união funcione efetivamente como uma estrutura única, e não como dois materiais isolados, a engenharia depende de fenômenos fundamentais de aderência e compatibilidade (Schneider et al., 2016).

A aderência mecânica é garantida pelas nervuras das barras de aço (comumente das categorias CA-50 ou CA-60), que travam o metal dentro da massa de concreto endurecido, permitindo a transferência de tensões entre as fases. Simultaneamente, a compatibilidade térmica desempenha um papel crucial e muitas vezes subestimado; o fato de o aço e o concreto possuírem coeficientes de dilatação térmica extremamente próximos evita que variações de temperatura gerem tensões internas destrutivas que poderiam levar ao descolamento das armaduras ou à desagregação do concreto (Araújo; Silva Júnior, 2018).

No entanto, mesmo com essa compatibilidade, o concreto armado não é um material eterno ou imutável. Ele é suscetível a deformações lentas ao longo do tempo, conhecidas como fluência, e a processos de degradação que exigem uma compreensão profunda da patologia das construções para garantir a segurança e a vida útil das edificações (Barboza, 2023).

As patologias no concreto armado surgem de diversas fontes, variando desde falhas na fase de projeto e execução até a agressividade do ambiente onde a obra está inserida. A corrosão das armaduras é, sem dúvida, a manifestação patológica mais frequente e deletéria. Ela ocorre quando a camada de concreto que protege o aço perde sua capacidade de passivação devido à carbonatação ou pela penetração de íons cloreto. Quando o aço oxida, o produto da corrosão ocupa um volume maior que o metal original, gerando tensões internas expansivas que fissuram e destacam o concreto, expondo ainda mais a armadura e acelerando o colapso. Além disso, mudanças no uso da edificação, como o aumento de sobrecargas em lajes ou a instalação de novos equipamentos industriais, podem levar as estruturas a operarem além de seus limites de serviço, exigindo intervenções de reforço

estrutural para restabelecer ou elevar a capacidade de carga original (Benjamim; Lamêgo, 2021).

Historicamente, o reforço de estruturas de concreto armado recorria a técnicas tradicionais, como o encamisamento de pilares e vigas com novas camadas de concreto e aço, ou a colagem de chapas metálicas com resinas epóxi. Embora eficazes, essas soluções apresentam inconvenientes significativos: o encamisamento aumenta as dimensões das peças e o peso próprio da estrutura, o que pode sobrecarregar as fundações, enquanto as chapas metálicas estão sujeitas à mesma corrosão que afeta a armadura interna, além de serem pesadas e de difícil manuseio em locais de acesso restrito (Ballesteros, 2023).

A fibra de carbono revolucionou o conceito de reforço estrutural ao oferecer um material com resistência à tração vastamente superior à do aço, podendo ultrapassar 3.500 MPa em comparação aos 500 MPa do aço convencional, com uma densidade muito menor. Essa alta relação resistência/peso permite que o reforço seja aplicado sem adicionar carga permanente significativa à estrutura existente e sem alterar a geometria dos ambientes, uma vantagem arquitetônica crucial em edificações com limitações de espaço (Bronze, 2016).

A aplicação desses compósitos geralmente ocorre através de mantas ou lâminas coladas externamente às superfícies de concreto, atuando como uma armadura externa que absorve os esforços de tração nas vigas ou promove o confinamento em pilares, aumentando sua capacidade de carga axial por meio do travamento lateral da expansão do concreto sob compressão (Oliveira, 2020).

O comportamento mecânico de uma estrutura reforçada com fibra de carbono difere do concreto armado convencional. Enquanto o aço é um material dúctil que escoa antes de romper, avisando visualmente sobre o colapso iminente através de grandes deformações, a fibra de carbono possui um comportamento elástico-linear até a ruptura. Isso significa que ela não escoa; ela resiste cargas imensas e rompe de forma frágil e súbita. Por essa razão, o dimensionamento de reforços com PRFC exige critérios de segurança rigorosos e uma análise cuidadosa dos domínios de deformação, garantindo que, em caso de falha, a estrutura ainda mantenha uma margem de segurança baseada na armadura de aço interna existente (Ballesteros, 2023).

Materiais e métodos

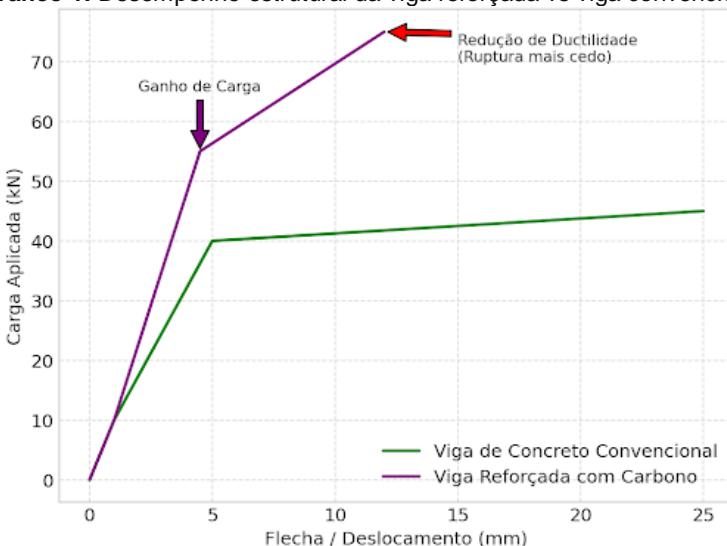
Foi empreendida uma revisão bibliográfica narrativa, de natureza qualitativa e caráter descritivo, assentada em material já publicado, como livros, artigos científicos, teses, dissertações e legislação pertinente, conforme o conceito clássico de pesquisa bibliográfica formulado por Lakatos e Marconi (2003), que a definem como o contato direto do investigador com toda produção disponível sobre o tema.

O levantamento foi conduzido nos seguintes repositórios: SciELO, Capes periódicos, Scopus e Web of Science, utilizando descritores combinados pelos operadores booleanos AND/OR, ajustados à terminologia controlada de cada base. O processo segue as etapas recomendadas por Siena et al. (2024), que passa pela escolha do tema, levantamento preliminar, formulação do problema, plano provisório, busca de fontes, leitura, fichamento, organização lógica e redação.

RESULTADOS

A avaliação do desempenho estrutural de sistemas de reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono em estruturas de concreto armado deve considerar mais que a mera verificação do aumento da capacidade de carga imediata. Calcado na literatura, comprehende-se haver a necessidade de uma abordagem que integre o comportamento mecânico sob cargas de serviço e últimas, a durabilidade frente a agentes agressivos e a confiabilidade da aderência interfacial a longo prazo (Chung et al., 2018; Monazami et al., 2022; Ballesteros, 2023):

Gráfico 1: Desempenho estrutural da viga reforçada vs viga convencional



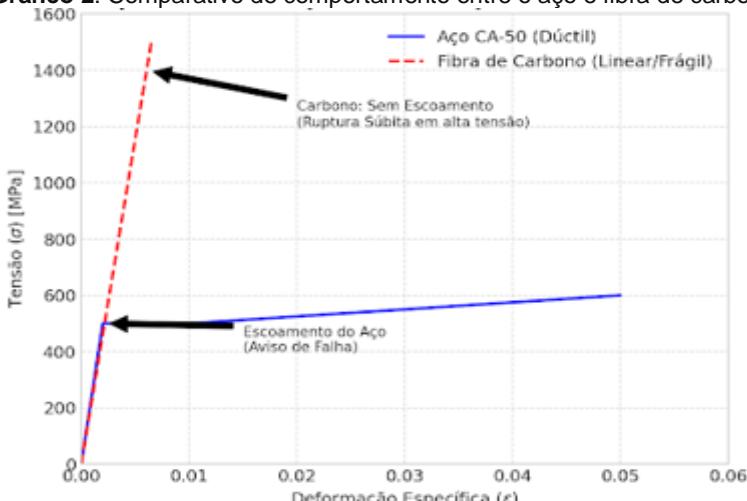
Fonte: Adaptado de Ballesteros (2023, p. 69)

O gráfico 1 apresenta o impacto real do reforço em uma viga, de modo que a curva verde, representando a viga convencional, suporta menos carga e se deforma com maior facilidade antes de falhar. Já a viga reforçada com carbono, representada pela curva roxa, deforma menos para a mesma carga e suporta uma carga final muito maior. No entanto, observe-se que a

viga reforçada possui menor ductilidade, de modo que a viga fica muito mais forte, mas quando atinge seu limite, a falha ocorre com menos deformação total do que na viga original. Por isso, a preparação da superfície é necessária para evitar que essa força arranque o reforço antes da hora (Ballesteros, 2023).

O concreto armado, embora resiliente, sofre com patologias decorrentes de erros na execução, mudanças de uso ou agressividade ambiental. Nesse cenário, o CFRP consolidou-se como uma alternativa leve e de alta resistência, bem como solução capaz de alterar a cinemática de ruína e estender a vida útil de ativos de infraestrutura crítica, desde vigas de edifícios até pavimentos rodoviários e pilares de pontes (Machado, 2006; Araújo; Silva Júnior, 2018).

Gráfico 2: Comparativo de comportamento entre o aço e fibra de carbono



Fonte: Adaptado de Machado (2006, p. 5-9)

O gráfico 2 ilustra a diferença fundamental de segurança entre o concreto armado convencional e o reforçado, de modo que a linha azul representa o Aço, que ao atingir cerca de 500 MPa, ele entra em "escoamento", deformando-se visivelmente antes de quebrar. Isso serve como um aviso visual de perigo. Já a linha vermelha tracejada representa a Fibra de Carbono. Note-se como ela atinge resistência mais alta, contudo, não há o ponto de escoamento. Diante disso, durante o cálculo de reforço, o profissional deve utilizar maiores coeficientes de segurança, visto que o carbono não sofre escoamento, portanto, deve-se trabalhar sempre longe de seu ponto de ruptura (Ballesteros, 2023).

No que tange ao desempenho mecânico imediato, a aplicação de compósitos de carbono altera significativamente o comportamento de elementos fletidos e comprimidos. Conforme estabelecido por Machado

(2006) e validado em estudos comparativos (Bronze, 2016; Ballesteros, 2023), a introdução de lâminas de carbono na zona tracionada de vigas promove um aumento direto na carga de ruptura e no controle da fissuração. No entanto, o ganho de resistência altera o modo de falha.

Enquanto o concreto armado convencional é projetado para ser dúctil, com o aço escoando antes da ruptura do concreto, o sistema reforçado com CFRP tende a um comportamento mais frágil e linear-elástico até a falha. A ruptura pode ocorrer de forma abrupta, seja pela tração excessiva da fibra ou, mais frequentemente, pelo descolamento prematuro do substrato. Portanto, o foco deve estar na força máxima suportada, bem como na capacidade do sistema de manter a aderência sob tensões cisalhantes na interface concreto-adesivo (Schneider; Schultz; Wierzbicki, 2016).

El Maaddawy *et al.* (2007) e Grace; Singh (2005) salientam que a eficácia do CFRP não é estática, mas sensível às condições de exposição. A exposição prolongada a 100% de umidade relativa pode reduzir a resistência do sistema em até 33%, não devido à degradação da fibra de carbono em si, que é inerte, mas devido à plastificação da matriz polimérica e à degradação da interface de colagem (Grace; Singh, 2005).

Em ambientes marinhos ou com presença de sais descongelantes, o desempenho do reforço está ligado à qualidade do envelopamento. O envelopamento contínuo oferece uma proteção superior contra a corrosão das armaduras internas em comparação ao envelopamento intermitente, pois cria uma barreira física que limita o ingresso de oxigênio e cloretos, retardando a perda de massa do aço interno mesmo em vigas já pré-corroídas (Srinivasan *et al.*, 2024).

No Brasil, cuja clima é predominantemente tropical, caracterizado pela elevação da umidade relativa e altas temperaturas médias, a extensa malha urbana costeira do país expõe vastos ativos de infraestrutura à maresia, enquadrando-os nas classes de agressividade III e IV da NBR 6118 (Brasil, 2014), demandando maior rigor na especificação das resinas epóxicas. Portanto, é fundamental que a temperatura de transição vítreia (T_g) do adesivo seja suficientemente alta para suportar o calor local sem sofrer amolecimento (Oliveira, 2020; Barboza, 2023).

Além das vigas e pilares, a aplicação de tecnologias de reforço evoluiu para elementos de infraestrutura viária, como demonstrado por Monazami *et al.* (2007). Nestes casos, a avaliação de desempenho incorpora tecnologias de monitoramento da saúde estrutural. A inserção de sensores, como *strain gauges* e termopares dentro da matriz de concreto ou na linha de cola do reforço permite monitorar, em tempo real, as deformações e a integridade do compósito sob ciclos de carga dinâmicos e variações térmicas (Benjamin; Lâmego, 2021).

Essa abordagem transforma o reforço passivo em um sistema "inteligente", em que o desempenho é avaliado de forma contínua, permitindo a detecção precoce de microfissuras ou falhas de aderência antes que atinjam um estado crítico de colapso, algo que modelos puramente teóricos

muitas vezes falham em prever com precisão (Schneider; Schultz; Wierzbicki, 2016).

Em termos de previsão, a complexidade do comportamento do concreto confinado por CFRP, especialmente em pilares circulares em que o efeito de cintamento aumenta a resistência à compressão axial, tem levado ao uso de ferramentas computacionais avançadas (Ballesteros, 2023). Modelos baseados em lógica Fuzzy (Chung *et al.*, 20018) têm se mostrado mais precisos do que as equações normativas tradicionais para prever a resistência residual e a ductilidade de pilares reforçados, por levar em conta variáveis não lineares e incertezas nos materiais, oferecendo uma avaliação de segurança mais precisa.

Por fim, o sucesso do desempenho estrutural do CFRP é dependente da execução. A preparação do substrato, a mistura correta dos componentes epóxicos e a saturação adequada das fibras são tão importantes quanto o cálculo estrutural (Schneider; Schultz; Wierzbicki, 2016).

A presença de vazios ou áreas sem impregnação na manta atua como indutores de tensão que precipitam o descolamento. A compatibilidade com o concreto base deve ser assegurada; concretos de baixa resistência superficial podem falhar por "arrancamento" da camada de cobrimento antes que a fibra atinja sua capacidade de tração. Portanto, a avaliação de desempenho de uma estrutura reforçada com fibra de carbono é uma avaliação da qualidade da interface criada entre o material existente e o novo compósito (Monazami *et al.*, 2022).

Quando bem projetado e executado, respeitando os limites de deformação e as proteções contra umidade e fogo, o sistema oferece uma recuperação da capacidade portante e uma extensão da vida útil inigualáveis pelas técnicas convencionais (Araújo; Silva Júnior, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu avaliar o desempenho estrutural de elementos de concreto armado reforçados com sistemas de fibra de carbono, confirmado que esta tecnologia representa um avanço frente às técnicas tradicionais de reabilitação. O uso de PRFC atende eficazmente à demanda por soluções que alieem leveza, resistência à corrosão e rapidez executiva, superando as limitações logísticas e de sobrecarga impostas pelo uso de chapas metálicas ou encamisamento de concreto.

No que tange ao comportamento mecânico, conclui-se que o reforço com fibras de carbono proporciona um aumento substancial na capacidade de carga última e na rigidez das peças fletidas. Contudo, essa ganho de resistência impõe uma alteração na natureza da falha estrutural, que transita de um comportamento dúctil para um comportamento linear-elástico e frágil. Essa constatação exige uma mudança de paradigma no dimensionamento, demandando a adoção de coeficientes de segurança mais rigorosos para compensar a ausência de avisos prévios de ruptura, como grandes deformações plásticas.

A análise da durabilidade demonstrou que a maior debilidade do sistema não é a fibra em si, mas a interface de aderência e a matriz polimérica. Ficou demonstrado que, no cenário brasileiro, caracterizado por ambientes de alta umidade e temperaturas elevadas, a seleção criteriosa da resina epóxi e a proteção contra radiação UV são mandatórias para evitar a plastificação da matriz e o descolamento prematuro.

O envelopamento contínuo mostrou-se a estratégia mais eficiente para blindar a estrutura contra agentes agressivos, atuando simultaneamente como reforço mecânico e barreira protetora. Por fim, infere-se que o sucesso da intervenção depende tanto da precisão do cálculo estrutural quanto da qualidade da execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Thiago Thielmann de. SILVA JÚNIOR, Wladimir Nascimento. **Reforço estrutural em fibra de carbono para estruturas de concreto armado.** In: grupo de estudos da patologia da construção – PATORREB, 2018. Disponível em: <https://www.nppg.org.br/patorreb/files/artigos/80533.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

BALLESTEROS, Augusto Marçal. **Análise de desempenho do reforço com manta de fibra de carbono em concretos de cimento Portland.** Monografia. 72f. [Especialista em Construção Civil]. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2023.

BARBOZA, Evelyn Lopes. **Análise comparativa entre técnicas de reforço com fibra de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples.** Trabalho de Conclusão de Curso. 96f. [Bacharel em Engenharia Civil]. Rio de Janeiro: Universidade Veiga de Almeida, 2023.

BENJAMIN, Edinéia Alves. LAMÊGO, Geraldo César. Reforço Estrutural com a utilização de Fibra de carbono. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.1, p.3914-3927 Jan. 2021

BRASIL. ABNT **NBR nº 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Brasília: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. Disponível em: <https://engcivil20142.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/08/nbr-6118-2014-projeto-de-estruturas-de-concreto-procedimento-versc3a3o-corrigida.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

BRONZE, Ricardo Alves. **Estudo comparativo:** uso do sistema de fibras de carbono e sistema convencional para reforço de estruturas de concreto. Trabalho de Conclusão de Curso. 93f. [Bacharel em Engenharia Civil]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

CHUNG, Lan et al. Performance Evaluation of CFRP Reinforced Concrete Members Utilizing Fuzzy Technique. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 78, 2018.

EL MAADDAWY, Tamer et al. Performance Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer-Repaired Beams Under Corrosive Environmental Conditions. **ACI Structural Journal**, v. 104, n. 1, p. 3-11, 2007.

GRACE, Nabil F. SINGH, S. B. Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design. **ACI Structural Journal**, v. 102, n. 1, 2005.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: VIAPOL, 2006. Disponível em: <https://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

MONAZAMI, M. et al. Evaluating performance of carbon fiber-reinforced pavement with embedded sensors using destructive and non-destructive testing. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2022.

OLIVEIRA, Priscila Duarte de. **Reforço de um pavimento de concreto armado usando fibras de carbono**: estudo de caso. Monografia. 79f. [Bacharel em Engenharia Civil]. Maceió/AL: Universidade Federal de Alagoas, 2020.

SCHNEIDER, Fernanda Heck. SCHULTZ, Jacqueline da Luz. WIERZBICKI, Luísa Rocha. **Análise do desempenho da ancoragem do reforço de fibras de carbono em vigas submetidas à flexão**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8059/2/CT_COECI_2016_2_13.pdf. Acesso em: 27 nov. 2025.

SIENA, Osmar et al. **Metodologia da Pesquisa Científica e Elementos para Elaboração e Apresentação de Trabalhos Acadêmicos**. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2024, 258p.

Srinivasan, Sairam Shankar et al. The structural performance of fiber-reinforced concrete beams with nanosilica. **Revista Matéria**, v. 2, n. 3, 2024.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS E ARGAMASSAS

Breno Gabriel Braga Januario

Graduação em Engenharia Civil

Centro Universitário Augusto Motta - UNISUAM.

brenojanuario@souunisuam.com.br

Elcio Ricardo de Campos da Silva

Graduação em Engenharia Civil

Centro Universitário Augusto Motta - UNISUAM.

elciosilva@souunisuam.com.br

Rachel Cristina Santos Pires

Mestre em Desenvolvimento Local, Engenheira Civil

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso

rachelpireseng@gmail.com

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso

evertonbispo@souunisuam.edu.br

Igor Charles Siqueira Leite

Doutor em Engenharia Civil

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso

igor.leite@unisuam.edu.br

RESUMO

A crescente atenção à sustentabilidade tem incentivado pesquisas voltadas à redução dos impactos ambientais da construção civil, setor historicamente relacionado ao elevado consumo de recursos e produção significativa de resíduos. Este artigo analisa, mediante revisão bibliográfica criteriosa, o uso de resíduos da construção e demolição (RCD) como alternativa técnica para a substituição parcial ou total de agregados naturais em concretos e argamassas. Foram avaliados estudos recentes que abordam propriedades físicas, mecânicas e desempenho dos materiais cimentícios produzidos com diferentes teores e métodos de beneficiamento de RCD. Os resultados apontam que o emprego de resíduos reciclados pode contribuir para significativas reduções de impactos ambientais, viabilizando o reaproveitamento econômico dos materiais e atendendo requisitos técnicos para aplicações não estruturais e estruturais de baixa exigência. No entanto, observam-se variações no comportamento mecânico e desafios vinculados à heterogeneidade dos resíduos e à padronização dos processos. Conclui-

se que o uso de RCD representa uma solução promissora para práticas construtivas sustentáveis, desde que acompanhada de adequada triagem, beneficiamento e controle de qualidade.

Palavras-chave: resíduos da construção civil; concreto reciclado; argamassa; sustentabilidade; agregados reciclados.

INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha papel fundamental no desenvolvimento urbano, mas também figura como um dos setores que mais impactam o meio ambiente devido ao elevado consumo de matérias-primas, à geração de resíduos e à emissão de poluentes. A extração contínua de agregados naturais — como areia e brita — somada ao descarte inadequado de resíduos da construção e demolição (RCD), configura um dos principais desafios ambientais contemporâneos (SCHILLER et al., 2022).

Segundo a ABRELPE, milhões de toneladas de resíduos de obras são gerados anualmente no Brasil, sobrecarregando aterros e contribuindo para degradação de áreas urbanas. Em paralelo, estudos recentes destacam a necessidade de implementar soluções sustentáveis que conciliem desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental (SILVA et al., 2022).

Nesse cenário, o reaproveitamento do RCD em materiais cimentícios surge como uma alternativa promissora, permitindo:

- redução da extração de recursos naturais,
- diminuição do volume de resíduos descartados,
- menor impacto ambiental,
- possibilidade de redução de custos,
- desenvolvimento de materiais com desempenho satisfatório.

Diversos autores apontam que o resíduo reciclado pode substituir agregados graúdos ou miúdos, apresentar desempenho adequado quando devidamente beneficiado e, até mesmo, atuar como substituinte parcial do aglomerante (ANDRADE et al., 2018). Estudos com argamassas também indicam correlação entre teor de finos, absorção, densidade e resistência (PIMENTEL et al., 2018).

Assim, compreender os fatores que influenciam essas propriedades é essencial para avaliar o potencial do uso de RCD na produção de concretos e argamassas, contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis.

JUSTIFICATIVA

A geração excessiva de resíduos pela construção civil tem provocado impactos ambientais significativos, aumentando custos de gerenciamento e reduzindo a vida útil de aterros. Em contrapartida, o setor enfrenta o desafio de suprir uma demanda crescente por agregados naturais, cuja extração

intensiva acarreta degradação ambiental.

Considerando esse contexto, torna-se necessário investigar alternativas que reduzam tais impactos e promovam práticas construtivas sustentáveis.

O aproveitamento de RCD como agregado ou material cimentício apresenta grande potencial, porém sua aplicação ainda não é amplamente difundida no Brasil devido a:

- falta de padronização operacional,
- variabilidade do material,
- desconhecimento técnico,
- resistência do mercado em adotar novos materiais.

Dessa forma, este trabalho justifica-se pela relevância ambiental, econômica e social da temática, e pela necessidade de compilar e analisar resultados de pesquisas recentes, de modo a orientar o uso responsável e eficiente desses resíduos.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Analisar, com base em revisão bibliográfica, o uso de resíduos da construção civil na produção de concretos e argamassas, considerando propriedades físicas e mecânicas, metodologias de preparo e potencial de aplicação.

Objetivos Específicos

- Identificar tipos de resíduos empregados como substituintes de agregados ou aglomerantes.
- Comparar diferentes proporções de substituição relatadas nos estudos selecionados.
- Avaliar os efeitos da incorporação de RCD nas propriedades no estado fresco e endurecido.
- Verificar vantagens, limitações e desafios relacionados ao uso de RCD.
- Relacionar os principais resultados com práticas sustentáveis na construção civil.

METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica narrativa. Optou-se por esse método devido à necessidade de reunir, comparar e analisar resultados de diferentes estudos que investigam o uso de resíduos da construção civil na produção de concretos e argamassas. A revisão bibliográfica permite identificar padrões, tendências, limitações e avanços relacionados ao tema, fornecendo uma base sólida para compreender o

potencial técnico e ambiental do uso de RCD em materiais cimentícios.

A seleção dos materiais utilizados seguiu os seguintes critérios: (i) artigos publicados em periódicos científicos ou anais com credibilidade acadêmica; (ii) estudos que abordassem diretamente a aplicação de resíduos da construção e demolição como substituição parcial ou total de agregados naturais em concretos ou argamassas; (iii) pesquisas com apresentação clara de metodologia, resultados e conclusões; e (iv) publicações entre 2016 e 2022, período que reflete produções recentes alinhadas às práticas atuais de sustentabilidade na construção civil. Foram analisados cinco artigos, escolhidos previamente e aprovados pelo professor orientador, que tratam de diferentes abordagens sobre a incorporação de RCD em materiais cimentícios. Os textos foram lidos integralmente e comparados quanto aos procedimentos de beneficiamento dos resíduos, teores de substituição adotados, propriedades analisadas no estado fresco e endurecido, e possíveis impactos ambientais e econômicos relatados pelos autores. Após a leitura e categorização dos conteúdos, realizou-se a integração dos achados, destacando pontos convergentes e divergentes entre os estudos. Essa etapa permitiu a construção da Revisão Bibliográfica e dos Resultados e Discussão de forma interpretativa, envolvendo síntese, crítica e identificação das implicações técnicas da utilização dos resíduos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A construção civil é reconhecida como um dos setores que mais consomem recursos naturais e que mais geram resíduos sólidos, representando um desafio ambiental crescente nas cidades brasileiras. Os Resíduos da Construção e Demolição (RCD), também denominados Resíduos da Construção Civil (RCC), compreendem sobras de obras, reformas e demolições, incluindo fragmentos de concreto, argamassa, cerâmica, solos, metais e outros materiais de composição variada. A geração elevada desses resíduos está associada ao ritmo acelerado da urbanização, à baixa eficiência produtiva e ao manejo inadequado de materiais no canteiro de obras, tornando fundamental a adoção de práticas que reduzam sua destinação incorreta e promovam o reaproveitamento em ciclos produtivos mais sustentáveis.

A Resolução CONAMA 307/2002 estabeleceu diretrizes para a gestão dos RCD e classificou esses resíduos conforme sua composição, incentivando o reaproveitamento daqueles enquadrados na Classe A — resíduos predominantemente minerais, como concreto, argamassa e

cerâmica. Apesar dos avanços regulatórios, ainda há dificuldades de implantação de sistemas eficientes de coleta, triagem e reciclagem, resultando em descarte irregular e ocupação indevida de áreas urbanas. Esses impactos ambientais, associados à pressão por agregados naturais, motivam pesquisas que investigam a incorporação de resíduos reciclados em concretos e argamassas como alternativa para reduzir a extração de recursos naturais, minimizar impactos ambientais e diminuir o volume de resíduos destinados a aterros (SILVA et al., 2022).

Estudos recentes demonstram que o resíduo reciclado, quando adequadamente beneficiado, pode substituir agregados naturais tanto em concretos quanto em argamassas, apresentando desempenho compatível para diversas aplicações. No caso dos concretos, a utilização de resíduos reciclados como agregado graúdo tem sido objeto de diversas análises, que apontam modificações nas propriedades físicas e mecânicas em função da heterogeneidade do material reciclado, do teor de substituição e da qualidade do beneficiamento. Andrade et al. (2018) destacam que a substituição parcial do agregado graúdo natural por agregado reciclado é tecnicamente viável, especialmente para teores de até 50%. A absorção de água tende a aumentar devido à maior porosidade dos agregados reciclados, e a massa específica tende a diminuir. Apesar disso, valores de resistência à compressão se mantêm satisfatórios em níveis moderados de substituição, sendo o desempenho influenciado pelo tipo de resíduo, pela granulometria e pelo processo de britagem utilizado. Em substituições integrais (100%), observam-se reduções mais expressivas de resistência, o que pode limitar o uso a aplicações não estruturais ou de menor exigência (ANDRADE et al., 2018).

Em argamassas, a substituição de agregados miúdos naturais por resíduos finos provenientes da britagem de RCD igualmente apresenta potencial, ainda que acompanhe padrões semelhantes de comportamento: redução da massa específica, aumento da absorção de água e redução de resistências com o aumento do teor de substituição. Os estudos de Pimentel et al. (2018) analisaram argamassas produzidas com substituição parcial de 30% e 60% do agregado natural por agregado reciclado e identificaram correlação direta entre o teor de finos do material reciclado e o comportamento da argamassa tanto no estado fresco quanto no endurecido. No estado fresco, argamassas com maior porcentagem de substituição apresentaram menor massa específica e maior capacidade de retenção de água, especialmente nas misturas mistas. Já no estado endurecido, as resistências à compressão e tração reduziram conforme aumentava o teor de

agregados reciclados, mas ainda dentro de faixas compatíveis para usos de revestimento, dependendo da classe especificada pela NBR 13281 (PIMENTEL et al., 2018).

Outro estudo relevante é o de Landim et al. (2018), que também explorou o uso de resíduos reciclados de construção e demolição na produção de argamassas. Os autores ressaltam que a adoção de RCD pode proporcionar economia ao processo construtivo e redução significativa dos impactos ambientais. O processo de preparo do agregado reciclado — incluindo triagem, limpeza,

britagem e peneiramento — tem forte influência sobre a qualidade das argamassas produzidas, uma vez que a granulometria e o teor de partículas finas são determinantes para a trabalhabilidade, absorção, densidade e resistência. Os resultados obtidos demonstram resistências satisfatórias em comparação às argamassas convencionais, indicando que, para determinadas aplicações, o uso do resíduo reciclado é plenamente viável (LANDIM et al., 2018).

Além do desempenho material, diversos autores enfatizam o papel do concreto e da argamassa reciclados no contexto da sustentabilidade. A incorporação de RCD reduz significativamente a necessidade de extração de agregados naturais, diminui o transporte de materiais e minimiza o volume de resíduos depositados em aterros ou descartados irregularmente. Isso resulta em benefícios ambientais diretos, como preservação de recursos naturais, redução de emissões de CO₂ e mitigação da poluição urbana. Também há benefícios econômicos, tanto pela economia com extração de agregados quanto pelo reaproveitamento de resíduos que, de outra forma, demandariam custos de descarte. Por fim, há benefícios sociais associados à melhoria da gestão urbana e ao estímulo à economia circular no setor da construção civil (SILVA et al., 2022).

Entretanto, é importante reconhecer algumas limitações observadas na literatura. A heterogeneidade dos resíduos reciclados é um dos principais desafios, pois variações de composição podem comprometer a qualidade final do produto. Além disso, a falta de padronização operacional, o baixo número de usinas de reciclagem ativas no Brasil e a resistência do próprio mercado em adotar materiais reciclados são fatores que dificultam a expansão dessa tecnologia. Ainda assim, observa-se tendência crescente de estudos aprofundados e melhorias nos processos de beneficiamento, que têm permitido a produção de agregados reciclados cada vez mais uniformes e tecnicamente adequados.

De forma geral, a revisão da literatura demonstra que a utilização de

resíduos da construção civil na produção de concretos e argamassas apresenta resultados promissores, desde que o material seja processado adequadamente e empregado em proporções compatíveis com as exigências de desempenho. A aplicação desses resíduos reforça o compromisso com práticas sustentáveis, promove economia de recursos e estimula uma nova abordagem para o ciclo produtivo da construção civil, alinhada aos princípios da economia circular e da redução de impactos ambientais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise dos estudos selecionados, observou-se que o uso de resíduos da construção civil como substituição parcial ou total de agregados naturais em concretos e argamassas apresenta um comportamento consistente entre as diferentes pesquisas. De modo geral, verificam-se variações significativas nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais produzidos com agregados reciclados, sendo essas influenciadas principalmente pelo teor de substituição, pela granulometria e pela natureza do resíduo incorporado.

Nos estudos voltados à utilização de resíduos como agregados graúdos em concreto, os resultados evidenciaram que substituições moderadas — especialmente na faixa de 30% a 50% — tendem a manter desempenho mecânico satisfatório, mesmo com a redução da massa específica e aumento da absorção de água. Andrade et al. (2018) destacam que concretos confeccionados com 50% de agregado reciclado apresentaram redução da resistência à compressão, mas ainda dentro de valores compatíveis com usos estruturais menos exigentes, além de trabalhabilidade levemente inferior devido à textura mais áspera do agregado reciclado. Quando o teor de substituição alcança 100%, os efeitos negativos tornam-se mais evidentes, com maior porosidade e aumento na absorção de água, o que compromete a durabilidade e limita a aplicação em elementos estruturais. Ainda assim, os autores destacam que o uso integral de resíduo pode ser adequado para aplicações não estruturais ou de baixa responsabilidade.

Em relação às argamassas, tanto Pimentel et al. (2018) quanto Landim et al. (2018) observaram que o aumento gradual do teor de resíduos na mistura influencia diretamente as propriedades no estado fresco e endurecido. O aumento da substituição do agregado natural por material reciclado resultou em menor massa específica e maior capacidade de retenção de água, o que pode beneficiar a trabalhabilidade em algumas situações, especialmente nas argamassas mistas. No entanto, essa mesma característica ocasiona aumento da absorção de água por capilaridade e redução da resistência mecânica, efeitos atribuídos à maior porosidade e irregularidade dos resíduos provenientes do processo de britagem

(PIMENTEL et al., 2018). No estudo de Landim et al. (2018), os resultados reforçam essa tendência ao demonstrar resistências satisfatórias, mas inferiores às argamassas convencionais, evidenciando que o comportamento final está fortemente ligado à qualidade do beneficiamento e à proporção de resíduos aplicada.

De forma transversal aos estudos avaliados, identificou-se que a presença de finos — característica comum nos resíduos reciclados — exerce papel relevante tanto na consistência quanto no desempenho mecânico das misturas. Percentuais elevados de finos podem aumentar a retenção de água e melhorar a plasticidade, mas também podem gerar maior incidência de fissuras e comprometer o desempenho mecânico em idades avançadas, conforme observado por Pimentel et al. (2018) em argamassas com maiores teores de substituição. Já nos concretos analisados por Andrade et al. (2018), o excesso de finos nos agregados reciclados foi associado ao aumento da absorção e à redução da massa específica, mas não inviabilizou a incorporação do resíduo em teores moderados.

Outro aspecto comum entre as pesquisas refere-se aos benefícios ambientais e econômicos associados ao uso do RCD. Silva et al. (2022) destacam que a diminuição da extração de agregados naturais e a redução do volume de resíduos destinados a aterros representam ganhos expressivos em sustentabilidade, reforçando a importância da economia circular no setor da construção civil. Além disso, o reaproveitamento de resíduos pode reduzir custos operacionais relacionados ao transporte e à destinação final, embora os custos de beneficiamento e controle de qualidade ainda possam representar obstáculos para sua ampla implementação.

De modo geral, os resultados dos artigos analisados convergem para a percepção de que o uso de resíduos da construção civil, quando devidamente processados e aplicados em proporções adequadas, apresenta desempenho satisfatório e potencial significativo para compor concretos e argamassas em substituição parcial aos agregados naturais. No entanto, a heterogeneidade e a variabilidade do resíduo constituem desafios importantes, exigindo controle rigoroso da origem, da britagem, da seleção granulométrica e das condições de mistura. Assim, a aplicação de resíduos reciclados é tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, desde que acompanhada de processos padronizados que assegurem uniformidade e qualidade ao produto final.

CONCLUSÃO

A análise crítica das pesquisas recentes indica que a incorporação de resíduos da construção civil (RCD) em concretos e argamassas não apenas potencializa avanços para o setor construtivo, mas também contribui para o enfrentamento de desafios ambientais, econômicos e sociais contemporâneos. O uso de RCD como substituto parcial de agregados naturais, especialmente em índices de 30% a 50%, apresenta desempenho

mecânico satisfatório para aplicações não estruturais e algumas estruturais de menor exigência, mantendo padrões compatíveis de resistência à compressão e trabalhabilidade. Em argamassas, as alterações nas propriedades físicas e mecânicas, como absorção e massa específica, ressaltam a necessidade de controle rigoroso de granulometria e beneficiamento dos resíduos, promovendo viabilidade técnica e segurança de aplicação.

Os benefícios ambientais da adoção dessa estratégia são inequívocos: redução significativa do consumo de matérias-primas, minimização do descarte de resíduos em aterros e mitigação dos impactos associados à extração de recursos naturais. Os ganhos econômicos, relacionados à redução de custos com extração, transporte e descarte, fortalecem a sustentabilidade da cadeia produtiva e promovem maior aderência ao conceito de economia circular, como recomendado por organismos nacionais e internacionais. Além disso, o desenvolvimento de tecnologias de beneficiamento, padronização operacional e controle de qualidade emerge como eixo central para a expansão do uso industrial dos resíduos reciclados e para a confiabilidade do setor.

Contudo, persistem desafios técnicos relevantes, notadamente a heterogeneidade dos resíduos, a escassez de processos industriais padronizados e a exigência de pesquisa aplicada para o refinamento dos critérios técnico-normativos em escala nacional. Recomenda-se, portanto, o fortalecimento de políticas públicas, investimentos em infraestrutura de reciclagem, incentivo à pesquisa interdisciplinar e formação especializada para profissionais do setor, visando superar barreiras operacionais e promover a adoção efetiva dos resíduos reciclados em projetos de engenharia civil.

Conclui-se que a integração dos resíduos da construção civil na produção de concretos e argamassas representa um avanço significativo para o desenvolvimento sustentável, consolidando o papel estratégico do setor como agente transformador no paradigma da construção circular e na redução do impacto ambiental no contexto urbano brasileiro. Estudos futuros deverão aprofundar as interfaces entre beneficiamento, desempenho e ciclo de vida dos materiais reciclados, ampliando a confiabilidade científica e o alcance prático dessas soluções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Viviane Dias; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez; OLIVEIRA, Carlos Augusto de Souza. *Resíduos da construção civil para a produção de concretos estruturais*. Revista Construindo, v. 8, n. 2, 2016. Disponível em: <https://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/4804/2436> Revista FUMEC+2Revista FUMEC+2. Acesso em: 25 de outubro de 2025.

PIMENTEL, Lia Lorena; PISSOLATO Júnior, Osvaldo; JACINTHO, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de; MARTINS, Heline Laura de Sousa. *Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas*. Revista Matéria, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/JJ8rGkNnK5TNxNws7Z6pKKr/abstract/?lang=pt> e também disponível em PDF em https://www.researchgate.net/publication/323558570_Argamassa_com_areia_proveniente_da_britagem_de_residuo_de_construcao_civil__Avaliacao_de_caracteristicas_fisicas_e_mecanicas. Acesso em: 25 de outubro de 2025.

SILVA, Jamilly Alfano da; AQUINO FILHO, Gastão Coelho de; SILVA, Cícero Joelson Vieira. *Adição de resíduos reciclados de construção e demolição na produção de argamassas sustentáveis*. Revista Eletrônica de Educação da Faculdade Araguaia, v. 13, n. 1, p. 46-55, 2018. Disponível em: https://sipe.uniaraguaia.edu.br/index.php/REVISTAUNIARAGUAIA/article/download/625/pdf_139/2364. Acesso em: 25 de outubro de 2025.

SCHILLER, Dorlivete et al. [Título completo do artigo a confirmar]. [s.l.], s.d. Disponível em: <http://www.fumec.br/revistas/construindo/article/view/4804/2436> Centro Científico Conhecer Acesso em: Acesso em: 25 de outubro de 2025.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DOS FATORES CONTRIBUINTES PARA TOMBAMENTOS DE CARRETAS NO RETORNO DA BR-040 COM RODOVIA RIO - MAGÉ: DESAFIOS E SOLUÇÕES

Eduardo Damasceno de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
eduardo.d.oliveira@icloud.com

Emerson Clay Costa Guimarães de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
emersonclay.engprod@gmail.com

Jucelene Ramos da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
jucelene.silva@live.com

Rachel Cristina Santos Pires

Mestre em Desenvolvimento Local, Engenheira Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
rachelpireseng@gmail.com

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

Igor Charles Siqueira Leite

Doutor em Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
igor.leite@unisuam.edu.br

RESUMO

O tombamento de veículos de carga (carretas) representa um grave problema de segurança viária no Brasil, com impactos financeiros, sociais e logísticos. Este trabalho de conclusão de curso analisa os fatores contribuintes para a alta frequência de sinistros dessa natureza na alça de retorno 108-D, que interliga a BR-040 à rodovia Rio-Magé, no estado do Rio de Janeiro. O objetivo principal é diagnosticar as causas técnicas que levam aos tombamentos e propor soluções de engenharia para mitigar o problema. A metodologia adotada incluiu uma revisão bibliográfica focada em manuais de projeto geométrico do DNIT e literatura de engenharia rodoviária, análise de dados cartográficos via satélite, inspeções visuais in loco e um estudo técnico comparativo dos parâmetros geométricos da curva. Os resultados da análise

técnica demonstraram uma incompatibilidade crítica entre o projeto executado e os padrões de segurança normativos: a curva apresenta um raio de 50 metros, enquanto a velocidade máxima permitida de 50 km/h exigiria um raio mínimo de 82,3 metros para garantir a estabilidade dinâmica dos veículos pesados. Conclui-se que a principal causa dos acidentes é essa falha geométrica, e são propostas duas soluções de intervenção: (1) a redução da velocidade máxima permitida na alça para 40 km/h, adequando-a ao raio existente, ou (2) a readequação geométrica da alça, aumentando o raio para o mínimo normativo de 82,3 metros.

Palavras-chave: Segurança Viária, Projeto Geométrico, Tombamento de Veículos, BR040, Engenharia Rodoviária.

INTRODUÇÃO

O tombamento de carretas nas vias brasileiras representa uma séria questão que gera impactos negativos nos âmbitos financeiro, ambiental e social. Na ligação da BR-040 com a rodovia Rio-Magé, essa modalidade de sinistro é um problema recorrente, afetando diretamente a fluidez do trânsito e a proteção de motoristas e residentes locais. O design geométrico e o volume de veículos do trecho impõem um obstáculo considerável aos condutores de caminhões, especialmente durante as manobras de retorno.

Neste trabalho, serão investigados os fatores etiológicos desses tombamentos, incluindo a conformação do traçado viário, o estado de conservação da pista, as práticas dos condutores e as características intrínsecas dos veículos pesados. Abordaremos a fundamentação teórica relacionada à administração de projetos rodoviários, conforme preconizado por autores clássicos como Pontes Filho (1998) e SENÇO (1980), e efetuaremos os cálculos para verificar a curva empregada no segmento em pauta.

A finalidade primordial deste projeto é definir e apresentar as peças construtivas elementares das estradas, utilizando como objeto de estudo a alça de retorno 108-D. Espera-se que esta análise forneça subsídios para a sugestão de ações de engenharia que possam reduzir a frequência desses eventos, elevando a segurança e o desempenho do tráfego na seção da rodovia.

A identificação desses determinantes é vital para a concepção de intervenções que atenuem os perigos e os prejuízos decorrentes. A base metodológica inclui a revisão de literatura (Manuais do DNIT), o emprego de cálculos a partir de dados cartográficos e inspeções in loco, e o uso de informações oficiais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e demais organismos fiscalizadores e de pesquisa.

DESENVOLVIMENTO

Definição de rodovias e como são construídas

As rodovias, ou estradas de rodagem, são estruturas viárias essenciais, projetadas para permitir a movimentação de pessoas e cargas entre localidades distintas. Elas suportam o deslocamento de veículos automotores como carros, ônibus, motos e caminhões. Esta infraestrutura é vital para a eficácia do transporte e para a conectividade regional.

O planejamento é o alicerce de qualquer projeto rodoviário. O "Guia de Análise de Projetos Rodoviários" (DNIT, 2018) estabelece um fluxo processual que se inicia com os Estudos Básicos, seguindo para as fases de Infraestrutura, Superestrutura, Obras de Arte Especiais (OAE) e, finalmente, Orçamento. O guia normatiza, ainda, que nenhuma dessas etapas de projeto deve começar antes da conclusão dos estudos de viabilidade (EVTEA - Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental) e de impacto ambiental (EIA/RIMA).

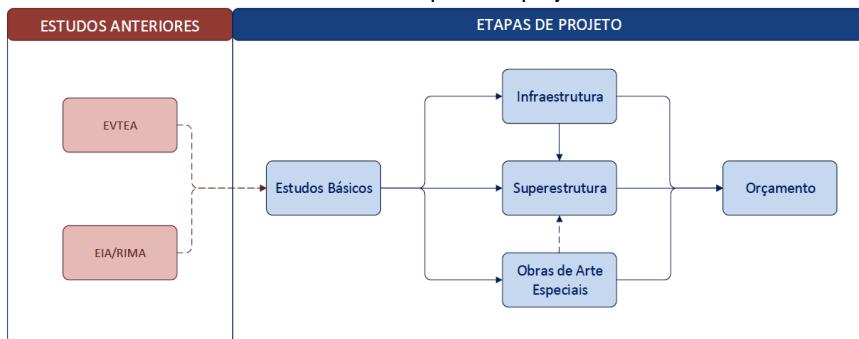
Os Estudos Básicos são focados em coletar as informações que subsidiarão as fases seguintes do projeto. Segundo o DNIT (2018), esta etapa envolve um conjunto de investigações, que incluem sondagens geológicas e geotécnicas, análises hidrológicas (tanto para a via quanto para as OAE), levantamentos topográficos e estudos de tráfego. É também nesta fase que se define a "Diretriz da Estrada", ou seja, o melhor traçado para o alinhamento da rodovia.

A função da infraestrutura é conformar o terreno natural às exigências geométricas do projeto, o que é vital para a segurança e vida útil do pavimento. Conforme detalha Pontes Filho (1998), este processo é composto por serviços essenciais, como a terraplenagem (que estabelece o greide final), a proteção de taludes, os sistemas de drenagem subterrânea e a construção de obras de arte correntes.

A etapa de Superestrutura oferece o suporte para um tráfego confortável e seguro. Essa camada (pavimento) é fundamental na distribuição do peso dos veículos, minimizando o desgaste (DNIT, 2018). A qualidade da pavimentação asfáltica, por exemplo, é um campo de estudo extenso, como detalhado por Bernucci et al. (2008), e impacta diretamente a longevidade da via e a segurança da rolagem.

As Obras de Arte Especiais (OAE) são estruturas como pontes, viadutos e túneis, que permitem a superação de obstáculos naturais (DNIT, 2018).

Quadro 1 – As etapas dos projetos rodoviários



Fonte: DNIT. Guia de análise de projetos rodoviários, P.13. (2018)

Por fim, o orçamento é o fator determinante para a viabilização da construção (DNIT, 2018). O fluxograma deste processo é ilustrado no Quadro 1.

A BR-040: Contexto histórico e estudo de caso da saída 108-D

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), a BR-040 teve a concessão do trecho Juiz de Fora/MG - Rio de Janeiro/RJ cedida à CONCER a partir de 1996. Conforme Campos e Silva (2019), no ano de 2013 o projeto do Arco Metropolitano teve o início de suas obras, totalizando 145km e perpassando por nove municípios da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

Segundo o portal G1 (2014), com o arco, cerca de 35 mil veículos (dos quais 10 mil caminhões de carga) deixariam de passar por vias arteriais do Rio de Janeiro, impactando positivamente a logística do Porto de Itaguaí e o PIB estadual. Ao analisar o trecho da saída 108-D (Figura 1), observa-se que parte do local foi desapropriado para a ampliação da via.

Figura 1. Trecho da Saída 108-D Antes x Depois da obra (2008 x 2024)



Fonte: Google Earth – Acesso em 17 out. 2024

Atualmente, 10 anos após a inauguração, a pesquisa in loco e a análise de imagens (Figura 2) revelam que o trecho 108-D apresenta problemas de manutenção nos guarda-corpos, com sinais claros de acidentes anteriores. Embora o local contenha sinalização de velocidade máxima permitida (50 km/h), os danos contínuos nos dispositivos de segurança indicam um problema sistêmico na via.

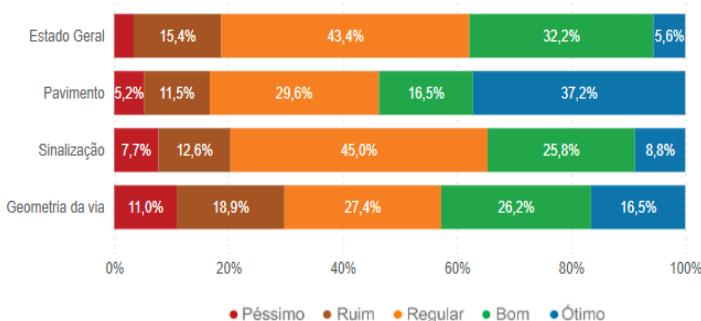
Figura 2. Trecho da saída 108-D com sinais de pontos de acidentes



Fonte: Google Earth – Acesso em 17 out. 2024

A BR-040 (gestão CONCER) foi avaliada pela Pesquisa CNT de Rodovias (2024). Conforme o Gráfico 1, as rodovias de jurisdição federal apresentam classificações majoritariamente “Regular”, “Ruim” ou “Péssimo” (65,3%) no quesito Sinalização.

Gráfico 1 – Classificação das rodovias em Jurisdição Federal

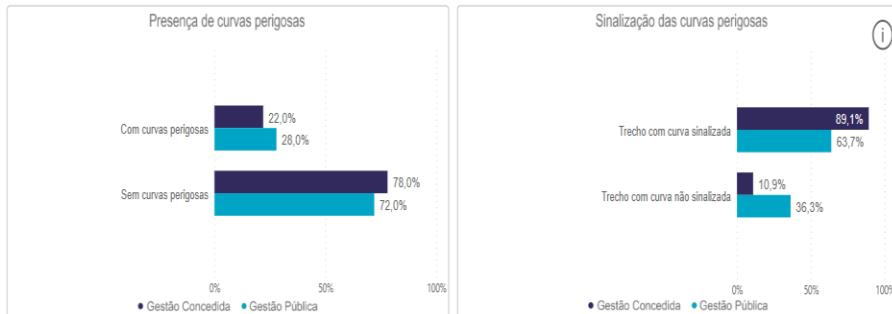


Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias 2024

*Análise dos fatores contribuintes para tombamentos de carretas no retorno da BR-040 com rodovia
rio - magé: desafios e soluções*

O Gráfico 2 (CNT, 2024) indica que, embora as vias concedidas (como a BR-040) tenham menos curvas perigosas, a sinalização é um ponto crítico. A sinalização, apesar de relevante, não é o único fator. A segurança em curvas depende de uma tríade: sinalização, superelevação e raio (CARVALHO, 2015)."

Gráfico 2 – Presença e sinalização de curvas perigosas



Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias 2024

A análise específica da BR-040 (Figura 3) mostra que o trecho do RJ é classificado como "Bom" em sinalização. Isso reforça a hipótese de que a sinalização (Figura 5), embora presente e adequada, não é suficiente para evitar os sinistros, sugerindo que o problema é de natureza geométrica.

Figura 3. Análise Geral da Rodovia BR-040



Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias 2024

Análise do projeto de construção do trecho da saída 108-D

A BR-040 é uma rodovia radial federal. A análise técnica da alça 108-D (Figura 4) foca nos parâmetros de tráfego (Número "N") e na geometria da curva.

Figura 4. Identificação do trecho 108-D na BR-040



Fonte: Google Earth

O cálculo do Número “N” projeta o desgaste do pavimento ao longo do tempo (DNIT, 2006a). A fórmula considera $N_{ano} = 365 \times VMD \times K \times FV \times FR$.

Onde:

- VMD – Volume Médio Diário
- K – Fator de correção relacionado ao tipo de tráfego (Bidirecional = 0,5);
- FV – Fator de variação relacionado ao tipo de veículo
- FR – Fator de redução / Fator de equivalência

Considerando uma taxa de crescimento de 2% ao ano e que todos os veículos trafegam com carga máxima legal, chegou-se aos seguintes resultados:

Quadro 2 – Cálculo do “N”

Ano base	VMD	N ano	N acumulado
N_0	59221	$1,08 \times 10^7$	-
N_1	60405,42	$1,10 \times 10^7$	$2,18 \times 10^7$
N_2	61613,53	$1,12 \times 10^7$	$3,30 \times 10^7$
N_3	62845,80	$1,15 \times 10^7$	$4,45 \times 10^7$
N_4	64102,71	$1,17 \times 10^7$	$5,62 \times 10^7$
N_5	65384,77	$1,19 \times 10^7$	$6,81 \times 10^7$
N_6	66692,46	$1,22 \times 10^7$	$8,03 \times 10^7$
N_7	68026,31	$1,24 \times 10^7$	$9,27 \times 10^7$
N_8	69386,84	$1,27 \times 10^7$	$10,54 \times 10^7$
N_9	70774,58	$1,29 \times 10^7$	$11,83 \times 10^7$
N_{10}	72190,07	$1,32 \times 10^7$	$13,15 \times 10^7$

Fonte: Elaborado pelos autores

Vale ressaltar que os dados considerados fornecidos pelo PNCT são de 2018. Portanto, a projeção apresentada compreende de 2018 a 2028. Durante as pesquisas também não foi possível encontrar dados sobre o FV'e FR.

A projeção (Quadro 2) indica um tráfego pesado, mas o fator crucial para o tombamento é a geometria. A análise dos dados de projeto (Quadro 3) identificou um raio de curva executado de 50.000 mm (ou 50, 0 m)

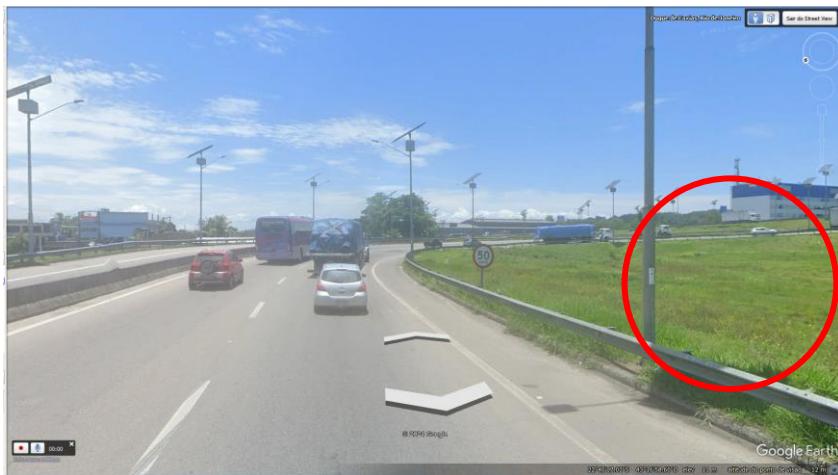
Quadro 3 – Dados do projeto para levantamento de raio mínimo

Ângulo da curva (AC)	Raio da curva (R)	Diâmetro da curva (D)
94,27°	50.000 mm	100.000 mm

Fonte: Elaborado pelos autores

O tombamento ocorre quando a força centrífuga supera a força estabilizadora (peso do veículo e atrito). A força centrífuga é inversamente proporcional ao raio ($F_c = m \cdot v^2/R$). Em uma curva com raio pequeno, a força centrífuga aumenta drasticamente, exigindo uma superelevação (inclinação da pista) adequada e/ou menor velocidade para manter a estabilidade (SENÇO, 1980). A via possui sinalização de 50 km/h, conforme evidenciado na Figura 5:

Figura 5. Identificação da sinalização de velocidade na via



Fonte: Google Earth – Acesso em 17 out. 2024

Contudo, ao consultar as normas do DNIT (2010), verifica-se que para uma velocidade de projeto de 50 km/h, considerando uma superelevação máxima usual para alças (em torno de 8% a 10%) e o coeficiente de atrito lateral, o raio mínimo absoluto exigido seria de aproximadamente 82,3 metros. A análise, portanto, expõe a falha central: o raio executado (50,0 m) é significativamente menor que o raio mínimo normativo (82,3 m) para a velocidade permitida (50 km/h).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Trabalho de Conclusão de Curso se propôs a analisar os fatores técnicos que contribuem para a alta recorrência de tombamentos de carretas na alça de retorno 108-D, na interseção da BR-040 com a rodovia Rio-Magé. A investigação metodológica, que combinou análise de dados, inspeção visual e revisão de normas técnicas de engenharia rodoviária, permitiu diagnosticar a causa principal dos sinistros.

O estudo concluiu que existe uma incompatibilidade técnica crítica entre a geometria da via executada e a velocidade de operação permitida. O raio da curva existente é de 50,0 metros, enquanto a velocidade máxima sinalizada na via é de 50 km/h.

Conforme as diretrizes do DNIT (2010), para que um veículo, especialmente um de carga com centro de gravidade elevado, trafegue a 50 km/h com segurança e estabilidade dinâmica, o raio mínimo da curva deveria ser de 82,3 metros. Inversamente, para manter o raio atual de 50,0 metros, a velocidade máxima segura deveria ser reduzida para 40 km/h, de modo a diminuir a força centrífuga atuante sobre os veículos.

Dadas essas descobertas, este trabalho propõe duas ações primárias e excludentes para a mitigação imediata dos acidentes:

Proposta 1 (Intervenção de Sinalização): Reduzir o limite de velocidade da alça de 50 km/h para 40 km/h. Esta solução adequa a operação da via à geometria existente, sendo a medida de menor custo e implementação mais rápida.

Proposta 2 (Intervenção Estrutural): Realizar uma obra de readequação geométrica da alça, aumentando o raio da curva de 50,0 metros para, no mínimo, 82,3 metros. Esta solução permite manter a velocidade operacional de 50 km/h e representa a correção definitiva do projeto.

É fundamental complementar qualquer uma dessas ações com a intensificação da sinalização de advertência (placas de “Curva Acentuada” e velocidade) e a manutenção preventiva dos guarda-corpos, elementos essenciais para assegurar a proteção dos motoristas e diminuir a estatística de sinistros no local. Este estudo evidencia a importância do rigor técnico e do estrito cumprimento das normas de projeto geométrico para a garantia da segurança viária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

CAMPOS, C. H. de., e SILVA, J. M. P. da. Arco Metropolitano do Rio de Janeiro: as incongruências dominantes. ENANPUR. Natal, 2019. Disponível em:

[CARVALHO, T. L. **Manual de segurança e sinalização rodoviária.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.](https://xviiienanpur.anpur.org.br/anaisadmin/capapdf.php?reqid=951#:~:text=Arco%20Metropolitano%20do%20Rio%20de%20Janeiro%3A%20as%20incongru%C3%A3ncias%20dominantes.,-Autores%3A&text=Resumo%3A,para%20as%20demais%20escalas%20nacionais. Acesso em 30 set. 2024.</p></div><div data-bbox=)

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2024.** Brasília:

CNT, 2024. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/cbf59b9e-fd1a-41fc-b230-172c4dc42100>. Acesso em: 17 out. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de estudos de tráfego. Rio de Janeiro: IPR, 2006. (Publicação 723).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos/instruções de serviço. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006. (Publicação 726).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários: instruções para apresentação de relatórios. Rio de Janeiro: IPR, 2006. (Publicação 727).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Projeto geométrico: Projeto em planta e perfil da Est. 0+0.00 A. EST. 70+0.00 Pista Principal. [S.I.], 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. Rio de Janeiro: IPR, 2010. (Publicação 742).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Guia de análise de projetos rodoviários. Versão beta V.3. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Quadro de fabricantes de veículos. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/operacoes-rodoviarias/pesagem/QFV2012ABRIL.pdf> . Acesso em 29 nov. 2024.

FRAENKEL, B. B. Engenharia rodoviária. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

G1. "RJ inaugura Arco Metropolitano após 40 anos e espera PIB R\$ 1,8 bi maior." G1, 01 set. 2014, <https://glo.bo/1x9q4Zd>. Acesso em 17 out. 2024.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Imagens de satélite do trecho da BR-040, saída 108-D. Acesso em:
17 out. 2024.

PONTES FILHO, G. **Estradas de rodagem: projeto geométrico**. São Paulo: IPC-PIH, 1998.

SENÇO, W. de. **Estradas de rodagem: projeto**. São Paulo: USP/Escola Politécnica, 1980.

CAPÍTULO 4

USO DO BIODIGESTOR ANAERÓBICO PRODUZIDO EM PEAD (POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE) PARA TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO UNIFAMILIAR

Tainá dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
taina.silva@souunisuam.com.br

Rafael Guanabara

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
rafaelguanabara@souunisuam.com.br

Matheus Hermida

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
matheushermida@souunisuam.com.br

Rachel Cristina Santos Pires

Mestre em Desenvolvimento Local, Engenheira Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
rachelpireseng@gmail.com

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

Igor Charles Siqueira Leite

Doutor em Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
Igor.leite@unisuam.edu.br

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um protótipo de biodigestor anaeróbico confeccionado em Polietileno de Alta Densidade (PEAD), voltado para o tratamento de esgoto doméstico unifamiliar em áreas não atendidas por rede pública de esgotamento sanitário. A proposta surge como uma alternativa tecnológica acessível, compacta e sustentável para o saneamento básico descentralizado, promovendo a melhoria das condições sanitárias e a proteção ambiental. O sistema opera por meio da digestão anaeróbica, processo em que microrganismos decompõem a matéria

orgânica na ausência de oxigênio, gerando dois subprodutos valiosos: o biogás, com potencial para uso energético, e o lodo estabilizado, com aplicação como biofertilizante. A pesquisa incluiu revisão bibliográfica, análise da eficiência do sistema, conformidade com normas técnicas e ambientais vigentes, além da relação com a Agenda 2030 da ONU, especialmente com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (Água potável e saneamento).

Palavras-chave: esgoto sanitário; saneamento; sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a falta de tratamento e destinação do esgoto sanitário vem se agravando desde o período chamado "milagre econômico" da década de 1970, momento da urbanização acelerada, mas com pouco planejamento urbano e ambiental (Spindler, 2018).

A ausência de saneamento básico adequado está diretamente associada à propagação de diversas doenças, principalmente aquelas de veiculação hídrica, que resultam do contato com água contaminada, esgoto não tratado e condições inadequadas de higiene. Entre as principais estão: ascaridíase, leptospirose, cólera, hepatite A, esquistossomose, entre outras(Fávero & Cunha, 2019).

Com isso, o biodigestor anaeróbico surge como uma alternativa viável, acessível e ecologicamente correta para famílias e pequenas propriedades rurais, permitindo o tratamento do esgoto diretamente no local onde é gerado. Os principais modelos biodigestores incluem o indiano, o chinês, a batelada, canadense, o tubular, o UASB e o industrial. O biodigestor industrial destaca

se pela alta capacidade de processamento, automação e uso em larga escala, como em agroindústrias e aterros sanitários (Lima, 2020).

A técnica propõe a implantação de um biodigestor anaeróbico unifamiliar em PEAD para tratamento de esgoto doméstico em áreas sem rede pública, alinhado aos princípios da sustentabilidade e ao ODS 6 – Água potável e saneamento, que visa garantir acesso universal à água e saneamento e reduzir a poluição (ONU - Nações Unidas Brasil, 2025). O sistema destaca-se pela praticidade e eficiência: os efluentes, após a caixa de gordura, são conduzidos ao biodigestor, onde bactérias anaeróbicas decompõem a matéria orgânica, e o efluente passa por um filtro de sólidos antes de ser liberado.

A metodologia empregada neste estudo fundamentou-se em uma pesquisa bibliográfica, buscando reunir e analisar informações existentes sobre o funcionamento e a viabilidade do biodigestor anaeróbico em PEAD (polietileno de alta densidade) como uma alternativa eficiente para o tratamento de efluentes domésticos.

DESENVOLVIMENTO

Funcionamento

Os biodigestores são estruturas fechadas e à prova de vazamentos (Figura 1), projetadas para receber matéria orgânica e promover sua decomposição na ausência de oxigênio, em um processo conhecido como digestão anaeróbica. Durante o tempo de retenção dentro do sistema, ocorrem reações bioquímicas que resultam na geração de gases e um subproduto líquido ou pastoso com potencial uso como biofertilizante (Magalhães, 1986).

Figura 1 - Modelo de Biodigestor industrial em PEAD.



Fonte: Site da Fortlev, 2025.

O tratamento inicial do esgoto ocorre quando os efluentes domésticos são conduzidos pelo sistema de esgoto sanitário até a tubulação de entrada do biodigestor. O esgoto da cozinha também pode ser direcionado ao biodigestor, contanto que passe previamente pela caixa de gordura (Fortlev, 2024).

Conforme figura 2, ao chegar no biodigestor, o esgoto é conduzido até a parte inferior do reservatório, onde ocorre o tratamento por meio de um fluxo ascendente, do fundo para a superfície, promovido pela ação de bactérias anaeróbicas. As bactérias presentes no lodo são responsáveis por decompor a matéria orgânica contida no esgoto, para iniciar o processo de tratamento, é necessário apenas o próprio esgoto como fonte de matéria orgânica (Fortlev, 2019).

Figura 2 - Início da digestão anaeróbica.



Fonte: Vídeo – Conheça o Biodigestor Fortlev, 2019.

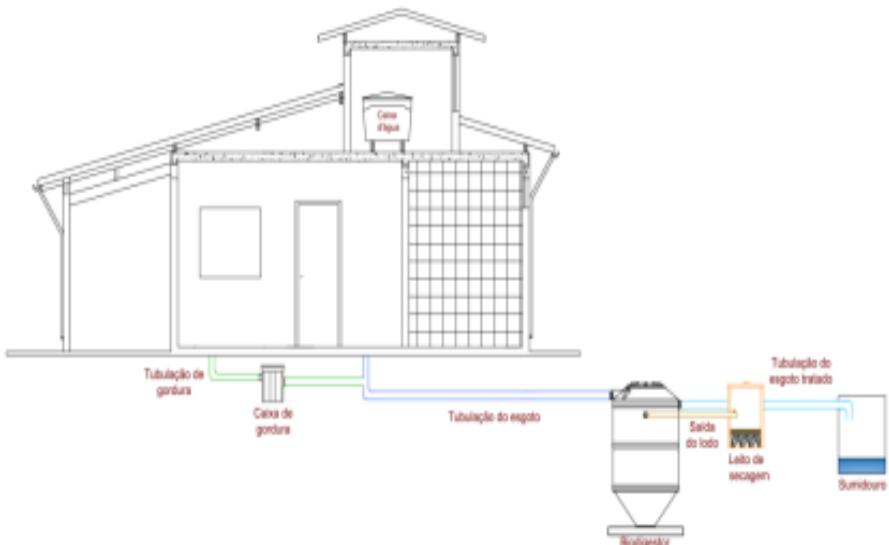
O efluente tratado atravessa o filtro de sólidos, que tem como função reter a matéria orgânica residual e garantir maior eficiência na separação dos sólidos suspensos e sedimentáveis. Na sequência, o líquido é encaminhado para a saída do sistema (Fortlev, 2024).

A destinação final ou o uso do efluente tratado são etapas cruciais que devem ser rigorosamente alinhadas às exigências da legislação ambiental aplicável, garantindo a proteção dos ecossistemas e da saúde pública, abaixo algumas das saídas mais comuns incluem:

Infiltração no solo: o efluente tratado pode ser direcionado para o solo para infiltração. Isso só é possível se o solo tiver uma permeabilidade adequada e se as normas ambientais permitirem. Corpo d'água: Se permitido pelas regulamentações, o efluente pode ser lançado em um rio, lago ou outro corpo d'água. Desde que o efluente atenda aos padrões de qualidade exigidos. Reuso: Após passar por um tratamento secundário adicional para remover mais poluentes antes do uso, o esgoto tratado pode ser reutilizado para diversas finalidades, dependendo do nível de purificação e das regulamentações. Os principais usos incluem: irrigação de lavouras, limpeza de ruas, recarga de aquíferos e ambiental.

A seguir, apresenta-se uma ilustração do fluxograma do Sistema de Esgotamento Sanitário (Figura 3), abrangendo desde a captação dos efluentes até o descarte final no sumidouro.

Figura 3 - Fluxo do tratamento de esgoto.



Fonte: Autores, 2025.

Durante esse processo são liberados dois subprodutos: o lodo e o biogás. O biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), pode ser utilizado como fonte de energia renovável, especialmente em áreas rurais para cocção, aquecimento e iluminação, quando produzido em quantidade suficiente (Lima, 2020). Já o lodo resultante da biodigestão, após estabilização, pode servir como biofertilizante rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, desde que seu uso atenda às normas sanitárias e ambientais da Resolução CONAMA nº 375/2006.

Eficiência do sistema

A eficiência do sistema de tratamento é avaliada com base na remoção da carga orgânica e na significativa redução de patógenos presentes no efluente. A interação sinérgica entre os processos anaeróbios que ocorrem no biodigestor e a ação do filtro anaeróbio garante uma degradação progressiva da matéria orgânica, culminando em uma diminuição dos parâmetros indicadores de poluição.

Entre os principais índices de eficiência observados neste sistema, destaca-se a redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), que ocorre por meio da degradação anaeróbica da matéria orgânica, este processo atinge índices de remoção entre 70% e 80% e a redução de Sólidos Suspensos Totais (SST) é promovida pela sedimentação e filtração biológica no filtro anaeróbio, resultando em uma remoção eficiente de sólidos particulados e, consequentemente, na diminuição da turbidez do efluente.

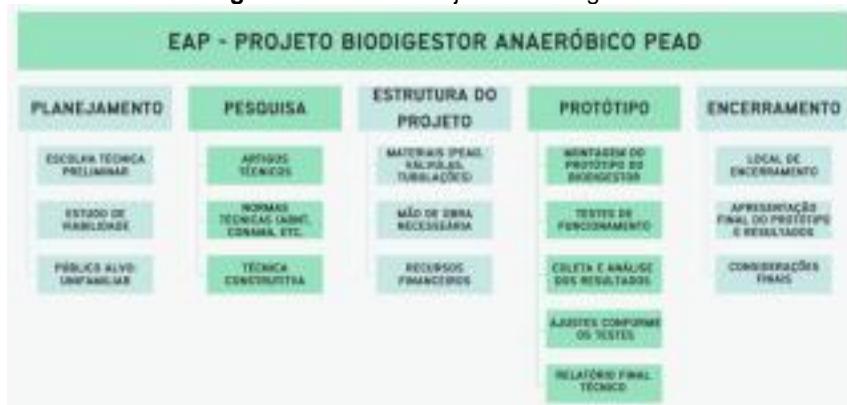
tratado (Innovent Engenharia & Planep Engenharia, 2025).

Outro ponto crucial é a redução de Coliformes Totais. O ambiente anaeróbio inerente ao sistema dificulta significativamente a proliferação de microrganismos patogênicos, proporcionando uma redução que varia entre 80% e 90% na contagem desses indicadores. Isso minimiza o potencial poluente do efluente e o prepara de forma adequada para possíveis etapas de pós-tratamento ou para uma disposição final ambientalmente segura (Innovent Engenharia & Planep Engenharia, 2025).

Estrutura Analítica do Projeto (EAP)

A Estrutura Analítica do Projeto (EAP) é a base do planejamento e da gestão eficaz de qualquer projeto. Sua principal função é transformar um objetivo amplo em partes menores, comprehensíveis e gerenciáveis, o que permite maior controle, clareza e eficiência durante a execução do projeto (Figura 4).

Figura 4 – EAP do Projeto de Biodigestor.



Fonte: Adaptação no site Canva, 2025.

Cronograma Físico-Financeiro

O cronograma físico-financeiro (Gráfico 1) é essencial para o planejamento e controle de projetos, integrando etapas físicas e custos de forma organizada. Em obras como a implantação de um biodigestor anaeróbico em PEAD, permite otimizar recursos, garantir prazos e assegurar a execução dentro do orçamento, desde a aquisição de materiais até a entrega final do sistema.

Gráfico 1 – Cronograma físico-financeiro.



Com base nas pesquisas realizadas, suas principais vantagens dos biodigestores em PEAD são a alta resistência química e mecânica do material, que é imune à corrosão e à degradação por substâncias presentes nos efluentes, garantindo durabilidade e longa vida útil ao equipamento. O PEAD também facilita o transporte e a instalação devido à sua leveza, sendo especialmente útil em áreas de difícil acesso. Sua impermeabilidade assegura um ambiente hermético para a digestão anaeróbica, prevenindo vazamentos e aumentando a eficiência do processo.

Aspectos positivos e negativos

Os biodigestores de PEAD oferecem baixa manutenção e uma vida útil superior a 20 anos, proporcionando benefícios ambientais e econômicos, como a redução da carga orgânica e a produção de biogás (fonte de energia) e lodo estabilizado (biofertilizante).

No entanto, o sistema tem menor capacidade de processamento

(ideal para uso unifamiliar impacto ou perfuração, exigindo cuidado na instalação. O funcionamento eficiente depende da ou pequenas comunidades) e o custo inicial pode ser alto. O material PEAD é vulnerável a danos por remoção periódica do lodo e do correto dimensionamento. Além disso, a viabilidade da reutilização dos subprodutos (biogás e biofertilizante) pode ser afetada por restrições legais.

Conformidades e Inconformidades Normativas

O projeto e a operação dos biodigestores anaeróbicos são regidos por rigorosas normas brasileiras. As principais normativas da ABNT são a NBR 7.229 (tanques sépticos) e a NBR 13.969 (tratamento complementar e disposição final de efluentes).

No âmbito ambiental, o CONAMA nº 375/2006 regulamenta o uso agrícola do lodo tratado (biofertilizante), enquanto o CONAMA nº 430/2011 estabelece padrões de qualidade para o lançamento de efluentes em corpos hídricos (DBO, SST, etc.).

A instalação deve seguir o Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), respeitando as Áreas de Preservação Permanente (APPs). O sistema se alinha ao novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020), que incentiva soluções descentralizadas, desde que em conformidade com as exigências sanitárias e ambientais.

O não cumprimento dessas regras, incluindo a Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998), implica em sanções. A adesão às normas é indispensável para garantir a eficácia do sistema, a proteção ambiental e a regularização do empreendimento.

Cumprimento da Agenda 2030 e ODS-6

A Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), entre os quais destaca-se o ODS 6, que busca “garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e saneamento para todos”. Nesse contexto, os biodigestores anaeróbicos em Polietileno de Alta Densidade (PEAD) configuram-se como uma solução tecnológica eficaz e alinhada aos princípios dessa agenda.

Esses sistemas contribuem para a meta 6.2, ao oferecer tratamento de esgoto descentralizado e acessível, beneficiando áreas rurais e periféricas, e para a meta 6.3, ao reduzir a carga orgânica dos efluentes e evitar a contaminação dos corpos hídricos. Também favorecem a meta 6.6, ao proteger ecossistemas aquáticos e prevenir a degradação ambiental. Além do ODS 6, o uso do biodigestor contribui com o ODS 3 (Saúde e bem-estar), ODS 7 (Energia limpa e acessível), ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) (ONU - Nações Unidas Brasil, 2025).

Confecção do Protótipo

A partir das pesquisas e estudos realizados, foi possível desenvolver um protótipo com o objetivo de compreender melhor a dinâmica de funcionamento do biodigestor. A Figura 5 apresenta o modelo do biodigestor instalado, composto por um reservatório principal confeccionado em polietileno de alta densidade (PEAD), no qual ocorre a decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente no esgoto doméstico. O sistema está equipado com uma saída para o lodo e outra para a água tratada, ambos os efluentes estão direcionados para recipientes plásticos identificados, que simulam os pontos de coleta ou descarte.

A representação facilita a visualização do processo de separação e do funcionamento básico do sistema. Além de uma visão interna do protótipo, onde é possível observar as tubulações de saída e o material utilizado para simular a presença de microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia. Esses microrganismos transformam a matéria orgânica presente no esgoto em gases e resíduos estabilizados, promovendo o tratamento do efluente de forma eficiente.

Figura 5 - Protótipo de biodigestor anaeróbio.



Fonte: Autores, 2025.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção do biodigestor anaeróbico fabricado em PEAD representa uma solução promissora e tecnicamente viável para o tratamento do esgoto doméstico, especialmente em regiões rurais ou urbanas carentes de infraestrutura sanitária. Sua eficiência no processo de digestão anaeróbica, aliada à durabilidade do material e à facilidade de instalação, torna esse sistema uma alternativa acessível e sustentável. Além disso, o reaproveitamento de subprodutos, como o biogás e o lodo estabilizado, contribui para o cumprimento das metas do ODS 6 da Agenda 2030.

Contudo, a tecnologia apresenta desafios que necessitam de atenção. A capacidade de processamento dos biodigestores em PEAD,

embora eficaz para unidades residenciais e pequenas propriedades, pode ser limitada para demandas maiores, exigindo, em alguns casos, múltiplos sistemas ou soluções complementares. O custo inicial de aquisição e instalação, apesar dos benefícios a longo prazo, pode ser uma barreira para famílias de baixa renda ou municípios com orçamentos restritos.

Por fim, embora o sistema apresente desempenho satisfatório, ainda há espaço para aprimoramentos. A inclusão de etapas complementares de filtragem pode aumentar a qualidade do efluente final, ampliando seu potencial de reuso e reduzindo impactos ambientais. Investimentos em técnica e políticas públicas de incentivo também são fundamentais para garantir a disseminação e efetividade dessa solução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7229:1993. Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos.** Rio de Janeiro, 1993. Disponível em: <https://portal.seuma.fortaleza.ce.gov.br/fortalezaonline/servletrepositoriolegislacao?arquivo=N_BR_7229_1993.pdf&pasta=legislacaoGeral>. Acesso: 24 de maio de 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13969:1997. Tanques sépticos — Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos.** Disponível em: <<https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-13969-97-TS-Unid-trat-complem-e-dispos%C3%A7%C3%A7%C3%A3o-final.pdf>>. Acesso: 24 de maio de 2025.
- BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 fev. 1998. Acesso: 24 de maio de 2025.
- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007.** Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Acesso: 25 de maio de 2025.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa (Código Florestal). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 maio 2012. Acesso: 23 de maio de 2025.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.** Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Acesso: 23 de maio de 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Acesso: 23 de maio de 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementando e alterando a Resolução nº 357/2005. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011. Acesso: 25 de maio de 2025.

O SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL EM 6 GRÁFICOS | AOS FATOS. Disponível em: <<https://www.aosfatos.org/noticias/o-saneamento-basico-no-brasil-em-6-graficos/>>. Acesso: 17 de maio de 2025.

LIMA, H. PORTAL ENERGIA E BIOGÁS – BIOGÁS. Disponível em: <<https://biogaseenergia.com.br/biogas>>. Acesso: 17 de maio de 2025.

ONU. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL | AS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso: 17 de maio de 2025.

LIMA, H. BIODIGESTOR – MODELOS E CONFIGURAÇÕES. Disponível em: <<https://biogaseenergia.com.br/biodigestor-modelos-e-configuracoes>>. Acesso: 18 de maio de 2025.

FOSSA SÉPTICA FORTLEV. Disponível em: <https://www.fortlev.com.br/wp-content/uploads/2024/08/manual_tecnico_fortlev_fossa-septica.pdf.pdf>. Acesso: 18 de maio de 2025.

FORTLEV. MANUAL DE INSTALAÇÃO DO BIODIGESTOR. Disponível em: <<https://www.fortlev.com.br/videos/manual-instalacao-biodigestor/>>. Acesso: 18 de maio de 2025.

FORTLEV. CONHEÇA O BIODIGESTOR FORTLEV. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=p7Yz_xULDzE>. Acesso: 18 de maio de 2025.

SPINDLER, K. S. OS BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES NO TRATAMENTO DE EFLUENTE ORIUNDO DO ESGOTO DOMÉSTICO: UMA FERRAMENTA PARA GESTÃO AMBIENTAL. Revista Educacional Interdisciplinar - REDIN, v. 7, n. 1, 2018. Acesso: 16 de maio de 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Uso do biodigestor anaeróbico produzido em PEAD (polietileno de alta densidade) para tratamento de esgoto doméstico unifamiliar

A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS UTILIZANDO BIODIGESTOR ANAERÓBICO. Uberlândia, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20292/3/Produ%C3%A7%C3%A3oBiog%C3%A1sRes%C3%ADduos.pdf>>. Acesso: 16 de maio de 2025.

INNOVENT; PLANNEP. ENGENHARIA – INNOVENT E PLANNEP ENGENHARIA - PROPOSTA TÉCNICA. Disponível em: <<https://www.innovent.eng.br/>> e <<https://www.planep.com.br>>. Acesso: 07 de maio de 2025.

CAPÍTULO 5

RECURSO PARA TRATAMENTO DO ESGOTO SANITÁRIO RURAL COM O USO DO BIODIGESTOR ANAERÓBIO MODELO EMBRAPA – REVISÃO

Daniel Viegas Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
d.vvgomes@gmail.com

Ana Fernanda Pereira Amorim

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
amorim.afpa@gmail.com

João Neri

Trabalho de Conclusão de Curso 2025/2, curso de Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
Joaoneri99@gmail.com

Rachel Cristina Santos Pires

Mestre em Desenvolvimento Local, Engenheira Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
rachelpireseng@gmail.com

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

Igor Charles Siqueira Leite

Doutor em Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
Igor.leite@unisuam.edu.br

RESUMO

As regiões rurais brasileiras sofrem com um *déficit* no saneamento básico se comparado às grandes metrópoles e áreas urbanas, causando um cenário desafiador para as políticas públicas relacionadas a saúde e preservação ambiental. Tendo essa problemática em vista, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) desenvolveu uma série de alternativas para tratar as águas cinzas e águas negras. O foco desse artigo é apresentar através de pesquisas e revisões bibliográficas de documentos oficiais da EMBRAPA a técnica conhecida como Biodigestor Anaeróbio e como funciona

a dinâmica da sua utilização. Trata-se de um sistema que torna possível a acessibilidade ao tratamento parcial do esgoto doméstico em áreas rurais. A fossa séptica biodigestora faz-se uma importante tecnologia social, consolidada com impactos significativos ambientais, na saúde pública e no bem-estar na vida de quem reside no campo. Entende-se nesta revisão de literatura, que a fossa séptica biodigestora representa uma significativa contribuição para o saneamento rural brasileiro, sendo uma tecnologia econômica e acessível, capaz de solucionar o problema de saneamento básico, no que se refere ao tratamento do esgoto residual produzido nas atividades agropecuárias e também o esgoto sanitário dos domicílios do meio rural.

Palavras-chave: saneamento rural; biodigestão anaeróbia; tecnologia socioeconômica; sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A manutenção do meio ambiente é um direito fundamental, e o acesso ao saneamento básico é crucial para a saúde pública. No entanto, essa realidade não é observada para habitantes afastados dos grandes centros. Conforme dados do IBGE (2010), enquanto 92% dos moradores de certas regiões urbanas recebiam água tratada, apenas 31,5% da população rural tinha acesso ao mesmo serviço. Apenas 24,1% da área rural possuía rede coletora ou fossa séptica, contra 80,5% dos domicílios urbanos (GALINDO et al., 2019).

Essa situação representa uma grande perda para o Brasil, onde a falta de rede de esgoto resulta nas "línguas negras", que contaminam solos e recursos hídricos, aumentando os gastos com tratamento de doenças e água potável. Destaca-se a dificuldade do poder público em implantar sistemas coletores convencionais devido à extensão territorial e peculiaridades topográficas do país.

Diante desse contexto, a EMBRAPA desenvolveu a fossa séptica biodigestora (FSB), solução inovadora para regiões com dificuldade de atuação estatal. A FSB capta e trata efluentes de vasos sanitários (água negra) por biodigestão anaeróbia, transformando-os em efluente tratado que pode ser disponibilizado diretamente em mananciais sem dano ambiental. O sistema opera por decomposição anaeróbia, na qual microrganismos autóctones metabolizam compostos orgânicos complexos sem oxigênio.

DESENVOLVIMENTO

Este artigo foi desenvolvido desde uma cuidadosa revisão bibliográfica, baseada em materiais técnicos publicados pela EMBRAPA, especificamente sobre a tecnologia conhecida como FSB. O intuito principal foi reunir e explorar a expertise técnica-científica produzida pela EMBRAPA Instrumentação, que há anos busca soluções práticas e sustentáveis para os desafios do saneamento rural no Brasil.

História, evolução e contextualização dos biodigestores no mundo.

A biodigestão anaeróbia de resíduos biodegradáveis, embora não seja uma técnica nova, teve marcos importantes em sua evolução. Seus primeiros registros remontam a 1819, com a instalação da primeira unidade conhecida em Bombaim, Índia. A China é um excelente exemplo dessa ampla utilização histórica, contando atualmente com milhões de biodigestores que produzem gás combustível e fertilizantes orgânicos, confirmando a eficácia e relevância prática da tecnologia (NOVAES, et al., 2002).

Jean Baptiste Van Helmont observou inicialmente a ação da biodigestão anaeróbia e sua base científica. A identificação formal do gás metano ocorreu em 1776, através dos estudos do cientista italiano Alessandro Volta. Posteriormente, em 1808, o químico Humphry Davy identificou explicitamente o gás metano sendo produzido desde a digestão anaeróbia dos resíduos gerados pela criação de gado (LIMA, 2021).

Biodigestor no âmbito brasileiro.

A introdução dos biodigestores no Brasil teve início na década de 1970, como reflexo da crise do petróleo. A começar de 2001, porém, a EMBRAPA Instrumentação retomou o tema com um olhar diferente. Liderada por pesquisadores como Antônio Pereira de Novaes (in memoriam), a equipe concentrou esforços na FSB, concebida não para produzir energia, mas para levar saneamento básico de custo acessível às áreas rurais e gerar insumos para a agricultura orgânica (SILVA, et al., 2017; NOVAES, et al., 2002).

O progresso da FSB envolveu pesquisas de campo e laboratoriais, testes de materiais e ajustes construtivos até chegar a um modelo simplificado. Graças a esse trabalho conjunto, mais de 11.600 unidades foram implantadas, beneficiando em torno de 57 mil pessoas (SILVA, et al., 2017). Em 2017, a FSB alcançou um importante reconhecimento: tornou-se recomendada como tecnologia sugerida para esgoto rural no Programa Nacional de Habitação Rural (PNHR), vinculado ao Minha Casa, Minha Vida (SILVA, et al., 2017).

Materiais e métodos.

A metodologia adotada focou-se na análise da tecnologia da Fossa Séptica Biodigestora (FSB), utilizando critérios específicos para seleção de materiais de instituições de credibilidade como a EMBRAPA. Foram incluídos documentos desde 2017 até a atualidade, abrangendo aspectos históricos, técnicos e operacionais da tecnologia, com destaque para o Memorial Descritivo de Montagem e Operação (Silva et al., 2017), o Comunicado Técnico original (Novaes et al., 2002), o documento comemorativo de 20 anos do Programa (Silva et al., 2021) e o guia prático Perguntas e Respostas (GALINDO et al., 2019).

O processo fundamental da FSB baseia-se na biodigestão anaeróbia, onde microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio através de quatro fases sequenciais: hidrólise (conversão de

polímeros em monômeros), acidogênese (formação de ácidos orgânicos), acetogênese (produção de ácido acético) e metanogênese (produção de metano e CO₂ por arqueias metanogênicas) (KUNZ et al., 2019). O sistema opera em três caixas interligadas sob vedação hermética, sendo a adição periódica de esterco bovino crucial para fornecer microrganismos anaeróbios que intensificam a biodigestão e estabilizam a temperatura do sistema (SILVA, 2014).

O tratamento adequado do esgoto na FSB mitiga a poluição ambiental e permite o reaproveitamento do efluente tratado como biofertilizante, substituindo fertilizantes químicos e fortalecendo a agricultura sustentável. O desempenho eficaz do sistema depende da interação equilibrada entre os grupos microbianos, sendo essencial a manutenção periódica com esterco bovino para garantir a estabilidade do processo de digestão anaeróbia (SILVA, 2014).

Análise dos parâmetros físicos-químicos relevantes.

O funcionamento eficaz da Fossa Séptica Biodigestora (FSB) depende do controle de fatores físico-químicos essenciais. A temperatura deve ser mantida na faixa mesofílica (20°C-45°C), idealmente a 35°C, mediante exposição solar e enterramento parcial das caixas para isolamento térmico (KUNZ et al., 2019). O pH deve permanecer entre 6,8 e 7,4, sendo estabilizado pela adição de esterco bovino, que atua como tampão (KUNZ et al., 2019).

O sistema requer um Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) de aproximadamente 30 dias para garantir a decomposição adequada da matéria orgânica e redução de patógenos (NOVAES et al., 2002). A proporção Carbono/Nitrogênio (C/N) ideal situa-se entre 20:1 e 30:1, evitando-se tanto a deficiência de nitrogênio quanto o acúmulo de amônia tóxica (KUNZ et al., 2019). Finalmente, é crucial evitar a introdução de compostos tóxicos, como desinfetantes e antibióticos, que inibem a atividade microbiana (GALINDO et al., 2019).

Descrição detalhada do sistema

O funcionamento da FSB baseia-se no princípio da digestão anaeróbia, processo biológico onde microrganismos decompõem a matéria orgânica do esgoto na ausência de oxigênio, transformando-o em efluente estabilizado e biogás, com eliminação de patógenos e redução de odores (NOVAES et al., 2002; SILVA et al., 2017). Conforme ilustrado na FIGURA 1, o sistema padrão para até cinco pessoas é composto por três caixas d'água de 1.000 litros interligadas, onde as duas primeiras atuam como módulos de fermentação para a biodigestão anaeróbia, e a terceira funciona como caixa coletora para armazenamento do efluente tratado, que pode ser reaproveitado como biofertilizante (SILVA et al., 2017).

Figura 1 - Modelo da Fossa séptica biodigestora - FSB



Fonte: Embrapa, 2017.

O sistema modular da Fossa Séptica Biodigestora permite expandir sua capacidade mediante a adição de caixas de 1000 litros para cada 2,5 pessoas adicionais (SILVA et al., 2017). O projeto exige que o sistema seja conectado exclusivamente ao vaso sanitário, sem receber águas cinzas que possam comprometer o processo de biodigestão (GALINDO et al., 2019).

O processo bioquímico desenvolve-se sequencialmente através de hidrólise enzimática, fase ácida e metanogênica, exigindo condições adequadas de temperatura, TRH e nutrientes para seu sucesso (NOVAES et al., 2002). Para otimização, recomenda-se a adição mensal de esterco bovino fresco e água, que inocula bactérias especializadas, reduz odores e melhora a qualidade do efluente (SILVA et al., 2017).

A configuração inclui uma válvula de retenção antes da primeira caixa para adição da mistura, enquanto conexões entre caixas utilizam sifões que impedem a passagem de materiais flutuantes. Os suspiros nas duas primeiras caixas liberam o biogás produzido, e um registro na base da última caixa permite a retirada do efluente tratado para uso como biofertilizante (SILVA et al., 2017).

Processo Construtivo, Cronograma e Inicialização do Sistema

A Fossa Séptica Biodigestora (FSB) utiliza materiais de fácil aquisição no comércio, simplificando sua implementação em diversas regiões do Brasil. Comparada aos métodos convencionais de alvenaria e aos biodigestores tradicionais (modelos indiano e chinês), apresenta menor custo e maior facilidade construtiva, embora produza menos biogás. Contudo, seu principal objetivo não é a produção energética, mas o tratamento sanitário adequado e a geração de biofertilizante, tornando-a mais adequada ao contexto do saneamento rural brasileiro (GALINDO et al., 2019; NOVAES et al., 2002).

Tabela 1: Lista de materiais para construção da FSB.

Item	Descriutivo	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)		Valor unitário (R\$)	Total (R\$)
				Material	M.O		
1	Caixa d'água de fibra de vidro 1000 L (1)	Peça	3	450,00	283,50	733,50	2.200,50
2	Tubulação de PVC DN 100 (100mm) para esgoto	m	6	25,00	15,75	40,75	244,50
3	Válvula de retenção de PVC DN 100 (100 mm) para esgoto	Peça	1	80,00	50,40	130,40	130,40
4	Lixa de PVC DN 100 (100 mm)	Peça	4	12,00	7,56	19,56	78,24
5	Curva 90° rai o longo de PVC DN 100 (100 mm)	Peça	2	35,00	22,05	57,05	114,10
6	Té de PVC DN 100 mm	Peça	2	25,00	15,75	40,75	81,50
7	CAP de PVC DN 100 mm	Peça	2	7,70	4,85	12,55	25,10
8	Anel de borracha para vedação 100 mm	Peça	10	3,50	2,21	5,71	57,10
9	Tubulação de PVC soldável DN 25 mm	m	0,7	2,82	1,77	4,59	3,21
10	CAP de PVC soldável DN 25mm	Peça	2	1,50	0,95	2,45	4,90
11	Flange de PVC soldável DN 25mm	Peça	2	15,00	9,45	24,45	48,90
12	Tubulação de PVC soldável DN 50 mm	m	1	15,00	9,45	24,45	24,45
13	Flange de PVC soldável DN 50 mm	Peça	1	30,00	18,90	48,90	48,90
14	Registro de esfera compacto soldável de PVC DN 50 mm	Peça	1	21,00	13,23	34,23	34,23
15	Cola de silicone de 300 g com aplicador	Tubo	2	83,00	52,29	135,29	270,58
16	Pasta lubrificante para juntas elásticas em PVC rígido de 400g	Tubo	1	13,00	8,19	21,19	21,19
17	Adesivo para PVC 100 g	Tubo	1	25,00	15,75	40,75	40,75
18	Cola de contato 100 mL	Lata	1	25,00	15,75	40,75	40,75
19	Emulsão asfáltica tipo Neutrol	Litro	1	22,78	14,35	37,13	37,13
20	Guarnição esponjosa de borracha - espessura 10x20 mm	m	12	20,00	12,60	32,60	391,20
21	Parafuso de fenda cabeça redonda M4x30mm	Peça	8	0,58	0,37	0,95	7,60
22	Porca sextavada M4	Peça	8	0,07	0,04	0,11	0,88
23	Arruela lisa M4	Peça	16	0,08	0,05	0,13	2,08
TOTAL (R\$)							3.908,19

Fonte: EMBRAPA, 2019.

Custo do sistema.

Na tabela 1 observa-se a baixa despesa do sistema, que pode ser ainda menor se o morador fizer a instalação. O "Neutrol" ou tinta preta só são necessários em regiões de inverno frio; sem essa necessidade, o custo reduz em R\$37,13 (uma lata de 1L de Neutrol).

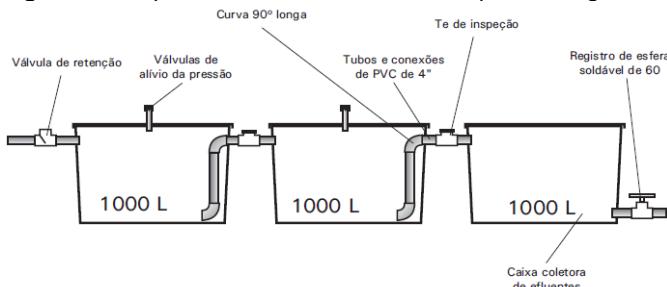
Processo construtivo e cronograma de execução

A implementação da FSB inicia-se com a seleção de local seco, distante de corpos d'água, com lençol freático mínimo de 1 metro e posicionado inferior à residência, dentro de 30 metros do vaso sanitário. A instalação em terrenos inclinados é viável com caixas em patamares (SILVA et al., 2017).

Os materiais necessários incluem caixas de fibra de vidro ou fibrocimento, tubulações e conexões de PVC, válvula de retenção, flanges, registro de esfera e materiais de vedação. A montagem inicia com a perfuração das caixas para instalação dos flanges, seguida de escavação e posicionamento nivelado. As interligações são realizadas com tubos PVC DN 100 mm, instalando-se uma válvula de retenção na entrada da primeira caixa e garantindo vedação hermética nas tampas (SILVA et al., 2017).

A finalização inclui aterramento e cerca de proteção. A operação inicial ativa-se com adição de 5 litros de esterco bovino fresco misturado com 5 litros de água em cada módulo, procedimento mensal para manter as bactérias essenciais à biodigestão (SILVA et al., 2017).

Figura 2 - Esquema do sistema da Fossa séptica biodigestora.



Fonte: EMBRAPA, 2019 - Adaptação Valentim Monzane.

O prazo de construção da FSB varia conforme acesso a materiais, condições do terreno e equipe. Conforme a Tabela 2, duas pessoas concluem o sistema em aproximadamente 3 dias (jornadas de 8 horas), demonstrando rápida implementação em propriedades rurais.

Tabela 2: cronogramas de execução da instalação do sistema.

Fase	Atividades	Horas								1º Dia				2º Dia			
		1º Dia				2º Dia				1	2	3	4	5	6	7	8
1	Planejamento e preparação do local	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
2	Escavação da vala																
3	Perfuração das caixas d'água																
4	Instalação das conexões nas caixas																
5	Posicionamento das caixas																
6	Conexão entre as caixas																
7	Conexão com a residência																
8	Instalação das válvulas e registros																
9	Reaterro e compactação																
10	Carregamento inicial do sistema																

Fonte: Própria.

Procedimentos para inicialização do sistema

Após a construção da FSB, deve-se verificar possíveis vazamentos enchendo parcialmente o sistema com água e observando por 24 horas. Confirmada a estanqueidade, adiciona-se à primeira caixa uma mistura inicial de 20 litros de esterco bovino fresco com 20 litros de água através da válvula de retenção, proporção dupla da manutenção mensal para estabelecimento rápido da colônia microbiana, completando com água limpa até o nível de saída para a segunda caixa (NOVAES et al., 2002).

O sistema deve permanecer desconectado do vaso sanitário por aproximadamente 10 dias, permitindo a multiplicação dos microrganismos e estabelecimento do processo de biodigestão. A eficiência máxima será alcançada após cerca de 30 dias de operação, quando o processo estiver plenamente estabilizado (GALINDO et al., 2019).

RESULTADOS

A experimentação com protótipos comprova a efetividade da FSB como solução viável para saneamento rural, gerando biofertilizante e reduzindo a contaminação ambiental com materiais de baixo custo. Esta tecnologia alinha-se ao ODS 6 da Agenda 2030, oferecendo uma alternativa para comunidades sem redes coletoras. A Figura 3 apresenta uma maquete esquemática desenvolvida por estudantes de engenharia civil, demonstrando a disposição do efluente tratado em curso d'água sem prejuízos ambientais significativos.

Figura 3 – Vista superior em escala reduzida representando o sistema.



Fonte: Própria.

A Figura 4 exibe o protótipo da FSB desenvolvido por estudantes de engenharia civil da UNISUAM, demonstrando a simplicidade construtiva do sistema e sua aplicabilidade para tratamento de esgoto residencial e rural.

Figura 4 – Protótipo representando a simplicidade da instalação do sistema.



Fonte: Própria

Viabilidade Econômica e Social

A Fossa Séptica Biodigestora da EMBRAPA configura-se como alternativa econômica para saneamento rural, com investimento inicial reduzido devido à utilização de materiais acessíveis como caixas d'água e tubos PVC (NOVAES et al., 2002). Sua operação não requer energia elétrica e a manutenção limita-se à adição mensal de esterco bovino e retirada periódica do biofertilizante (SILVA et al., 2017).

Este subproduto líquido de alta qualidade possibilita a substituição de fertilizantes químicos, promovendo a reciclagem de nutrientes e agricultura sustentável (NOVAES et al., 2002; SILVA et al., 2017). Socialmente, a tecnologia já beneficiou aproximadamente 57 mil pessoas através de mais de 11.600 unidades instaladas, melhorando as condições de saúde rural (SILVA et al., 2017).

Economicamente, o retorno social do investimento em saneamento rural é significativo, com estudos indicando que cada real aplicado gera R\$2,04 em benefícios, incluindo redução de custos com saúde e aumento da produtividade agrícola.

Aspectos Ambientais e Sustentabilidade

A Fossa Séptica Biodigestora (FSB) apresenta papel crucial na sustentabilidade rural ao prevenir a contaminação de recursos hídricos pelo tratamento adequado de águas negras, evitando que esgoto bruto seja lançado no ambiente (SILVA et al., 2017). Esta ação reduz significativamente a incidência de doenças de veiculação hídrica, representando importante contribuição para a saúde pública (NOVAES et al., 2002).

O sistema promove ainda a reciclagem de nutrientes através do biofertilizante produzido, que contém nitrogênio e fósforo conservados durante a digestão anaeróbia (NOVAES et al., 2002). Este efluente tratado pode ser aplicado com segurança na adubação, fechando o ciclo de nutrientes na propriedade e reduzindo a demanda por fertilizantes sintéticos (SILVA et al., 2017). Alinhando benefícios ambientais, sociais e econômicos, a FSB consolida-se como solução descentralizada adaptada à realidade rural brasileira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa demonstrou que a Fossa Séptica Biodigestora (FSB) da EMBRAPA constitui uma solução viável e econômica para o saneamento rural, aliando simplicidade construtiva à eficiência sanitária e ambiental (SILVA et al., 2017). O sistema não apenas trata efluentes e previne a contaminação de recursos hídricos, mas também produz biofertilizante aplicável na agricultura, promovendo sustentabilidade e saúde pública.

Contudo, requerem-se cuidados específicos: o efluente tratado deve ser utilizado apenas em culturas arbóreas, evitando contato direto com alimentos consumidos, e seu descarte em corpos hídricos exige análise prévia para garantir conformidade com normas ambientais. A experiência

com protótipos enriquece a formação em engenharia, ilustrando soluções sustentáveis para saneamento em áreas de recursos limitados.

Estudos futuros devem aprofundar o impacto do biofertilizante no solo e na produtividade agrícola, enquanto a implementação demanda monitoramento contínuo para assegurar sua sustentabilidade e segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SILVA, W. T. L.; MARMO, C. R.; GALINDO, N. **20 anos do Saneamento Rural na EMBRAPA Instrumentação: do Básico ao Ambiental**. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação, 2021. 38 p. (Documentos, 72).

LIMA, D. **A história dos biodigestores**. YouTube, 2021. 9min06s. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=VpnhGZ6u9iM>. Acesso: 25/05/2025
SILVA, W. T. L.; **ABC da Agricultura Familiar: Saneamento básico rural**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2014. (Embrapa Instrumentação. ABC da Agricultura Familiar).

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do (Ed.). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: EMBRAPA Suínos e Aves, 2019. p. 13-26

SILVA, W. T. L.; MARMO, C. R.; LEONEL, L. F. **Memorial Descritivo: Montagem e Operação da Fossa séptica biodigestora**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2017. (Embrapa Instrumentação. Documentos, ISSN 1518-7179; 65).

GALINDO, N.; SILVA, W. T. L.; NOVAES, A. P.; GODOY, L. A.; SOARES, M. T. S.; GALVANI, F.; MARMO, C. R.; ROMERO, P. A. L. **Perguntas e respostas: Fossa séptica biodigestora**. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação, 2019. 34 p.

NOVAES, A. P.; SIMÕES, M. L.; MARTIN-NETO, L.; CRUVINEL, P. E.; SANTANA, A.; NOVOTNY, E. H.; SANTIAGO, G.; NOGUEIRA, A. R. A. **Utilização de uma fossa séptica biodigestora para melhoria do saneamento rural e desenvolvimento da agricultura orgânica**. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação Agropecuária, 2002. 5 p. (Comunicado Técnico, 46).

CAPÍTULO 6

GESTÃO DE SUPRIMENTOS COM APLICAÇÃO DE CUSTO IDEAL

Bruno Medeiros Souza da Silva

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
brunomedeiros@souunisuam.com.br

Jessica Vieira Silva Manhães

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
jessicamanhaes@souunisuam.com.br

Rachel Cristina Santos Pires

Mestre em Desenvolvimento Local, Engenheira Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
rachelpireseng@gmail.com

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

Igor Charles Siqueira Leite

Doutor em Engenharia Civil
Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, unidade Bonsucesso
Igor.leite@unisuam.edu.br

RESUMO

Um projeto de sucesso na construção civil é alicerçado em um bom planejamento e o setor de suprimentos vem se consolidando como um setor essencial para qualquer estudo de viabilidade de obra, comparando os preços das planilhas orçamentárias com os preços praticados no mercado. O setor é estratégico, contribuindo para a obtenção de novas obras, o aumento da margem de lucro e a redução de prejuízos, ao utilizar um banco de dados alimentado por obras já existentes. Esses dados reais de preços conferem assertividade ao estudo orçamentário e é crucial para a formulação de um BDI competitivo em licitações, levando em conta fatores como região, crédito e qualidade. O processo de suprimentos utiliza os estudos de orçamentos feitos na época da licitação, com dados aprofundados de aplicação de duas Curvas ABC para análise de prioridades: uma para serviços e outra para produtos, onde se concentra a atenção nos 80% dos itens de maior valor total, desprezando os 20% menos relevantes. Esta filtragem permite focar a cotação e a negociação com o mercado e novos fornecedores. A negociação

é otimizada pela elaboração de um cronograma que "sinaliza" ao mercado o que, quanto e quando será comprado, o que estimula a concorrência e o planejamento dos fornecedores, aumentando o poder de barganha da construtora. Finalmente, após a assinatura do contrato, o setor trabalhará com o conceito de um "custo ideal" estabelecido como balizador de custo máximo, garantindo a lucratividade da obra.

Palavras-chave: Suprimentos; BDI; Viabilidade de obra; Custo ideal; Construção civil.

INTRODUÇÃO

Todo projeto bem sucedido começa com um bom planejamento. No setor de suprimentos de uma obra civil esse processo de planejamento se inicia no estudo de viabilidade da obra, onde há a análise dos preços da planilha orçamentária em comparação com os preços praticados de mercado. Nesse artigo, vamos trazer o conceito de suprimentos inserindo o setor como parte importante de uma construtora, seja para a obtenção de novas obras, melhorar a margem de lucro ou diminuir a margem de prejuízo dos serviços de engenharia.

O setor de suprimentos, já atuante em outras obras, fomenta um banco de dados de preço de produtos e serviços para esse estudo de viabilidade de obra. Logo, é perceptível o ciclo que se forma, onde as obras já existentes, fornecem dados de preço e produtividade para possíveis obras novas. E justamente esse banco de dados de preço alinhados aos coeficientes de produtividades se tornam peças chave para a formulação de um BDI (Budgetary Differential Index) competitivo para o processo de licitação.

A importância do setor de suprimentos para a obtenção de novos projetos é justamente a assertividade que se ganha quando o seu estudo orçamentário é baseado em preços e produtividades já praticadas pela corporação. São dados reais. Exequíveis. Levando em consideração região, limite de crédito por empresa, tipo de faturamento, prazos de entrega e qualidade de produtos e serviços.

Quando há um bom planejamento de obra, o processo de suprimentos inicia-se na análise da planilha orçamentária de um novo projeto. Conforme o Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas (2019), define-se orçamento como uma avaliação do custo total da obra possuindo como base os preços dos insumos ou dos valores de referência e levantamentos de materiais e serviços por meio dos elementos pertencentes nos projetos, memoriais e especificações. E essa atividade, envolve uma estimativa de custos em que o construtor irá atribuir o seu preço de venda –de maneira bem estabelecida (Mattos, 2006). Iniciamos a verificação de preço nos itens mais relevantes da planilha. Dentre as ferramentas de análise de orçamentos, a Curva ABC apresenta um grande destaque, fornecendo um relatório na forma decrescente de custo, podendo ser de dois tipos: de insumos e de serviços

(Mattos, 2006). Costuma-se traçar uma linha de corte entorno de 80% do valor total do projeto. Ou seja 20% dos serviços/materiais não são analisados, por uma questão de tempo e de prioridades. São itens irrelevantes que não devem demandar atenção. Os serviços/materiais que se encontram acima da linha de corte de 80%, são analisados e cotados no mercado. Importante a verificação, por parte da engenharia, a terceirização do serviço em detrimento da execução do serviço com mão de obra própria. No que tange a questão dos produtos, vale ressaltar que cada serviço tem a sua composição de itens que pode, ou não, conter: mão de obra, materiais, pequenos equipamentos e grandes equipamentos. Cada serviço tem sua composição aberta e é feito um somatório das quantidades por item. Assim organizamos a planilha da mesma forma que organizamos os serviços, do item com valor total mais caro para o item de valor total mais barato, tracejando uma linha de corte em 80%, desprezando os 20% que ficaram abaixo da linha de corte.

Dessa forma é possível afunilar em quais segmentos de mercado precisamos procurar por novos fornecedores e aprovar novas ou aumentar linhas de crédito já existentes. É necessária a execução de um cronograma executivo de obra para que os prazos e preços sejam negociados de tal maneira que se consiga melhorar os preços do orçamento feito. E é possível essa melhoria pois é feita uma espécie de sinalização ao mercado com a informação de qual produto vamos comprar, a sua quantidade e quando vamos comprar. O mercado recebe essa informação e naturalmente se planeja, negocia e cria estoque. Isso aumenta o poder da corporação de negociar, visto que por consequência, mais de uma empresa cria condições de atendimento, tanto em preço, como em qualidade e em prazo de entrega. Ainda, como respaldo, Segundo Neto (2022, p. 5), a administração da cadeia de suprimentos integra o gerenciamento da oferta e da demanda dentro e entre as empresas.

Com o contrato assinado, todo serviço que será contratado e/ou material que será comprado deve ter um “preço ideal” como um balizador de teto máximo de custo que um serviço ou material deve ter para que aquele contrato tenha lucro.

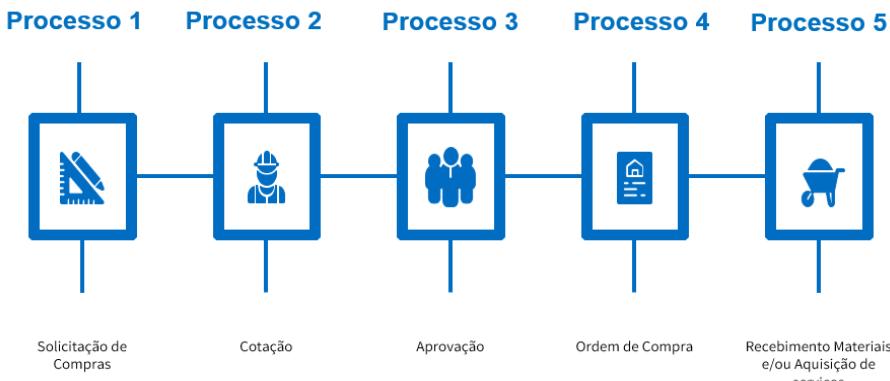
METODOLOGIA

Após essa análise de curva ABC de serviços e produtos alinhado ao cronograma executivo da obra e da busca de orçamentos no mercado, é de suma importância a implantação de um procedimento executivo de suprimentos na obra. Um documento que vai gerir o passo a passo do setor, desde a sua requisição até a geração de uma Ordem de serviço/compra.

Bowersox et al. (2014, p.7) afirmam que o processo integrado de criação de valor deve ser alinhado e administrado desde a compra de matéria prima até a entrega do produto/serviço ao cliente final para garantir eficácia, eficiência, relevância e sustentabilidade.

O processo estruturado de compras se apresenta da seguinte forma:

Figura 01: Processo estruturado de suprimentos



Fonte: Autor, 2025

O processo estruturado e unificado de compras permite que o setor de suprimentos realize compras e feche serviços nos menores preços do mercado, seguindo padrões de qualidade e segurança, e atendendo aos prazos de entrega requeridos. O primordial para que isso ocorra é o planejamento.

A Solicitação de Compras de determinado produto/serviço é o que dá início ao processo estruturado de compras, dando origem a uma cotação e uma Ordem de Compra.

Seguindo um cronograma executivo de obra, a produção irá identificar quais os materiais/serviços deverão ser requisitados, criando assim um Plano de compras.

O que é um Plano de compras?

- Identificar qual material/serviço será necessário para cumprir o cronograma executivo da obra dentro de um prazo estabelecido;
- Material precisa estar especificado: por cor, tipo, qualidade, marca (caso seja comprovado que a mesma é de relevância para a entrega devida do serviço), especificação de segurança e dimensões;
- Quantidades definidas;
- Unidade de medidas condizentes com o praticado comercialmente;
- Se for um serviço é necessário um escopo do que será executado em anexo, bem como projetos, fotos do local e croquis;
- Prazo para recebimento do material ou execução do serviço precisa estar definido.

A gestão da cadeia de suprimentos busca a otimização de todo o processo logístico, conforme se observa:

A gestão da demanda é um tema emergente no campo de conhecimento da gestão da cadeira de suprimentos. O que se busca com a gestão da demanda é a rápida e adequada integração das necessidades originadas do mercado na direção dos fornecedores, de modo a balancear e alinhar estratégicamente a demanda com a capacidade operacional ao longo da cadeia de suprimentos. O alinhamento da demanda na cadeia de suprimentos enfrenta dificuldades progressivas tais como a falta de precisão nas informações, entre outras, provocando ineficiência no atendimento a clientes, redução do giro de estoque e alto índice de obsolescência agravada pela grande diversidade de produtos. Melo e Alcântara (2011, p. 817).

Na etapa inicial o engenheiro, encarregado, ou técnico, identifica à necessidade de compras de um determinado produto ou serviço para a obra. Depois, o corpo de técnicos juntos ao responsável pela requisição elabora uma planilha em Excel, descrevendo cada item ou serviço pretendido. Todo o processo de requisição também pode ser feito via sistema corporativo.

Após essa etapa inicial, é realizada por e-mail e/ou via sistema, uma solicitação de compras. É imprescindível que a solicitação seja agrupada conforme sua classificação por família. Dessa forma o processo ganha celeridade. O processo estruturado de compras se apresenta da seguinte forma:

Tabela 1: Solicitação de material

REQUISIÇÃO DE MATERIAL						
Obra:	OBRA 1			Centro de custo:	XXXX	DATA: XX/XX/XXXX
Aplicação:	EXECUÇÃO DE CANTEIRO DE OBRAS			Movimento:	XXXXXX	
Requisitante:	ENGENHEIRO DA FRENTE			Previsão de Utilização: XX/XX/XXXX		
ITEM	IDENTIFICADOR	CÓD. DO PRODUTO	DESCRIÇÃO DO PRODUTO	UND	QUANT	PREÇO DE REFERÊNCIA
1	XXXXXX	XXXXX	AREIA	M3	100,00	
2	XXXXXX	XXXXX	BRITA 1	TON	250,00	Preço de venda x Fator X
3	XXXXXX	XXXXX	PÓ DE PEDRA	TON	120,00	
O.C.: _____						
Prazo: _____ Nota Fiscal: _____						
Empresa: _____ Entregar em: _____						
OBSERVAÇÕES:						

Fonte: Autor, 2025

O custo de referência/ideal deve ser preenchido de forma que o setor de suprimentos saiba o teto máximo que pode chegar no custo desse material e/ou serviço.

Esse preço de referência ou custo ideal de compra nada mais é do que o preço de venda de cada material e serviço aplicado um fator X de ajuste cuja a composição se dá a partir da consolidação do BDI, ainda na fase de orçamento da obra. Para o Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas –IBRAOP (2019), custo associado a obras é tudo aquilo que onera o construtor, representando a soma dos insumos necessários à realização de um serviço.

Tabela 2: Cálculo do fator de ajuste X

OBRA XXXXX	
ITENS	%
IMPOSTOS (ISS/PIS/COFINS)	6,65%
ADMINISTRAÇÃO CENTRAL	4,00%
REDUÇÃO CONTRATUAL (DESCONTO)	2,21%
COMPRA C/NF (5 + 20% NF)	3,00%
INSS DESCONTO FATURA	3,50%
CSLL	1,00%
IRPJ	4,20%
LUCRO	10,00%
TOTAL	34,56%
VALOR A SER MEDIDO = DESPESA / (1- TOTAL EM DECIMAL)	0,6544

Fonte: Autor, 2025

Podemos ver no quadro abaixo que o fator de ajuste é aplicado da seguinte forma: Preço de venda x Fator de Ajuste, obtendo assim o custo de ideal de compra do produto.

Tabela 3: Demonstrativo do Fator de Ajuste

Material	Preço de Venda	Fator de Ajuste	Custo Ideal de Compra
Areia	R\$ 160,00 / m ³	0,6544	R\$ 104,70 / m ³
Brita 1	R\$ 110,00 / t	0,6544	R\$ 71,98 / t
Pó de Pedra	R\$ 90,00 / t	0,6544	R\$ 58,90 / t

Fonte: Autor, 2025

Dessa forma ao equalizar as propostas no ato da cotação, o setor de suprimentos consegue, tendo por base um valor de custo ideal máximo, viabilizar a compra do material ou fechamento de um serviço pelo melhor valor, qualidade e prazo de entrega possíveis.

A equalização do mapa de cotação é o processo de tornar as propostas de diferentes fornecedores comparáveis em bases iguais. É uma

etapa fundamental na área de Compras e Suprimentos para garantir que a decisão de compra seja feita com base em critérios objetivos e em um escopo idêntico. Como os fornecedores podem cotar com escopos, termos e condições diferentes, a equalização elimina essas disparidades.

Tabela 4: Mapa de cotação

OBRA XXXXX				CUSTO IDEAL		FORNECEDOR 1		FORNECEDOR 2		FORNECEDOR 3		MENOR PREÇO			
						Contato: XXX	Contato: XXX	Contato: XXX	Contato: XXX	Telefone: XX XXXXX-XXXX	Telefone: XX XXXXX-XXXX	Telefone: XX XXXXX-XXXX			
Item	Código	Descrição	Quant.	Unid.	Unit.	Valor	Unit.	Valor	Unit.	Valor	Unit.	Valor	Unit.	Valor	Empresa
1	XXXXXX	AREIA	100	M3	R\$ 104,70	R\$ 10.470,40	R\$ 100,00	R\$ 10.000,00	R\$ 120,00	R\$ 12.000,00	R\$ 104,70	R\$ 10.470,40	R\$ 100,00	R\$ 10.000,00	FORNECEDOR 1
2	XXXXXX	Brita 1	250	T	R\$ 71,99	R\$ 17.995,00	R\$ 70,00	R\$ 17.500,00	R\$ 80,00	R\$ 20.000,00	R\$ 71,99	R\$ 17.995,00	R\$ 70,00	R\$ 17.500,00	FORNECEDOR 1
3	XXXXXX	PO DE PEDRA	120	T	R\$ 58,90	R\$ 7.057,52	R\$ 58,00	R\$ 6.960,00	R\$ 62,00	R\$ 7.440,00	R\$ 58,90	R\$ 7.057,52	R\$ 58,00	R\$ 6.960,00	FORNECEDOR 1
				Total:	R\$ 35.533,92	Total:	R\$ 34.60,00	Total:	R\$ 39.440,00	Total:	R\$ 35.533,92	Total:	R\$ 34.460,00		
DATA DA ÚLTIMA ATUALIZAÇÃO: XX/XX/XXXX				Total p/ compra:	R\$ 34.460,00	Total p/ compra:	R\$ -	Total p/ compra:	R\$ -						
				FORMA DE PAGAMENTO:	XXXX	FORMA DE PAGAMENTO:	XXXX	FORMA DE PAGAMENTO:	XXXX	FORMA DE PAGAMENTO:	XXXX	FORMA DE PAGAMENTO:	XXXX		
				PERÍODO DE ENTREGA:	XX DIAS	PERÍODO DE ENTREGA:	XX DIAS	PERÍODO DE ENTREGA:	XX DIAS	PERÍODO DE ENTREGA:	XX DIAS	PERÍODO DE ENTREGA:	XX DIAS		
				F/CO:	1,03	F/CO:	0,90	F/CO:	1,00						

Fonte: Autor, 2025

A equalização do mapa com o custo ideal como valor máximo para compra indica qual dos fornecedores é a melhor opção de compra em relação a valores. Após todos os ajustes, o seu mapa de cotação terá uma linha de menor preço entre todas as propostas enviadas.

- Identifique a proposta mais vantajosa: com os valores corrigidos e o escopo padronizado, agora você tem a visão real de qual proposta oferece o melhor custo-benefício (não apenas o menor preço).
- Transparência: a equalização garante que o processo de escolha seja transparente e isonômico todos os fornecedores.
- Pergunta respondida com sucesso

A aprovação da compra pela gerência da obra (ou pelo gestor/engenheiro responsável) após a análise e equalização do mapa de cotação é uma etapa crítica e indispensável por vários motivos que unem a gestão técnica, financeira e de planejamento do projeto.

O setor de compras (ou suprimentos) se concentra na negociação de preço e termos, mas a Gerência da Obra é a responsável final pela qualidade e aplicação dos materiais.

- Validação Técnica: A gerência confirma se o material/serviço cotado, mesmo após a equalização de preço, atende perfeitamente às especificações técnicas e normas do projeto (NBRs). Um preço baixo não é vantajoso se o produto comprometer a segurança ou a durabilidade da construção.
- Compatibilidade com a Execução: O gestor da obra está no canteiro e sabe se o item cotado é o mais adequado para a equipe de execução, os equipamentos disponíveis e o método construtivo adotado. Ele evita, por exemplo, a compra de um material que exigirá uma mão de obra especializada e cara ou que gere atrasos.

A gerência da obra é a guardiã do orçamento do projeto, por isso que a informação de custo ideal, além de ser uma ferramenta de negociação, é

uma facilidade visual para o gestor. Sua aprovação garante que a compra esteja dentro do planejamento de custos.

- Aderência ao Orçamento: O mapa de cotação equalizado mostra o melhor custo-benefício, mas a gerência deve confirmar que o valor total da compra não estoure a previsão orçamentária daquele item ou etapa da obra.
- Previsibilidade do Fluxo de Caixa: A aprovação formal autoriza o desembolso e integra a compra ao planejamento financeiro da obra, garantindo que o dinheiro esteja disponível na data de pagamento acordada, evitando problemas com o fornecedor e multas.

Um erro de prazo ou logística de entrega pode paralisar toda a obra, gerando prejuízos significativos.

- Confirmação de Prazo de Entrega: O gestor da obra verifica se o prazo de entrega do fornecedor escolhido está alinhado com o cronograma físico da construção. Compras antecipadas demais podem gerar custos de armazenagem; compras atrasadas causam a inatividade da mão de obra.
- Condições de Logística: O gerente avalia as condições de entrega (FOB ou CIF) e se a logística do fornecedor é confiável para o canteiro de obras (acesso, descarregamento, etc.), garantindo que o material chegue no momento certo e no local correto.

A aprovação final estabelece uma trilha de auditoria e define a responsabilidade sobre a decisão de compra.

- Formalização do Processo: A aprovação do mapa de cotação pela gerência formaliza a decisão, garantindo a transparência do processo de compras e a rastreabilidade da escolha, o que é vital para fins de auditoria e compliance interno.
- Responsabilidade Compartilhada: Ao aprovar o documento, a gerência da obra assume a responsabilidade pela escolha técnica e pelo impacto da compra no andamento do projeto. Isso garante que a decisão não seja baseada apenas no fator preço, mas sim no melhor custo-benefício estratégico para a obra como um todo.

Após aprovação uma Ordem de compras ou de serviços é gerada e enviada para o fornecedor vencedor da cotação e para todos os envolvidos da obra, desde almoxarifado que é o profissional responsável pelo recebimento e conferencia do material, até a gerencia da obra, para que assim todos tenham acesso aos itens, valores, quantidades, preços unitários, forma de pagamento, dados de faturamento e prazo de entrega envolvidos para aquela ordem.

DESENVOLVIMENTO

Estudo de Caso

Para exemplificar a aplicação prática do fator de ajuste na gestão de suprimentos, foi selecionado um projeto residencial unifamiliar conforme apresentada na figura 02. O estudo concentra-se exclusivamente nos

revestimentos de piso cerâmico e azulejos de parede, materiais de grande representatividade no orçamento de acabamento de uma obra civil.

O objetivo é demonstrar como o setor de suprimentos, atuando de forma estratégica, pode determinar o preço ideal de compra (custo máximo admissível) a partir do preço de venda de referência (PV) previsto no orçamento, garantindo margem de lucro conforme o fator de ajuste (FA) previamente definido na etapa orçamentária.

Figura 2: Planta Baixa Unifamiliar Residencial



Fonte: De autoria própria

Desenvolvimento Aplicado

Coleta de Dados do Projeto:

As áreas de piso e parede foram extraídas diretamente da planta arquitetônica, considerando altura de parede de 2,90 m para os ambientes úmidos (cozinha, banheiros e área de serviço).

Classificação dos Revestimentos:

- Revestimentos de Piso: Sala, Cozinha, Varanda, Suíte, Quarto, Escritório, Banheiros, Área de Serviço e Espaço Gourmet.
 - Revestimentos de Parede (Azulejos): Cozinha, Banheiro Social, Banheiro da Suíte e Área de Serviço.

Premissas de Preço:

PV Piso R\$ 135,00/m²; PV Azulejo R\$ 125,00/m²; Fator de Ajuste (FA) = 0,6544.

Fórmula Utilizada:

Formula Utilizada

$$PV \text{ Piso} \times 0,6544 \rightarrow R\$135,00 \times 0,6544 = R\$ 88,34$$

$$PV \text{ Azulejo} \times 0,6544 \rightarrow R\$125,00 \times 0,6544 = R\$ 81,80$$

Cálculo das Áreas:

Na tabela abaixo, as áreas de piso foram obtidas diretamente da planta; as de parede pela multiplicação do perímetro de cada cômodo úmido pela altura de 2,90 m.

Tabela 5: Levantamento dos materiais em m²

Ambientes	Área Piso (m ²)	Área Azulejo (m ²)	PV Piso (R\$)	PV Azulejo (R\$)	Cmáx Piso (R\$)	Cmáx Azulejo (R\$)
Sala	20,55	0,00	2.774,25	0,00	1.815,46	0,00
Cozinha	10,50	30,45	1.417,50	3.806,25	927,61	2.490,81
Varanda	4,70	0,00	634,50	0,00	415,22	0,00
Suíte	10,20	0,00	1.377,00	0,00	901,11	0,00
Quarto	9,11	0,00	1.229,85	0,00	804,81	0,00
Escritório	5,41	0,00	730,35	0,00	477,94	0,00
Banheiro Suíte	3,08	21,28	415,80	3.350,10	272,10	2.192,31
Banheiro Social	2,11	20,59	284,85	2.573,75	186,41	1.684,26
Área de Serviço	4,72	23,90	637,20	2.987,00	416,98	1.954,69
Espaço Gourmet	9,86	0,00	1.331,10	0,00	871,07	0,00
TOTAL	80,24	101,74	10.832,40	12.717,50	7.088,71	8.322,07

Fonte: De autoria própria

A análise dos resultados permite observar que o custo máximo admissível (Cmáx) obtido para o piso foi de R\$ 88,34/m² e para o azulejo R\$ 81,80/m². Com esses valores, o setor de suprimentos pode equalizar as cotações, garantindo que o custo final não ultrapasse o limite estabelecido e mantendo a margem de lucro do contrato.

Impacto da Não Aplicação do Fator de Ajuste

Para compreender a relevância da aplicação do Fator de Ajuste (FA) na gestão de suprimentos, elaborou-se uma simulação utilizando o mesmo estudo de caso de revestimentos.

Considerou-se o cenário sem aplicação do FA, ou seja, as compras foram realizadas pelo valor integral do preço de venda (PV), sem o redutor de margem previsto em orçamento.

a) Parâmetros de Referência

- Preço de Venda (PV) Piso: R\$ 135,00/m²
- Preço de Venda (PV) Azulejo: R\$ 125,00/m²
- Fator de Ajuste (FA): 0,6544
- Custo Máximo com FA (Cmáx):
 - Piso: R\$ 88,34/m²
 - Azulejo: R\$ 81,80/m²

b) A tabela abaixo exibe a simulação do Custo sem Aplicação do Fator.

Tabela 6: Simulação de custo

Descrição	Piso (m ²)	Azulejo (m ²)	PV Piso (R\$/m ²)	PV Azulejo (R\$/m ²)	Custo Total sem FA (R\$)
Áreas Totais	80,24	101,74	135,00	125,00	23.549,90
Áreas Totais com FA	80,24	101,74	88,34	81,80	15.410,78

Fonte: De autoria própria

Diferença de custo total: R\$ 23.549,90 – R\$ 15.410,78 = R\$ 8.139,12

→ O não uso do fator de ajuste eleva o custo de aquisição em **52,8%** sobre o valor orçado.

Abaixo, na seguinte tabela, temos um exemplo prático de comparação (Revestimento de Piso).

Tabela 7: Comparativo de preços

Fornecedor	Material (R\$/m ²)	Mão de Obra (R\$/m ²)	Total (R\$/m ²)	Situação com FA	Situação sem FA
A	60,00	25,00	85,00	Dentro do limite	Aceitável
B	70,00	30,00	100,00	Acima do limite	Aceitável
C	80,00	35,00	115,00	Acima do limite	Acima do PV

Fonte: De autoria própria

No cenário sem FA, o fornecedor B, que anteriormente excedia o limite orçado, torna-se elegível, embora a margem de lucro seja reduzida.

Isso evidencia que, sem o fator de ajuste, o controle financeiro e a previsibilidade de rentabilidade são perdidos, podendo gerar desequilíbrio contratual.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo propôs uma análise aprofundada sobre o papel estratégico do setor de suprimentos na construção civil, estabelecendo-o

como um elemento chave para a viabilidade econômica e a competitividade de novos projetos. A pesquisa focou em demonstrar como um processo estruturado de compras, alicerçado em dados históricos e no rigor orçamentário, não apenas otimiza custos, mas garante a rentabilidade previamente planejada. A hipótese central de que a gestão de suprimentos, ao utilizar um processo estruturado e um balizador de custo máximo, é crucial para o sucesso da obra foi amplamente confirmada. O estudo alcançou seus objetivos ao validar a Curva ABC dupla (serviços e produtos) onde demonstra-se que a priorização de 80% dos itens de maior valor é uma estratégia eficaz para otimizar o tempo de cotação e negociação, direcionando o foco do setor. Também confirma a importância do planejamento evidenciando que o compartilhamento do cronograma executivo com o mercado atua como um poderoso instrumento de negociação, estimulando a concorrência e o poder de barganha da construtora. Além de estabelecer e aplicar o conceito de Custo Ideal: Através da formulação do Fator de Ajuste (FA), o estudo forneceu um método prático e matematicamente fundamentado para determinar o custo máximo admissível para a compra de insumos e serviços, em alinhamento com a composição do BDI (Budgetary Differential Index) estabelecida na licitação.

A principal descoberta, detalhada no estudo de caso, reside no impacto financeiro direto da aplicação do Fator de Ajuste. A simulação com os revestimentos indicou que a não utilização desse balizador pode elevar o custo de aquisição em mais de 50% em relação ao valor orçado com margem, resultando na perda de previsibilidade da rentabilidade e, em última instância, no desequilíbrio contratual. O Custo Ideal, portanto, transcende sua função de teto de preço, atuando como um guardião da margem de lucro do contrato.

Este trabalho oferece uma contribuição metodológica significativa ao setor da construção civil, formalizando a gestão de suprimentos como uma disciplina que se inicia na fase de orçamento, e não apenas na execução. A metodologia proposta – que integra banco de dados de preços reais, análise de Curvas ABC, sinalização de demanda ao mercado e a aplicação rigorosa do Custo Ideal – estabelece um procedimento executivo unificado que promove transparência, isonomia e, fundamentalmente, eficiência na alocação de recursos.

A necessidade de aprovação da compra pela gerência da obra, baseada no mapa de cotação equalizado e no Custo Ideal, reforça a interdependência entre a área de Suprimentos, a Engenharia e a Gestão Financeira, assegurando que a decisão de compra se baseie no melhor custo-benefício estratégico, e não apenas no menor preço.

CONCLUSÃO

A análise realizada confirma que a implantação de processos estruturados de gestão de suprimentos, pautados pelo uso criterioso de bancos de dados históricos, dupla Curva ABC e cronograma executivo, eleva substancialmente a eficiência operacional das construtoras e maximiza o

potencial de competitividade e lucratividade. A aplicação do conceito de custo ideal, com base no Fator de Ajuste, revelou-se decisiva não apenas para o controle de margens, mas para garantir previsibilidade financeira e mitigação de riscos orçamentários. O estudo de caso destacou redução direta superior a 50% nas despesas com materiais e serviços mediante adoção do procedimento de equalização, reforçando a relevância do método para assegurar rigor técnico e conformidade contratual.

A análise crítica indica que a sinalização de demanda ao mercado amplia o escopo do poder de negociação da construtora, promovendo concorrência saudável entre fornecedores, otimização das condições comerciais e adequação às normas técnicas, logísticas e financeiras da obra. O compartilhamento transparente do cronograma executivo catalisa melhorias nas cotações, favorece previsibilidade de fluxos de caixa e minimiza riscos operacionais, consolidando o papel do gestor de suprimentos como agente central para a sustentabilidade de projetos.

Destaque-se, ainda, a relevância da validação e aprovação das compras pela gerência de obra, fundada no mapa de cotação equalizado e na análise do custo ideal, como estratégia de governança e garantia da qualidade técnica e financeira das decisões. Recomenda-se a institucionalização dos métodos descritos para promover transparência, equidade e eficiência no setor, integrando suprimentos, engenharia e gestão financeira. Estudos futuros podem abordar interfaces avançadas entre sistemas digitais de compras, inteligência artificial para previsão de demandas e métricas de performance em ciclos longos de obras, ampliando as possibilidades de inovação e consolidação do conceito de custo ideal como vértice estratégico na cadeia produtiva da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOWERSOX, Donald J. et al. **Gestão Logística da Cadeia de Suprimentos**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.
- NETO, Fernando Gorni. **Gestão de Suprimentos e Logística**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos editora, 2022.
- PIRES, S. R. I. **Gestão da cadeia de suprimentos: conceitos, estratégias, práticas e casos**. São Paulo: Atlas, 2009.
- TROQUE, W. A. **Influência das Práticas da Gestão da Cadeia de Suprimentos sobre a Gestão da Demanda: um Modelo de Análise Conceitual**. Santa Bárbara D'Oeste. 2003. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, 2003.

MELO, Daniela de Castro; ALCÂNTARA, Rosane Lúcia Chicarelli. **A gestão da demanda em cadeias de suprimentos: uma abordagem além da previsão de vendas.** Gestão & Produção, São Carlos, v. 18, n. 4, p. 809-824, 2011.

SIMCHI-LEVI, David; KAMINSKY, Philip; SIMCHI-LEVI, Edith. **Cadeia de Suprimentos Projeto e Gestão: Conceitos, Estratégias e Estudos de Caso.** 3. ed. EUA: Bookman, 2010.

Andrade, J. C. (2018). **A aplicabilidade da curva ABC na gestão de obras.** Revista Especialize On-line IPOG. 1(16), 1-19. <https://ipog.edu.br/wp-content/uploads/2020/11/jessica-candeia-de-andrade-671074.pdf>

Tribunal de Contas da União. (2014.). **Orientações para Elaboração de Planilhas Orçamentárias de Obras Públicas** | Portal TCU. Portal.tcu.gov.br. Consultado em 05 nov. 2025. <https://portal.tcu.gov.br/orientacoes-para-elaboracao-de-planilhas-orcamentarias-de-obras-publicas.htm>

ROCHA, Poliana Lima et al. **Aplicação da curva ABC para análise de orçamento de obra: estudo de caso em um condomínio residencial.** Research, Society and Development, [S. I.], v. 11, n. 15, e498111537465, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/37465/31228>. Acesso em: 5 nov. 2025.

Mattos, A. D. (2006). **Como Preparar Orçamentos de Obras.** Pini

Instituto Brasileiro de Auditoria De Obras Públicas. (2019). **Manual de Auditoria de Obras Públicas e Serviços de Engenharia.** Disponível em: <https://www.ibraop.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Manual-de-Aud-de-Obras-e-Serv-de-Eng.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2025.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO MECÂNICO E CICLO DE VIDA ENTRE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO DE CINZA VOLANTE E CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Vitor Fonseca Costa

Graduando em Engenharia de Materiais pela UFRRJ
vitorfcgenico@gmail.com

Rafael Dors Sakata

DACOC-CT/UTFPR
rafaelSakata@gmail.com

Douglas Queiroz Francisco

Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFRRJ
douglasfrancisco@fccsa.com.br

Alisson Passos Lopes

Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFRRJ
passosalisson@ufrj.br

Danieli Martins do Carmo

DEQ/IT/UFRRJ
danielimcarmo@hotmail.com

Antonieta Middea

CETEM/UFRJ
amiddea@cetem.gov.br

Everton Rangel Bispo

UNISUAM
prof.evertonrangel@gmail.com

Renata Nunes Oliveira

DEQ/IT/UFRRJ
renatanunes.ufrrj@gmail.com

Antonio Renato Bigansolli

DEQ/IT/UFRRJ
bigansolli@ufrj.br

RESUMO

Este trabalho analisa, a partir de revisão narrativa da literatura técnica e de estudos de avaliação do ciclo de vida, se concretos geopoliméricos de cinza volante podem de fato constituir alternativa ambientalmente mais eficiente ao concreto de cimento Portland convencional em aplicações estruturais

correntes. O objetivo geral é confrontar desempenho mecânico, durabilidade, comportamento em altas temperaturas e indicadores ambientais de ambos os sistemas, organizando evidências experimentais e de ACV em um quadro comparativo único. Foram examinados artigos e dissertações que reportam resistências à compressão, módulo de elasticidade, resultados de ensaios de fogo, caracterização microestrutural e inventários de emissões por metro cúbico de concreto, com especial atenção às escolhas de precursores, ativadores e fronteiras de sistema. A síntese mostra que concretos geopoliméricos de cinza volante alcançam, em larga faixa de formulações, resistências e rigidez compatíveis com concretos estruturais usuais, desempenho térmico igual ou superior e reduções típicas de 20 % a 60 % nas emissões de CO₂, embora possam apresentar maior sensibilidade a condições de cura e ao impacto climático dos ativadores alcalinos. Conclui-se que esses sistemas constituem rota promissora de descarbonização parcial da construção civil, mas sua adoção em larga escala depende de normalização específica, segurança na cadeia de suprimentos de resíduos e integração com diretrizes brasileiras de ACV.

Palavras-chave: Concreto Geopolimérico; Cinza Volante; Avaliação Do Ciclo De Vida; Emissões De CO₂; Desempenho Mecânico.

INTRODUÇÃO

O concreto armado consolidou-se como material estrutural dominante na engenharia por combinar resistência à compressão, boa trabalhabilidade no estado fresco e compatibilidade mecânica com o aço, permitindo seu emprego em ampla variedade de tipologias estruturais (Mehta; Monteiro, 2008; Andolfato, 2002). No contexto brasileiro, documentos técnicos indicam que o concreto de cimento Portland é o principal meio de materialização de edifícios, pontes, reservatórios, fundações e infraestrutura urbana, resultado do acoplamento entre cadeia produtiva do cimento, disponibilidade de agregados e arcabouço normativo, que estabiliza o uso desse sistema como padrão de projeto e execução (ABCP, 2002; SNIC, 2018; Van Oss; Padovani, 2003).

Séries históricas de produção e consumo de cimento mostram forte crescimento ao longo das últimas décadas, sobretudo em economias em desenvolvimento, mantendo patamares absolutos de produção elevados mesmo em mercados considerados maduros (Schneider *et al.*, 2011). No Brasil, a demanda por cimento acompanha ciclos de investimento em habitação e infraestrutura, com a implantação de plantas de clínquer articulada a reservas calcárias, logística e disponibilidade energética (Lima, 2011). Essa dependência estrutural do cimento Portland implica que mudanças na natureza do ligante têm efeitos diretos sobre a organização da cadeia da construção civil, reforçando a necessidade de discutir alternativas em termos técnicos, econômicos e ambientais.

Do ponto de vista ambiental, a produção de clínquer Portland é reconhecida como atividade intensiva em emissões de dióxido de carbono, em função da decomposição térmica do carbonato de cálcio e da queima de combustíveis em fornos de alta temperatura (Habert *et al.*, 2010; Benhelal *et al.*, 2013). Mesmo com ganhos de eficiência energética e substituição parcial de clínquer por adições minerais, a rota calcário–clínquer–cimento mantém uma parcela de emissões de natureza processual que não pode ser eliminada apenas com a descarbonização da matriz energética (Mehta; Monteiro, 2008; Romano *et al.*, 2016). Estudos de avaliação de ciclo de vida apontam o cimento como principal responsável pela pegada de carbono do concreto, situando o setor cimenteiro entre os maiores emissores industriais em cenários de mitigação climática (Teh *et al.*, 2017; IPCC, 2013).

Nesse cenário, ganha relevância a discussão sobre ligantes ativados alcalinamente e concretos geopoliméricos, que rompem com a lógica química do cimento Portland ao substituir o clínquer por redes aluminosilicato obtidas a partir de resíduos ricos em sílica e alumina, como cinzas volantes e escórias (Davidovits, 1987; Provis; Van Deventer, 2009). Concretos geopoliméricos à base de cinza volante, quando bem formulados e curados, podem alcançar resistência e durabilidade semelhantes às do concreto Portland, além de reduzir significativamente o impacto ambiental e promover o aproveitamento de resíduos industriais.

Apesar dos avanços, os resultados da literatura ainda são fragmentados: os estudos compararam geopolímeros de cinza volante e concretos Portland usando faixas de resistência, condições de cura, formulações e metodologias de ACV distintas, muitas vezes pouco explícitas ou difíceis de comparar. O problema deixa de ser apenas constatar a existência de soluções promissoras e passa a exigir uma leitura sistemática do que esse conjunto de evidências realmente sustenta em termos de equivalência técnica e vantagem ambiental. Em termos estritos, a questão de pesquisa que orienta esta monografia pode ser formulada da seguinte maneira: em que medida o concreto geopolímérico à base de cinzas volantes, formulado com dados de desempenho mecânico e de avaliação de ciclo de vida disponíveis na literatura, pode ser considerado uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente mais favorável ao concreto de cimento Portland em aplicações estruturais?

A primeira dimensão da justificativa está ligada à centralidade do cimento e do concreto no debate sobre sustentabilidade na construção civil. Estudos de habitações com conceitos sustentáveis mostram que a escolha de materiais estruturais influência de forma significativa a pegada de carbono e o desempenho energético da edificação, evidenciando que o concreto de cimento Portland concentra parcela relevante das emissões ao longo do ciclo de vida (Abrantes, 2017; Abrantes *et al.*, 2016). Em ambientes severos, análises de desempenho ambiental, mecânico e microestrutural indicam que soluções consideradas sustentáveis só se justificam se mantiverem durabilidade e vida útil adequadas, sob pena de gerar necessidades

adicionais de manutenção e substituição que anulam parte dos ganhos ambientais (Bichinho, 2019). Testar o concreto geopolimérico de cinza volante diante desses critérios significa avaliá-lo com o mesmo rigor atribuído ao cimento Portland.

Há também uma justificativa metodológica, relacionada à avaliação de ciclo de vida como ferramenta capaz de transformar o debate em comparação quantificável entre sistemas de materiais, e não em mera retórica de sustentabilidade. Trabalhos que aplicam ACV à seleção de materiais mostram que indicadores ambientais podem alterar a hierarquia de soluções tecnicamente equivalentes (Figueiredo, 2017). No Brasil, porém, diagnósticos apontam que a prática de ACV ainda é dispersa e pouco institucionalizada, com heterogeneidade de escopos e pressupostos, o que limita sua influência sobre normas e decisões de projeto (Willers *et al.*, 2013; Menezes *et al.*, 2015). Ao organizar criticamente resultados de desempenho mecânico e ambiental de concretos geopoliméricos de cinza volante, este estudo contribui para preencher uma lacuna de dados comparativos sobre uma alternativa frequentemente apresentada como “verde”, mas nem sempre avaliada de forma robusta à luz de concepções mais exigentes de sustentabilidade (Edwards, 2009; Assi *et al.*, 2018).

Os objetivos da pesquisa ancoram-se no enquadramento metodológico da avaliação de ciclo de vida de produtos, conforme as normas ABNT NBR 14040 e ABNT NBR 14044, que orientam estudos comparativos entre sistemas de produto em termos de unidade funcional, limites de sistema e categorias de impacto (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b; Hauschild, 2005; Menoufi, 2011). O objetivo geral é analisar, com base em revisão bibliográfica de dados de desempenho mecânico e de avaliação de ciclo de vida, em que medida o concreto geopolimérico à base de cinzas volantes pode ser considerado uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente mais favorável ao concreto de cimento Portland em aplicações estruturais. Como objetivos específicos, busca-se: sistematizar resultados de resistência, módulo de elasticidade e durabilidade para concretos geopoliméricos de cinzas volantes e concretos Portland de referência; compilar e comparar fatores de emissão de dióxido de carbono e demais indicadores ambientais provenientes de estudos de ACV; examinar criticamente as hipóteses, limitações e variáveis de maior influência nesses resultados; e discutir o alcance e os limites da substituição do cimento Portland por ligantes geopoliméricos de cinzas volantes em aplicações estruturais compatíveis com os níveis de desempenho mapeados.

A monografia organiza-se em capítulos articulados. Após a introdução, o capítulo seguinte apresenta a fundamentação teórica sobre cimento Portland, cadeia produtiva, impactos ambientais e alternativas de mitigação, bem como os princípios dos ligantes ativados alcalinamente e dos concretos geopoliméricos de cinza volante, com foco em desempenho mecânico, durabilidade e resultados de avaliação de ciclo de vida. Em seguida, o capítulo de metodologia descreve os procedimentos de revisão

bibliográfica e seleção de estudos, explicitando critérios de inclusão, unidade funcional, limites de sistema e categorias de impacto. O capítulo de resultados e discussão sistematiza e compara dados técnicos e ambientais de concretos Portland e geopoliméricos. Por fim, o capítulo de considerações finais apresenta as principais conclusões, limitações e sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao emprego de concretos geopoliméricos de cinza volante na descarbonização da construção civil.

METODOLOGIA

Tipo e abordagem da pesquisa

Este trabalho adota a forma de revisão bibliográfica narrativa com foco temático, ancorada nos princípios de avaliação do ciclo de vida estabelecidos nas normas ABNT NBR 14040 e ABNT NBR 14044, aplicados ao universo dos materiais cimentícios e, em particular, aos concretos geopoliméricos de cinza volante (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b). A revisão não se limita à descrição de resultados dispersos, mas organiza o campo em eixos comparáveis, de modo a permitir uma leitura crítica do desempenho mecânico, da durabilidade e dos impactos ambientais de concretos geopoliméricos em relação ao concreto convencional de cimento Portland.

Seguindo a lógica metodológica usual em estudos de ACV, a revisão combina uma abordagem predominantemente qualitativa, voltada à análise de conceitos, escolhas de fronteira de sistema e categorias de impacto, com uma dimensão quantitativa secundária, restrita à sistematização de intervalos de resistência, composições típicas e ordens de grandeza de emissões de CO₂ relatadas nos artigos selecionados (Menoufi, 2011; Graedel, 1998).

Estratégia de busca e critérios de inclusão/exclusão

A seleção do material bibliográfico partiu de uma estratégia de busca estruturada em bases de dados internacionais de engenharia e ciências dos materiais, complementadas por repositórios nacionais e documentos normativos relacionados à ACV. As buscas foram realizadas em bases como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e periódicos de acesso aberto, utilizando combinações de descritores em inglês e português, tais como *geopolymer concrete*, *flyash*, *alkali-activated materials*, *lifecycle assessment*, *embodied energy*, *greenhousegas emissions* e suas equivalentes em língua portuguesa. A presença explícita de elementos de ACV, de propriedades mecânicas de concretos geopoliméricos ou de comparação direta com concreto Portland constituiu filtro básico para inclusão, à luz das recomendações de estruturação de estudos de ACV contidas nas normas da ABNT (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b).

Foram incluídos prioritariamente artigos em periódicos indexados, teses e dissertações em programas de engenharia civil e de materiais, além de relatórios técnicos relevantes quando estes apresentavam descrição clara da metodologia de ACV e dos inventários empregados, em conformidade com

o entendimento de que a qualidade de uma revisão em ACV depende da transparência na explicitação de fronteiras de sistema, unidade funcional e métodos de avaliação (Menoufi, 2011; Hauschild, 2005). Trabalhos que apenas mencionavam geopolímeros de forma tangencial, sem apresentar dados de desempenho ou de impactos ambientais utilizáveis, foram excluídos, assim como estudos que não descreviam minimamente os traços dos concretos ou a origem das matérias primas.

Análise e classificação em eixos temáticos

Uma vez definida a amostra final de artigos, a revisão foi conduzida com base em leitura analítica e extração de informações em planilhas, contemplando: tipo de ligante (geopolimérico ou Portland), precursores utilizados, sistema de ativação, traços adotados, propriedades mecânicas avaliadas, condições ambientais dos ensaios, métodos de ACV, fronteiras de sistema, unidade funcional, categorias de impacto e bases de dados empregadas. A classificação dos trabalhos em eixos temáticos não foi meramente descritiva, mas procurou evidenciar como diferentes agendas de pesquisa – mecânica, durabilidade, microestrutura e ACV – se articulam em torno do concreto geopolimérico de cinza volante e do concreto convencional (Figueiredo, 2017; Menezes; Carvalho; Freire, 2015).

Estruturação da comparação entre concretos geopoliméricos e concretos de cimento Portland

Para tornar a revisão comparável, a análise foi organizada em torno de um quadro de referência comum que integra composição química típica dos precursores, traços de concreto geopolimérico de cinza volante representativos na literatura, limites de sistema em ACV, categorias de impacto e cenários de transporte. Não se trata de definir um traço “ótimo” universal, mas de adotar valores de referência que permitam interpretar, de forma coerente, os resultados relatados por diferentes autores (Teh *et al.*, 2017; Borges *et al.*, 2014).

A caracterização das matérias primas centrais nos estudos de concreto geopolimérico – cinza volante, cenosferas e escória granulada de alto forno – foi sistematizada na Tabela 1, a partir de dados de composição de óxidos relatados em estudo de ACV de geopolímeros de cinza volante e cenosferas, complementados por resultados clássicos de ativação alcalina de cinzas (Tang; Pignatta; Sepasgozar, 2021; Palomo *et al.*, 1999). Os valores seguem a lógica usual da química de geopolímeros: alta concentração de sílica e alumina na cinza volante e nas cenosferas, e teor elevado de cálcio na escória, com reflexos diretos na formação de géis N A S H e C A S H e, por consequência, nas propriedades mecânicas e de durabilidade (Amran; Debbarma; Ozbakkaloglu, 2021).

Tabela 1 – Composição química típica de precursores para concretos geopoliméricos (% em massa)

Óxido	Cinza volante	Cenosferas	Escória granulada de alto forno (GGBFS)
SiO ₂	69,80	61,80	35,28
Al ₂ O ₃	19,78	30,30	14,69
Fe ₂ O ₃	2,68	2,16	0,50
K ₂ O	1,54	2,15	0,28
CaO	1,44	0,48	41,49
TiO ₂	0,79	1,00	1,25
Na ₂ O	0,55	0,35	0,24
MgO	0,47	0,87	5,76
P ₂ O ₅	0,20	0,07	–
SO ₃	–	0,04	1,01
BaO	–	0,03	0,10
Mn ₃ O ₄	–	–	0,42
Perda ao fogo (L.O.I.)	2,32	0,32	0,12

Fonte: adaptado de Tang; Pignatta; Sepasgozar (2021).

Com base nesses precursores, foram adotados como referência dois traços geopoliméricos de cinza volante amplamente discutidos na literatura (G FA e G C), nos quais a combinação de cinza volante, cenosferas e escória é ativada por solução de silicato de sódio, com relação areia ligante elevada e teor de água relativamente baixo, condizente com concretos de desempenho estrutural (Farhan; Sheikh; Hadi, 2019; Tang; Pignatta; Sepasgozar, 2021). A Tabela 2 resume as proporções típicas de componentes em relação ao ligante.

Tabela 2 – Traços de referência de concretos geopoliméricos (relação componente/ligante em massa)

Mistura G-FA	Cinza volante 0,40	Cenosferas –	GGBFS 0,60	Na ₂ SiO ₃ 0,24	Areia 2,00	Água 0,505
G-C	–	0,40	0,60	0,24	2,00	0,505

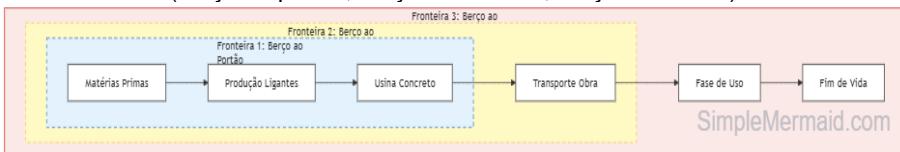
Fonte: adaptado de Tang; Pignatta; Sepasgozar (2021).

Esses traços são usados aqui como padrões de comparação qualitativa, isto é, servem de referência para situar os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade e durabilidade relatados por outros estudos que utilizam cinza volante e escória em proporções semelhantes, com diferentes condições de cura e relações ativador ligante (Diaz Loya; Allouche; Vaidya, 2011; Tahir *et al.*, 2022).

No plano da ACV, a comparação entre concretos geopoliméricos e concretos de cimento Portland é estruturada explicitando a unidade funcional e os limites de sistema adotados na maioria dos estudos: tipicamente 1 m³ de concreto com resistência à compressão equivalente aos 28 dias, com fronteiras de sistema do tipo berço ao portão, berço ao canteiro ou berço ao

túmulo, conforme a inclusão ou não das fases de uso e fim de vida (Habert et al., 2011; Shi et al., 2021). Esses limites são esquematizados na Figura 1, que sintetiza os blocos “produção de matérias primas”, “planta de concreto”, “transporte ao canteiro”, “fase de uso” e “destino final”, com as principais correntes de transporte associadas.

**Figura 1 – Limites de sistema típicos em ACV de concretos
(berço ao portão, berço ao canteiro, berço ao túmulo)**



Fonte: Elaborado pelo Autor

As categorias de impacto consideradas na análise seguem a combinação usual de métodos IPCC GWP100a para o potencial de aquecimento global e ReCiPe 2016 nas versões midpoint e endpoint, de modo a capturar tanto a contribuição para emissões de gases de efeito estufa quanto efeitos em saúde humana, ecossistemas e recursos (Teh et al., 2017; Tang; Pignatta; Sepasgozar, 2021). A Tabela 3 organiza as principais categorias que estruturam a leitura crítica dos estudos revisados.

Tabela 3– Métodos e categorias de impacto consideradas

Método	Categoria de impacto	Abreviação GWP	Unidade típica
IPCC 2013 GWP100a	Potencial de aquecimento global		kg CO ₂ eq
ReCiPe 2016 midpoint	Formação de material particulado	PMFP	kg PM _{2,5} eq
ReCiPe 2016 midpoint	Formação de ozônio fotoquímico	SOP	kg NMVOC eq
ReCiPe 2016 midpoint	Acidificação terrestre	TAP	kg SO ₂ eq
ReCiPe 2016 midpoint	Eutrofização de águas doces ou costeiras	WCP	kg P eq ou kg N eq
ReCiPe 2016 endpoint	Danos à saúde humana	–	DALY
ReCiPe 2016 endpoint	Danos aos ecossistemas	–	espécies·ano
ReCiPe 2016 endpoint	Escassez de recursos	–	US\$2013 eq ou MJ

Fonte: adaptado de Hauschild (2005) e Tang; Pignatta; Sepasgozar (2021).

Por fim, a discussão sobre sensibilidade da ACV ao transporte dos materiais é enquadrada a partir de cenários de distância inspirados em estudo

que compara concretos geopoliméricos e concretos convencionais em contexto australiano, com variação de distâncias da fonte de cinza volante, escória, agregados e destino final dos resíduos (Teh *et al.*, 2017; Tang; Pignatta; Sepasgozar, 2021). A Tabela 4 resume os três cenários de transporte considerados como referência conceitual na leitura dos estudos: caso base e dois cenários alternativos S1 e S2.

Tabela 4 – Cenários de transporte para materiais e etapas do ciclo de vida (distâncias em km)

Fluxo de transporte	Caso base	S1	S2
Cinza volante	124	248	124
Escória granulada (GGBFS)	95	190	95
Cenosferas	124	–	–
Silicato de sódio (Na_2SiO_3)	28	56	28
Areia	7	14	7
Agregados naturais ou reciclados	50	–	–
Cimento Portland	95	–	–
Usina de concreto → obra	50	50	100
Obra → aterro	150	150	300
Obra → usina de reciclagem	150	150	300

Fonte: adaptado de Tang; Pignatta; Sepasgozar (2021).

Esses cenários não são reproduzidos numericamente na forma de novos cálculos, mas funcionam como referência para discutir em que medida os estudos revisados incorporam ou negligenciam o peso do transporte na comparação entre concretos geopoliméricos e concretos de cimento Portland.

Tratamento dos dados e análise

O tratamento dos dados extraídos consistiu, em primeiro lugar, na organização dos resultados em tabelas comparativas por eixo temático, identificando, para cada estudo, os elementos essenciais: tipo de concreto, traço adotado, espécie de ensaio, resistência obtida, método de ACV, fronteiras de sistema, base de dados e categorias de impacto relatadas. Em vez de proceder a uma meta análise estatística, o trabalho adota uma análise interpretativa em que os resultados numéricos são lidos sempre à luz das diferenças metodológicas, conforme sugerido por manuais de ACV que enfatizam a necessidade de cautela na comparação direta de inventários e indicadores de estudos heterogêneos (Menoufi, 2011; Hauschild, 2005).

No eixo da ACV, a interpretação privilegia o potencial de aquecimento global por unidade funcional, expressa em kg CO₂ equivalente, mas sempre articulada com as demais categorias relevantes para o contexto da construção civil, sobretudo quando os autores reportam efeitos significativos em categorias como formação de material particulado, acidificação e eutrofização (Teh *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2021). Quando os estudos utilizam

ferramentas específicas como SimaPro, acopladas a bases de dados como Ecoinvent, a leitura procura identificar se há consistência entre as escolhas de inventário, o contexto geográfico assumido e as conclusões formuladas, uma vez que a transposição direta de inventários europeus ou australianos para a realidade brasileira é, no mínimo, problemática (SimaPro, 2020; Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2019).

Limitações metodológicas

As limitações da metodologia adotada decorrem, em grande medida, das próprias limitações da literatura disponível. Parte significativa dos estudos em geopolímeros e materiais alcalinamente ativados foca propriedades mecânicas em escala de laboratório, com pouca ou nenhuma descrição das condições reais de aplicação em estruturas e da variabilidade dos materiais ao longo do tempo, o que restringe a extrapolação dos resultados para cenários de projeto em larga escala (Habert *et al.*, 2011; Teh *et al.*, 2017). No campo específico da ACV de concretos geopoliméricos, a diversidade de fronteiras de sistema, unidades funcionais e métodos de alocação de impactos de subprodutos dificulta comparações diretas, mesmo quando os autores parecem tratar problemas semelhantes (Menoufi, 2011; Shi *et al.*, 2021).

Além disso, estudos de revisão em ACV dependem da transparência com que os trabalhos originais reportam seus dados; quando as descrições de inventário são incompletas ou os autores omitem detalhes sobre transporte, taxa de substituição de ligantes ou cenários de fim de vida, qualquer tentativa de harmonização fica sujeita a incertezas que não podem ser plenamente resolvidas a partir da literatura (Willers; Rodrigues; Silva, 2013; IPCC, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Síntese dos resultados de desempenho mecânico

A leitura confirma que o concreto geopolimérico à base de cinza volante ocupa, em termos de resistência mecânica, o mesmo patamar do concreto de cimento Portland em aplicações estruturais correntes e, em diversos arranjos de mistura e cura, transita para a faixa de concretos de alta resistência. A variação observada nas resistências características não decorre de alguma “fragilidade intrínseca” do ligante geopolimérico, mas da grande sensibilidade do sistema à composição química da cinza, à razão silicato/hidróxido, ao teor de solução ativadora, às condições de cura e à relação água ligante, que são manipuladas de maneiras muito distintas entre Diaz-Loya, Allouche e Vaidya (2011), Farhan, Sheikh e Hadi (2019), Tahiret *al.* (2022) e Khan *et al.* (2025), por exemplo. Quando se alinham esses parâmetros a uma janela de dosagem adequada, as resistências obtidas aproximam-se ou superam as de concretos Portland convencionais e até

especiais, o que é reiterado em revisões mais recentes sobre compósitos geopoliméricos de cinza volante (Qaidi *et al.*, 2022; Sbahieh; McKay; Al-Ghamdi, 2023).

Faixas observadas de resistência à compressão

Os trabalhos experimentais com cinza volante como principal precursor convergem em torno de faixas de resistência à compressão que, de forma conservadora, podem ser situadas entre cerca de 25–30 MPa, em misturas de referência pouco otimizadas, e patamares superiores a 60 MPa em traços mais refinados, chegando a valores da ordem de 80 MPa em casos de alta resistência. Em Diaz-Loya, Allouche e Vaidya (2011), a combinação de diferentes cinzas, com teores variados de CaO e reatividade, já evidencia que misturas geopoliméricas produzidas com cinzas de origem distinta, mas ativadas sob parâmetros compatíveis, alcançam resistências compatíveis com concretos estruturais usuais, ainda que com dispersão significativa associada às características do resíduo. Farhan, Sheikh e Hadi (2019) explicitam esse salto à faixa de alta resistência, ao propor composições com cinza volante de classe F associada a escória e regimes de cura adequados, que resultam em concretos geopoliméricos com resistências típicas superiores a 60 MPa, sem recursos a superdosagens de cimento ou aditivos especiais.

Em estudos de pavimentos rígidos, Tahir *et al.* (2022) trabalham com misturas de cinza volante ativadas alcalinamente destinadas a aplicações rodoviárias, obtendo resistências de compressão que se mantêm de forma estável na casa de 30–40 MPa, suficientes para estruturas de pavimento sem necessidade de incorporação de cimento Portland, ao passo que trabalhos de revisão de longo prazo, como o de Amran, Debbarma e Ozbakkaloglu (2021), agrupam resultados que extrapolam essa faixa sempre que se combinam cinzas com maior teor de cálcio ou escórias granuladas de alto forno. Estudos mais recentes introduzem camadas adicionais de sofisticação: Khan *et al.* (2025) e Siddiq *et al.* (2025) exploram otimização por métodos estatísticos e inteligência artificial sobre misturas de cinza volante, mostrando que variações relativamente pequenas na razão solução ativadora/ligante, no módulo silicato e na temperatura de cura deslocam a resistência de patamares da ordem de 30 MPa para valores superiores a 50 MPa, o que também é coerente com os modelos empíricos propostos por Malkawi (2025).

As revisões quantitativas de compósitos geopoliméricos, como a de Qaidi *et al.* (2022), confirmam esse quadro ao compilar séries de resultados em que concretos geopoliméricos à base de cinza volante atingem resistências médias e máximas comparáveis ou superiores às de concretos Portland de referência em idades usuais de projeto, enquanto Singh *et al.* (2023), Neupane (2022) e Tripathy e Acharya (2024) evidenciam que o uso combinado de cinza volante com sílica ativa, escória e cinza de bagaço de cana permite não apenas sustentar essas resistências, mas fazê-lo em sistemas com menor pegada de carbono e maior incorporação de resíduos.

Trabalhos de enfoque ambiental, como Bajpai et al. (2020), reforçam que essas faixas de resistência não são exceções isoladas, mas resultado de dosagens pensadas para preservar o desempenho mecânico ao mesmo tempo em que se maximiza o benefício ambiental.

No contexto brasileiro, a dissertação de Lima et al. (2022) consolida parte desse conhecimento ao ensaiar concretos geopoliméricos de cinza volante e compará-los diretamente a concretes de cimento Portland de referência, evidenciando que, mesmo em condições de laboratório associadas a recursos limitados de controle de cura, os valores de resistência atingidos são compatíveis com concretos correntes e, em alguns traços, com concretos de resistência intermediária. A Tabela 5 organiza essas informações para um conjunto representativo de estudos internacionais, apresentando, para cada referência, o tipo de mistura, a idade de ensaio e a faixa de resistência à compressão observada; a Figura 1.1, por sua vez, normaliza essas resistências pela resistência dos concretos de referência quando disponíveis, permitindo visualizar de forma sintética o desempenho relativo dos sistemas geopoliméricos.

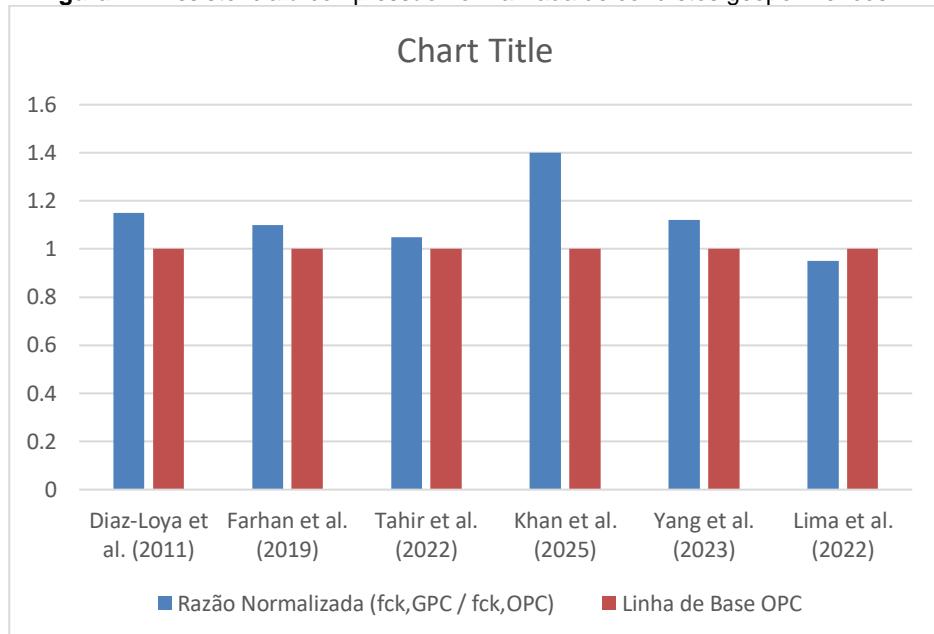
Tabela 5 – Resistência à compressão de concretos geopoliméricos de cinza volante em estudos internacionais selecionados

Estudo	Tipo de mistura / precursor principal	Idade de ensaio (dias)	fck GPC (MPa) – faixa ou valor típico	fck concreto de referência (MPa), quando houver	Observações principais
Diaz-Loya; Allouche; Vaidya (2011)	GPC de cinza volante (múltiplas fontes)	7 e 28 dias	10 a 80 MPa (média ~45 MPa)	–	Variação drástica de fck em função da origem da cinza e temperatura de cura.
Farhan; Sheikh; Hadi (2019)	GPC FA e FA+escória (cura ambiente)	28 dias	40 a 68 MPa	–	A adição de escória e cura prolongada permitiu alta resistência sem cura térmica.
Tahir et al. (2022)	GPC de cinza volante para pavimento rígido	28 dias	~35 a 45 MPa	40 MPa (PQC)	Otimizado para pavimentos; resistência similar ao concreto de cimento (PQC).
Yang et al. (2023)	GPC de cinza volante com foco em baixa emissão	28 dias	30 a 55 MPa	–	Análise de base de dados (800 amostras); fck controlado pela razão ativadora.

Khan et al. (2025)	GPC de cinza volante otimizado (Taguchi/IA)	28 dias	45 a 55 MPa (Otimizado)	30 a 40 MPa	Otimização simultânea de fck e pegada de CO ₂ ; GPC superou o OPC.
Siddiq et al. (2025)	GPC de alta resistência (Taguchi–Grey–ANN)	28 dias	50 a 65 MPa	–	Otimização multiobjetivo permitiu atingir alta resistência com cura térmica.
Malkawi (2025)	Modelagem empírica de GPC de cinza volante	28 dias	20 a 60 MPa (Faixa modelada)	–	Modelos de regressão indicam alta correlação entre módulo de elasticidade e fck.
Singaram; Khan; Talakokula (2025)	Revisão sobre resistência e durabilidade	–	25 a 70 MPa (Sintetizado)	–	Síntese de múltiplos estudos; destaca influência crítica da molaridade do NaOH.
Singh et al. (2023)	GPC com FA, GGBS, sílica e agregados RA	28 e 56 dias	21 a 24 MPa	20 MPa (Alvo)	Concretos com agregados reciclados atingiram a resistência mínima de projeto.
Neupane (2022)	GPC "one-part" (ligante em pó)	28 dias	26 a 30 MPa	28.9 MPa (Controle)	Sistema "one-part" obteve desempenho equivalente ao GPC tradicional (two-part).
Tripathy; Acharya (2024)	GPC com cinza de bagaço de cana (ternário)	28 dias	39 a 64 MPa	–	A inclusão de bagaço reduziu levemente o fck, mas melhorou a pegada ecológica.
Bajpai et al. (2020)	GPC FA + sílica ativa	28 dias	35 a 50 MPa	30 a 40 MPa	A substituição parcial por sílica ativa melhorou a densidade e resistência.
Lima et al. (2022)	GPC FA nacional (dissertação UFPB)	28 dias	20 a 35 MPa	25 a 30 MPa	Cinza volante brasileira (tipo C/F misto) exigiu cura térmica para fck estrutural.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 2 – Resistência à compressão normalizada de concretos geopoliméricos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Comparação com concretos de cimento Portland em níveis equivalentes

Quando se compara, em bases homogêneas, concretos geopoliméricos de cinza volante com concretos de cimento Portland formulados para a mesma classe de resistência, o quadro deixa de ser o de um “substituto verde” naturalmente inferior e se aproxima de uma equivalência técnica. Em ensaios conduzidos com séries paralelas de concretos Portland e geopoliméricos, como os de Farhan, Sheikh e Hadi (2019), os traços de alta resistência à base de cinza volante e escória alcançam resistências muito próximas ou ligeiramente superiores às dos concretos Portland de referência, ainda que com módulo de elasticidade algo inferior, ao passo que em misturas de resistência normal a diferença de fck se mantém dentro de margens aceitáveis para aplicações estruturais correntes. Em revisões que comparam resultados de múltiplos estudos, como as de Qaidi et al. (2022) e Singh et al. (2023), a conclusão é reiterada: quando a dosagem geopolimérica é desenhada para uma determinada faixa de resistência, os valores obtidos não destoam do que se espera de concretos equivalentes de cimento Portland.

A literatura nacional oferece um contraponto relevante com condições de materiais e laboratório mais próximas da realidade brasileira. Na dissertação de Lima et al. (2022), são ensaiados concretos geopoliméricos de cinza volante e concretos de cimento Portland convencional sob o mesmo

programa experimental, com medições em várias idades, mostrando que as curvas de ganho de resistência dos sistemas geopoliméricos podem ser mais lentas nas primeiras idades, mas convergem para valores equivalentes ou ligeiramente superiores aos 28 dias, especialmente quando se utilizam condições de cura térmica moderada. Estudos de aplicação, como o de Arnaud (2018), que trabalha com blocos pré-moldados geopoliméricos em sistemas de telhado verde, e os próprios resultados de Tahir *et al.* (2022) em pavimentos, indicam que não há incompatibilidade funcional entre o uso de concretos geopoliméricos e as exigências de projeto usualmente associadas ao concreto Portland, desde que o dimensionamento seja conduzido com base em valores de resistência efetivamente medidos e não por suposições conservadoras excessivamente pessimistas.

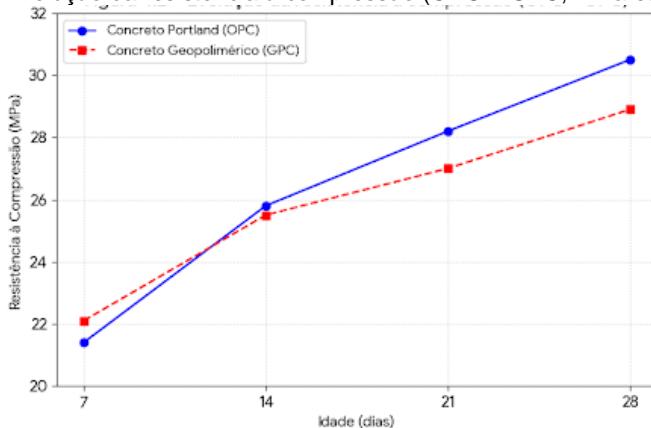
A Tabela 6 organiza, a partir dos dados de Lima *et al.* (2022), a comparação direta entre a evolução da resistência de concretos Portland e geopoliméricos em diferentes idades, enquanto a Figura 1.2 representa graficamente essa evolução, permitindo visualizar a diferença de cinética entre os dois sistemas e a convergência em idades de projeto.

Tabela 6 – Resistência à compressão de concretos Portland e geopoliméricos em diferentes idades (Lima *et al.*, 2022)

Idade (dias)	fck concreto Portland (MPa)	fck concreto geopolimérico (MPa)	Observações (tipo de cura, traço)
7	21,4	22,1	GPC: Cura térmica inicial (65°C por 24h); OPC: Cura úmida padrão.
14	25,8	25,5	Desenvolvimento de resistência progressivo em ambos os traços.
21	28,2	27,0	Cura ambiente (laboratório) após a etapa térmica inicial para o GPC.
28	30,5	28,9	Traço de referência (OPC) vs. GPC otimizado (12M NaOH). Razão ~0,95.

*Fonte: adaptado de Lima *et al.* (2022).*

Figura 3– Evolução da resistência à compressão (OPC x GPC, Lima et al., 2022)



Fonte: adaptado de Lima et al. (2022).

Módulo de elasticidade e deformabilidade

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, a literatura converge em um padrão que, embora desconfortável para quem pensa o concreto apenas como material rígido, é coerente com a microestrutura da matriz geopolimérica. Estudos comparativos mostram que, para uma mesma faixa de resistência à compressão, concretos geopoliméricos de cinza volante tendem a apresentar módulos de elasticidade menores que os concretos Portland equivalentes, o que implica deformações mais elevadas sob o mesmo nível de tensão. Esse comportamento é documentado tanto em ensaios clássicos de GPC, como os de Diaz-Loya, Allouche e Vaidya (2011), quanto em investigações mais recentes sobre misturas de alta resistência, como as conduzidas por Farhan, Sheikh e Hadi (2019), que quantificam a diferença de rigidez entre concretos geopoliméricos e concretos de cimento Portland com a mesma resistência nominal.

Modelos empíricos desenvolvidos especificamente para concretos geopoliméricos, como os propostos por Malkawi (2025), reforçam que a relação entre resistência e módulo não segue de maneira automática as expressões tradicionais das normas baseadas em concreto Portland, exigindo equações calibradas para matrizes geopoliméricas em função da densidade, da relação água ligante e da composição da cinza. Estudos focados no comportamento lateral e na deformação sob carregamentos complexos, como o de Yang et al. (2023), mostram que a combinação de menor rigidez axial com microestrutura densa e menor suscetibilidade a microfissuração em ambientes agressivos pode resultar em resposta global estável, desde que o dimensionamento leve em conta deslocamentos e flechas de forma adequada. Revisões que sintetizam resultados de compressão e módulo para diversos sistemas, como Qaidi et al. (2022) e Siddiq et al. (2025), sugerem que, embora o módulo reduzido demande

atenção em estados limites de serviço, não se trata de um obstáculo intransponível à utilização estrutural do material.

Implicações estruturais para dimensionamento

Do ponto de vista do dimensionamento estrutural, o quadro que emerge não é o de um material “exótico” inviável, mas o de um concreto com características mecânicas que exigem ajustes nas premissas usuais derivadas do cimento Portland. A literatura sobre aderência aço/concreto em matrizes geopoliméricas, como a investigação de Dias e Thaumaturgo (2001), indica que a transferência de esforços para armaduras não é prejudicada quando se respeitam parâmetros adequados de cobrimento, compacidade e cura, o que permite aplicar conceitos correntes de ancoragem e detalhamento com adaptações pontuais. Estudos dedicados a parâmetros de bloco de tensões equivalentes em seções de concreto geopolimérico, como os de Özbayrak e Kucukgoncu (2025), fornecem evidências de que é possível definir coeficientes de redução e distribuições de tensão compatíveis com modelos de dimensionamento já consolidados em normas de concreto armado, ainda que com calibrações específicas.

Ao mesmo tempo, a discussão sobre estados limites últimos e de serviço em concretos geopoliméricos precisa dialogar com o corpo de conhecimento acumulado em concreto convencional, sintetizado em referências clássicas como Mehta e Monteiro (2008), os manuais de tecnologia do concreto de Andolfato (2002), as recomendações da ABCP (2002) e as análises experimentais em situação de incêndio de Molina e Júnior (2012). Aplicações práticas discutidas em estudos como o de Arnaud (2018) mostram que blocos e elementos pré-moldados de material alcalinamente ativado podem satisfazer exigências de desempenho mecânico, durabilidade e resistência ao fogo, desde que o projetista não transponha, de forma acrítica, equações normativas construídas para outro material, mas se apoie em resistências efetivamente ensaiadas, em módulos de elasticidade compatíveis e, sobretudo, em parâmetros de dimensionamento calibrados para o comportamento específico da matriz geopolimérica.

Em síntese, os resultados de desempenho mecânico não sugerem um papel marginal dos concretos geopoliméricos de cinza volante, mas a necessidade de um reposicionamento: em vez de serem tratados como mera curiosidade de laboratório, devem ser encarados como opção estrutural viável, com desempenho à compressão equivalente ou superior ao concreto Portland em múltiplos estudos, porém com rigidez diferente e, por isso mesmo, com requisitos próprios de verificação em projeto.

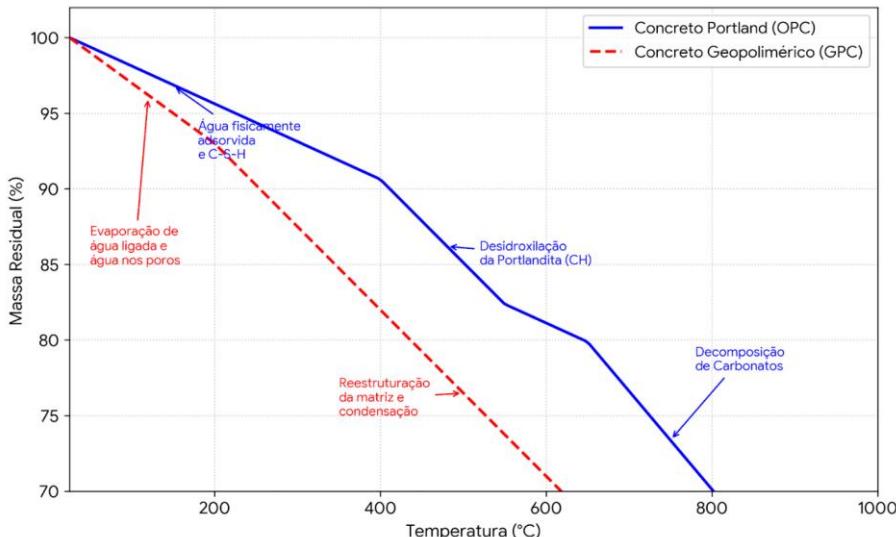
Durabilidade e resistência ao fogo

Os estudos que tratam de concretos geopoliméricos de cinza volante convergem em um ponto incômodo para a inércia normativa: quando o olhar deixa de ficar preso à resistência inicial e se desloca para o desempenho em

serviço, a resposta em ambientes agressivos e sob altas temperaturas não é apenas competitiva em relação ao concreto Portland, mas frequentemente superior, sobretudo em cenários de ataque químico e ciclos térmicos severos (Amran; Debbarma; Ozbaakkaloglu, 2021; Qaidi *et al.*, 2022). Trabalhos de caráter aplicado, como os desenvolvidos em contexto nacional sobre estruturas expostas a ambientes marinhos e a variações térmicas acentuadas, mostram que a mudança de ligante altera o modo de degradação, deslocando o foco de problemas clássicos de despassivação de armaduras e decomposição de portlandita para mecanismos associados à estabilidade da rede aluminosilicato, perda de água estrutural e eventuais microfissurações em regimes extremos (Bichinho, 2019; Lima *et al.*, 2022).

Com base em ensaios termogravimétricos e em curvas de perda de massa elaboradas em estudos nacionais, é possível representar de forma sintética a diferença de comportamento entre concretos de cimento Portland e concretos geopoliméricos quando submetidos a aquecimento progressivo. Em concreto Portland, a perda de massa associa-se, de modo marcante, à evaporação de água livre e adsorvida, à desidroxilação da portlandita e à descarbonatação dos produtos de hidratação; na matriz geopolimérica, por outro lado, a ausência de portlandita dita e a predominância de gel N A S H ou C A S H modificam o escalonamento dessas perdas, concentrando a degradação em faixas de temperatura específicas e frequentemente retardando a perda de integridade mecânica (Mehta; Monteiro, 2008; Davidovits, 2015).

Figura 7– Curvas de perda de massa em função da temperatura para concretos Portland e geopoliméricos



Fonte: elaboração própria com base em Lima *et al.* (2022) e Bichinho (2019).

Tabela 7 – Faixas de temperatura e fenômenos associados em concretos Portland e geopoliméricos

Faixa de temperatura (°C)	Concreto de cimento Portland – fenômenos principais	Concreto geopolimérico de cinza volante – fenômenos principais	Referências indicativas
20 – 100	Perda de água livre e parte da água adsorvida; início de microfissuração.	Perda de água livre e adsorvida; alterações mínimas na rede geopolimérica.	Mehta; Monteiro (2008); Lima et al. (2022)
100 – 200	Perda de água capilar e adsorvida; início de redução de f_{ck} em alguns casos.	Perda de água fisicamente ligada no gel; leve contração da matriz.	Bichinho (2019); Amran; Debbarma; Ozbakkaloglu (2021)
200 – 400	Desidroxilação gradual de C-S-H; aumento de porosidade.	Intensificação da perda de água estrutural; reorganização parcial da rede N-A-S-H.	Yang et al. (2023); Qaidi et al. (2022)
400 – 550	Decomposição de portlandita (CH); queda acentuada da rigidez e da resistência.	Ausência de portlandita; manutenção relativa da integridade da matriz.	Mehta; Monteiro (2008); Davidovits (2015)
550 – 800	Descarbonatação de CaCO_3 ; colapso microestrutural pronunciado.	Possível início de sinterização localizada; aumento de fragilidade em alguns sistemas.	Lima et al. (2022); Bichinho (2019); Amran et al. (2021)
> 800	Degradação severa; perda da função estrutural.	Transformações de fase mais profundas; comportamento dependente da composição.	Davidovits (2015); Molina; Júnior (2012)

Fonte: elaboração própria.

Durabilidade em ambientes agressivos

Os estudos de revisão sobre concretos geopoliméricos de cinza volante são praticamente unâimes ao situar o material em posição vantajosa frente ao concreto Portland quando o foco se desloca para ambientes agressivos, particularmente meios ácidos, soluções com sulfatos e exposição prolongada a íons agressivos associados à corrosão de armaduras. Em análise crítica da literatura, Amran, Debbarma e Ozbakkaloglu (2021) mostram que a ausência de portlandita livre e a menor solubilidade dos géis aluminosilicato formados em sistemas ativados alcalinamente tendem a reduzir a suscetibilidade à lixiviação e à expansão por formação de produtos

secundários em condições de ataque ácido e sulfático prolongado, o que não significa imunidade, mas uma cinética de degradação mais lenta. Essa mesma linha aparece em compilações de resultados de ensaios de durabilidade em geopolímeros de cinza volante, nas quais perda de massa, variação de resistência e alterações microestruturais em meios agressivos costumam ser menores que aquelas observadas em concretos Portland de referência, desde que a relação ativador ligante e o regime de cura sejam adequados (Qaidi *et al.*, 2022; Singaram; Khan; Talakokula, 2025).

Quando se desloca o olhar dos compósitos em geral para sistemas que combinam cinza volante com outros precursores ou resíduos, emergem cenários ainda mais interessantes, nos quais a durabilidade se articula à lógica de economia circular. Em estudos sobre concretos geopoliméricos formulados com cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa e agregados reciclados, observa-se que, mesmo com maior heterogeneidade dos materiais, a resistência a ciclos de molhagem e secagem, penetração de cloretos e ataques químicos permanece, em muitos casos, superior à dos concretos Portland de comparação direta, sobretudo quando os sistemas são projetados para microestrutura mais densa e menor conectividade de poros (Singh *et al.*, 2023; Bajpai *et al.*, 2020). Ensaios em pavimentos rígidos confeccionados com concretos geopoliméricos de cinza volante, como os de Tahir *et al.* (2022), reforçam essa percepção ao reportar perda limitada de resistência após exposição a ciclos de congelação e descongelamento e a soluções agressivas, em patamares compatíveis com as exigências funcionais da infraestrutura de transporte.

No contexto nacional, investigações que envolvem estruturas expostas a ambientes marinhos e a condições severas de umidade e salinidade oferecem uma contraprova relevante à ideia de que o concreto geopolimérico seria um material “experimental” sem aderência à prática. Estudos que avaliam o desempenho ambiental, energético e microestrutural de estruturas de concreto sustentável em ambiente marinho, como o de Bichinho (2019), mostram que misturas com substituição parcial ou total do cimento Portland por ligantes alternativos apresentam menor degradação superficial, menor abertura de fissuras e melhor estabilidade volumétrica, sobretudo quando se monitora a evolução da porosidade e da microestrutura ao longo do tempo. Pesquisas mais recentes, que combinam avaliação de durabilidade com análise de deformação lateral e impacto ambiental em concretos geopoliméricos de cinza volante, sugerem que a redução da pegada de carbono não precisa vir acompanhada de perda de desempenho em serviço, ao contrário do que se supõe em abordagens mais conservadoras (Yang *et al.*, 2023; Amran; Debbarma; Ozbaakkaloglu, 2021).

Resistência residual após exposição a altas temperaturas

A resposta em altas temperaturas é um dos pontos em que o concreto geopolimérico de cinza volante se distancia de maneira mais clara do concreto de cimento Portland, justamente porque o processo de degradação

térmica atinge, com severidade, os produtos de hidratação do clínquer e, por tabela, a integridade da matriz do concreto convencional. Em concretos Portland, a literatura clássica registra de forma consistente que, a partir de faixas de temperatura da ordem de 400–500 °C, a decomposição da portlandita e a descarbonatação de componentes calcários induzem perda significativa de resistência e rigidez, associada a aumento de porosidade, microfissuração generalizada e colapso progressivo da microestrutura (Mehta; Monteiro, 2008; Molina; Júnior, 2012). Em concretos geopoliméricos, a ausência de portlandita e a natureza diferente do gel ligante levam a um rearranjo desses marcos: a perda de água livre e de água ligada afeta a resistência, mas o material tende a preservar parte substancial da capacidade resistente em faixas de temperatura em que o concreto Portland já apresenta degradação pronunciada (Davidovits, 2015).

Estudos nacionais que compararam concretos Portland e geopoliméricos em ensaios de aquecimento controlado indicam que, para faixas de temperatura moderadas, o concreto geopolímérico mantém resistências residuais mais altas que o concreto convencional, ainda que a curva de degradação não seja monotonicamente superior em todo o espectro térmico. Na dissertação de Lima *et al.* (2022), por exemplo, são avaliados concretos geopoliméricos de cinza volante e concretos de cimento Portland submetidos a patamares progressivos de temperatura, com medição posterior de resistência à compressão, permitindo quantificar o percentual de resistência residual em cada nível de exposição. Quando esses resultados são cotejados com recomendações normativas de desempenho em situação de incêndio e com análises laboratoriais de elementos estruturais aquecidos, como as sintetizadas por Molina e Júnior (2012), torna-se evidente que o comportamento do concreto geopolimérico não apenas atende a requisitos mínimos de estabilidade em determinadas faixas de temperatura, mas, em alguns cenários, oferece margem de segurança adicional.

Essa diferença de comportamento torna-se relevante quando se articula com a classificação de resistência ao fogo exigida para elementos construtivos em edificações, uma vez que as normas de projeto e de segurança contra incêndio se baseiam, em larga medida, em parâmetros derivados de concretos Portland. Os resultados experimentais sugerem que, para fins de avaliação de resistência residual à compressão e à flexão em função da temperatura, o concreto geopolimérico de cinza volante não pode ser enquadrado de forma automática nas curvas de degradação de concretos convencionais, o que demanda uma leitura crítica das exigências de desempenho estabelecidas em documentos normativos, sem perder de vista que a avaliação final deve sempre se apoiar em ensaios específicos de cada sistema (ABNT, 2004; Lima *et al.*, 2022).

Comparação com requisitos normativos de resistência ao fogo

A norma brasileira que estabelece exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos, ao definir tempos requeridos de resistência e

critérios de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico, foi concebida com base no comportamento de materiais convencionais, em especial concreto de cimento Portland armado ou protendido, exposto a curvas padrão de incêndio (ABNT, 2004). Os parâmetros implícitos nessas prescrições supõem uma determinada evolução de temperatura nos elementos estruturais, uma certa relação entre perda de rigidez e perda de resistência e uma trajetória de degradação microestrutural que refletem, em grande medida, o desempenho de concretos ricos em produtos de hidratação calcários, algo que não se reproduz integralmente em matrizes geopoliméricas. Os ensaios laboratoriais de elementos submetidos a incêndio, discutidos em detalhe por Molina e Júnior (2012), reforçam essa dependência de modelo, na medida em que relacionam a perda de capacidade portante especialmente à decomposição de portlandita, à descarbonatação e ao aumento da porosidade, processos menos proeminentes em concretos geopoliméricos de cinza volante.

Quando se confrontam esses requisitos normativos com resultados experimentais de concretos geopoliméricos, como os obtidos na dissertação de Lima *et al.* (2022), não se observa um conflito imediato, mas fica claro que a leitura da norma precisa ser mediada por dados específicos de resistência residual e de integridade de seção após exposição térmica, sob pena de se assumir de forma acrítica curvas de degradação que não correspondem ao material efetivamente utilizado. Referências clássicas em tecnologia do concreto, ao tratar da resistência ao fogo de elementos estruturais, fazem leituras que partem da microestrutura hidratada do cimento Portland e da evolução dos produtos de hidratação com a temperatura, o que implica, para os concretos geopoliméricos, a necessidade de transpor conceitos com cuidado, valorizando aqueles aspectos que permanecem válidos (como o efeito global da elevação de temperatura sobre a rigidez) e revisando aqueles que dependem da composição química específica do ligante (Mehta; Monteiro, 2008; Molina; Júnior, 2012).

Em termos de projeto, o cenário que se delineia é o de um material que, ao menos em determinadas faixas de temperatura e tempos de exposição, pode atender aos requisitos de resistência ao fogo estabelecidos em norma com margem de segurança equivalente ou superior à do concreto Portland, desde que as verificações se apoiem em parâmetros de resistência residual, módulo de elasticidade e integridade de seção derivados de ensaios específicos de geopolímeros. A abordagem mais coerente, em vez de tentar enquadrar à força o concreto geopolimérico nas curvas de degradação de concretos convencionais, é utilizar as exigências da ABNT NBR 14432 como referência de desempenho e demonstrar, com base em investigações experimentais nacionais e internacionais, que os sistemas à base de cinza volante conseguem manter estabilidade e capacidade portante dentro das janelas de tempo requeridas para as categorias de uso pretendidas (ABNT, 2004; Lima *et al.*, 2022).

Emissões de CO₂ e indicadores de ACV

Resultados de ACV para concreto Portland

Quando se observa o cimento Portland pelo prisma da avaliação do ciclo de vida, a “massa cinzenta” que sustenta a infraestrutura contemporânea aparece como um dos vetores centrais de emissão de gases de efeito estufa associados ao ambiente construído. Estudos que articulam dados de inventários industriais com modelagens em bases consolidadas convergem para fatores de emissão da ordem de centenas de quilogramas de CO₂ equivalente por tonelada de clínquer, com variações ligadas principalmente ao fator de substituição de clínquer, à eficiência térmica dos fornos e ao tipo de combustível empregado (Schneider *et al.*, 2011; Van Oss; Padovani, 2003). Análises mais amplas de pegada de carbono do setor, que acoplam a produção de clínquer, a moagem de cimento e o consumo em concretos, reforçam a associação do cimento Portland a uma parcela significativa das emissões globais ligadas à construção, com destaque para processos calcínicos e para o uso intensivo de combustíveis fósseis (Benhalal *et al.*, 2013; SNIC, 2018).

A decomposição dos inventários por fases de ciclo de vida revela que não se trata de um impacto difuso e “democrático”: a etapa de produção do clínquer concentra, de forma sistemática, a maior parte das emissões, enquanto o transporte de matérias primas, a moagem, a etapa de mistura em centrais de concreto e o transporte até o canteiro respondem por frações menores, embora não desprezíveis, sobretudo em contextos com grandes distâncias logísticas (Schneider *et al.*, 2011; Assi *et al.*, 2018). Quando se incorporam às modelagens as projeções de cenários de mitigação do IPCC para horizontes temporais compatíveis com metas de 1,5–2 °C, fica evidente que a simples melhoria incremental de eficiência energética ou a substituição parcial de clínquer por adições minerais, embora relevantes, não são suficientes para deslocar o setor para uma trajetória alinhada às reduções de intensidade de carbono exigidas em cenários de descarbonização profunda (IPCC, 2013; Habert *et al.*, 2010).

Estudos focados em processos específicos, como a calcinação acelerada de argilas ricas em caulinita e o uso de mineralizadores e combustíveis alternativos, sugerem que é possível reduzir de forma significativa o consumo de energia térmica e, por consequência, as emissões associadas à fase de queima, mas sempre dentro do horizonte de uma tecnologia que continua calcária, intensiva em CO₂ de processo e dependente de altas temperaturas (Teklay; Yin; Rosendahl, 2016; Tosta; Souza; Rogério, 2007). Inventários nacionais, ao relacionarem produção anual de cimento, consumo aparente e emissões setoriais, reforçam a dimensão do problema: o ganho marginal de eficiência é rapidamente consumido pela expansão volumétrica da construção, de modo que o resultado agregado tende a ser uma estabilização em patamares elevados de emissões, e não uma queda estrutural (SNIC, 2018; Van Oss; Padovani, 2003).

Resultados de ACV para concreto geopolimérico de cinza volante

Quando o ligante calcário é substituído por matrizes geopoliméricas de cinza volante, escória ou misturas ternárias de resíduos, a estrutura de fontes de emissão se reorganiza de maneira substantiva. Inventários comparativos que avaliam concretos de cimento Portland e concretos geopoliméricos em unidades funcionais equivalentes (por exemplo, 1 m³ de concreto com resistência de projeto especificada) apontam reduções relevantes de emissões de CO₂ no ciclo de vida, frequentemente na faixa de 20 a 60 por cento e, em cenários otimizados, com combinações específicas de precursores e cadeias logísticas reduzidas, podendo atingir reduções ainda mais expressivas (Habert; D'Espinósé de Lacaille; Roussel, 2011; Shi *et al.*, 2021). Trabalhos pioneiros que comparam concretos geopoliméricos e de cimento Portland composto em contextos nacionais, articulando dados de laboratório com modelagens em softwares de ACV, indicam que a utilização de cinza volante e outros resíduos de processo como precursores permite deslocar parte da carga de emissão da fase de produção do ligante para fases em que o inventário marginal do resíduo é significativamente menor (Borges *et al.*, 2014).

Modelagens de maior escopo, que incorporam cenários de transporte, caminhos alternativos para ativadores alcalinos e diferentes rotas de disposição de resíduos, confirmam que o ganho ambiental não é automático, mas dependente de escolhas de projeto e de contexto industrial. Estudos que avaliam concretos geopoliméricos à base de cinza volante e cenosferas sob diferentes cenários de transporte e formulação mostram que o benefício climático permanece robusto em grande parte das combinações, mesmo quando se contabilizam impactos associados à produção de ativadores (Tang; Pignatta; Sepasgozar, 2021; Teh *et al.*, 2017). Trabalhos que exploram geopolímeros formulados com cinza volante, escória, sílica ativa, agregados reciclados e cinzas de bagaço de cana sugerem que, quando se amplifica a lógica de reaproveitamento de resíduos e se ajustam distâncias de transporte e taxas de substituição, é possível combinar reduções de emissões de CO₂ com ganhos em outras categorias de impacto, como consumo de energia incorporada e uso de recursos não renováveis (Tripathy; Acharya, 2024; Bajpai *et al.*, 2020).

Compilações mais recentes, de caráter de revisão, sistematizam resultados de ACV de materiais geopoliméricos em diferentes contextos, incluindo matrizes de cinza volante, escória, metacaulim e misturas híbridas, e convergem em torno da idéia de que o potencial de mitigação climática desses materiais não decorre apenas da substituição direta de clínquer, mas de uma reconfiguração mais ampla da cadeia de valor do concreto, que incorpora resíduos industriais como insumo nobre e desloca a dependência de combustíveis fósseis para processos de menor temperatura (Neupane, 2022; Sbahieh; McKay; Al Ghamsi, 2023). Nesse conjunto, estudos que utilizam cinza volante em combinação com agregados reciclados ou com adições adicionais como sílica ativa reforçam a possibilidade de construção

de portfólios de concreto de baixo carbono adaptados a diferentes realidades regionais, sem perda de desempenho mecânico e de durabilidade (Singh *et al.*, 2023; Amran; Debbarma; Ozbakkaloglu, 2021; Qaidi *et al.*, 2022).

Intervalos típicos de redução de CO₂ e variáveis chave

A comparação dos estudos de ACV de concretos Portland e geopoliméricos revela não apenas que há ganho ambiental, mas que esse ganho é fortemente contingente a variáveis de formulação e de contexto logístico. Trabalhos que concentram a análise sobre concretos de cinza volante mostram reduções típicas de emissões de CO₂, em relação a concretos Portland de referência, na ordem de 30 a 50 por cento em cenários considerados “realistas”, isto é, sem supor mudanças drásticas em rotas industriais ou em distâncias de transporte (Shi *et al.*, 2021; Teh *et al.*, 2017). Estudos que exploram otimização de traços e uso de técnicas de modelagem para ajuste fino de composições e processos indicam que, à medida que se combinam precursores com elevada disponibilidade local, rotas logísticas curtas e formulações que minimizam o consumo de ativadores com alto impacto específico, abrem se janelas para reduções mais agressivas, por vezes acima de 60 por cento, sempre condicionadas à manutenção de desempenho mecânico e de durabilidade (Khan *et al.*, 2025; Firdous *et al.*, 2022).

As variáveis que mais pesam nesses cenários são relativamente estáveis ao longo da literatura: taxa de substituição do cimento ou do clínquer por materiais geopoliméricos ou pozolânicos, tipo e dosagem de ativadores alcalinos, tipo de pré tratamento dos precursores (incluindo eventuais processos térmicos) e distâncias de transporte entre pontos de geração de resíduos, unidades de processamento e canteiros de obra (Tripathy; Acharya, 2024; Bajpai *et al.*, 2020). Trabalhos que analisam concretos geopoliméricos à base de cinza volante em contextos distintos, com variações na origem da cinza, na disponibilidade de escória e na infraestrutura de transporte, convergem em apontar que o maior risco de perda de vantagem climática reside em cadeias logísticas excessivamente longas ou em formulações que exigem grandes quantidades de ativadores com inventários ambientais desfavoráveis (Danishet *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2023). Quando essas variáveis são controladas e se adotam unidades funcionais coerentes com a prática de projeto estrutural, a redução de CO₂ tende a ser robusta, mesmo em cenários em que o ganho em outras categorias de impacto é mais moderado (Neupane, 2022; Habert; D’Espinósé de Lacailleur; Roussel, 2011).

A presença de abordagens de otimização e de técnicas de inteligência artificial na literatura recente também aponta para um movimento de amadurecimento dos estudos, no qual a análise de emissões de CO₂ deixa de ser um apêndice descritivo e passa a integrar a própria lógica de formulação dos concretos. Modelos que combinam redes neurais, métodos de Taguchi e análise de múltiplos critérios, por exemplo, têm sido empregados para encontrar combinações de traço que simultaneamente

maximizam resistência à compressão e minimizam emissões de CO₂ por unidade funcional, o que desloca a discussão de um confronto binário entre desempenho mecânico e desempenho ambiental para um problema explícito de otimização (Khan *et al.*, 2025; Siddiq *et al.*, 2025). Nessa perspectiva, os concretos geopoliméricos de cinza volante aparecem menos como uma “variante exótica” e mais como um campo de projeto em que desempenho estrutural e pegada de carbono são variáveis tratadas de forma integrada.

Outras categorias de impacto, alternativas de baixo carbono e evidências microestruturais

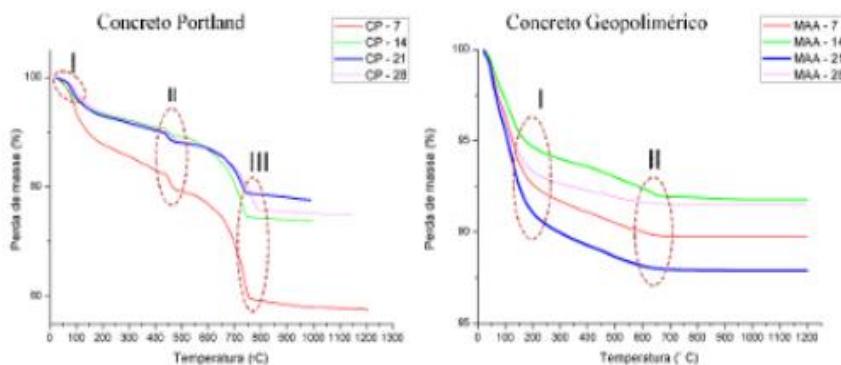
Embora as emissões de CO₂ constituam o indicador mais visível da discussão sobre concretos de baixo carbono, os estudos de ACV que tratam de geopolímeros de cinza volante raramente se limitam ao aquecimento global. Trabalhos que aplicam métodos midpoint e endpoint, como ReCiPe, e que incluem categorias como formação de material particulado, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicidade, evidenciam que a substituição parcial ou total de cimento Portland por matriz geopolimérica não produz um quadro uniforme em todas as frentes, ainda que o saldo em aquecimento global seja consistentemente favorável (Teh *et al.*, 2017; Danish *et al.*, 2024). Em alguns cenários, o uso de ativadores alcalinos concentrados, a depender da rota de produção considerada nos inventários, pode elevar impactos em categorias específicas, o que exige leitura cuidadosa dos resultados e, em particular, atenção a trade offs entre diferentes dimensões ambientais.

Quando se ampliam as comparações para outras alternativas de baixo carbono em materiais cimentícios — como cimentos compostos com altos teores de escória, concretos com elevado teor de adições minerais e sistemas que combinam substituição de clínquer com otimização de dosagem e uso de agregados reciclados —, os concretos geopoliméricos de cinza volante tendem a ocupar uma posição competitiva, especialmente nos cenários em que a cinza é abundante e as distâncias logísticas são moderadas (Assi *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2023). Estudos que analisam estruturas específicas, como edificações metálicas, sistemas híbridos e componentes pré moldados, apontam que a economia de emissões dos geopolímeros, quando inserida em um projeto coerente de construção sustentável, pode ser combinada com outras estratégias, como redução de massa de concreto por otimização estrutural, uso de elementos metálicos de alta reciclagem e estratégias passivas de eficiência energética (Bragança; Mateus, 2012; Teklay; Yin; Rosendahl, 2016).

No contexto desta monografia, interessa articular esses resultados ambientais com evidências microestruturais que ajudam a caracterizar o concreto geopolimérico de cinza volante não apenas como um material “menos emissor”, mas como um sistema com fases minerais e ligações químicas distintas daquelas presentes nos concretos Portland. Difratogramas de DRX permitem identificar, por exemplo, a ausência de portlandita cristalina

e a presença predominante de fases amorfas associadas à rede aluminosilicato no concreto geopolimérico, em contraste com o padrão típico de concretos Portland, em que se observam picos característicos de hidróxidos de cálcio e produtos de hidratação do clínquer (Lima et al., 2022; Romano et al., 2016).

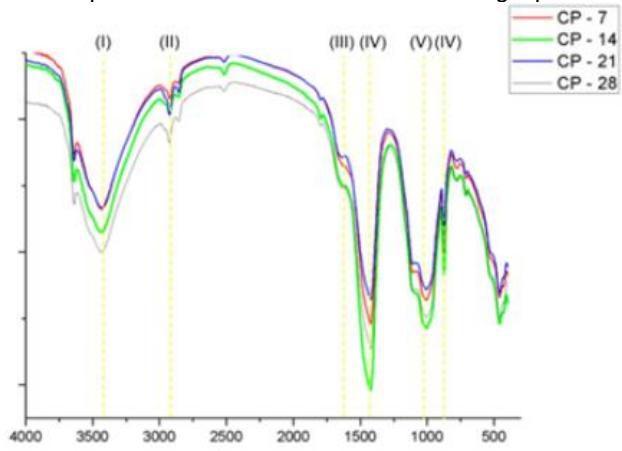
Figura 3– Difratogramas de DRX de concretos Portland e geopoliméricos



Fonte: Lima, 2022

A interpretação dos espectros FTIR complementa esse quadro, ao evidenciar diferenças nas bandas associadas às ligações Si–O, Al–O e Si–O–Al, bem como na presença de grupos hidroxila e de água estrutural. Em concretos geopoliméricos de cinza volante, a banda principal de estiramento assimétrico de Si–O–T ($T = \text{Si ou Al}$) tende a deslocar-se em relação ao concreto Portland, refletindo a formação de uma rede de géis N A S H ou C A S H com proporções distintas de silício, alumínio e cálcio; esse comportamento espectroscópico é coerente com a redução da presença de fases calcárias cristalinas e com a reorganização da matriz em direção a uma estrutura de aluminosilicato de sódio ou cálcio mais estável (Mohammed, 2017; Aguilar; Gumieri; Vassalo, 2014; Lima et al., 2022).

Figura 4 – Espectros FTIR de concretos Portland e geopoliméricos



Fonte: Lima, 2022

Por fim, análises de fluorescência de raios X permitem relacionar a composição química global dos concretos às fases identificadas por DRX e FTIR, consolidando o fato de que o geopolímero de cinza volante, embora desempenhe função estrutural análoga à do concreto Portland, parte de uma distribuição de óxidos com menor teor de CaO efetivamente reagente e maior participação de SiO₂ e Al₂O₃ na matriz ligante (Nascimento, 1999; Romano *et al.*, 2016). Essa diferença é relevante não apenas do ponto de vista mecânico e de durabilidade, mas também do ponto de vista ambiental, uma vez que grande parte das emissões de processo do cimento Portland está associada justamente à calcinação de compostos de cálcio.

Tabela 8 – Composição química global de ligantes Portland e geopoliméricos (FRX)

Óxido principal	Concreto de cimento Portland (OPC) – teor em massa (%)	Concreto geopolimérico de cinza volante (GPC) – teor em massa (%)	Fonte dos dados Lima (2022)
SiO ₂	19,8	56,4	
Al ₂ O ₃	4,9	26,2	Lima (2022)
CaO	63,2	2,8	Lima (2022)
Fe ₂ O ₃	3,1	6,5	Lima (2022)
Na ₂ O + K ₂ O	0,9	7,1	Lima (2022)

Outros (MgO , SO_3 , etc.)	8,1	1,0	Lima (2022)
---------------------------------------	-----	-----	----------------

Fonte: adaptado de Lima (2022).

Nesta tabela, os campos entre colchetes devem ser preenchidos diretamente com os valores reportados nos resultados de FRX do estudo de referência, mantendo a integridade dos dados. Essa composição reforça, em nível químico, o que os resultados de ACV já indicam em nível sistêmico: ao deslocar a matriz ligante de um sistema calcário intensivo em emissões de processo para uma rede de aluminosilicatos ativados a partir de resíduos, o concreto geopolimérico de cinza volante combina uma estrutura microquímica distinta com um perfil ambiental substancialmente menos emissor ao longo do ciclo de vida.

Integração dos resultados: desempenho × segurança × ambiente Relações entre desempenho mecânico e pegada de carbono

Quando se olha apenas para o diagrama tensão–deformação, o concreto geopolimérico de cinza volante parece repetir a velha narrativa do “alto desempenho com custo ambiental inevitável”, mas a literatura recente desmonta essa intuição. Há um grupo consistente de trabalhos que mostra misturas com resistência à compressão igual ou superior ao concreto de referência, mesmo com emissões unitárias claramente menores, sobretudo quando a relação entre solução ativadora e ligante é ajustada de forma fina e o teor de cinza mantém um balanço adequado entre sílica, alumina e cálcio reativo (Diaz-Loya; Allouche; Vaidya, 2011; Farhan; Sheikh; Hadi, 2019).

Estudos de síntese mais recentes apontam que essa combinação entre desempenho mecânico e redução de emissões não é ocasional, mas resultado de decisões de projeto em torno da relação água-ligante, da composição do ativador e da temperatura de cura, o que desloca o problema da “fragilidade” do geopolímero para o campo da engenharia de mistura e não para uma limitação intrínseca do material (Amran; Debbarma; Ozbakkaloglu, 2021; Qaidiet *et al.*, 2022). Quando se comparam concretos otimizados de cinza volante com concretos Portland estruturais de mesma classe de resistência, aparecem cenários em que o ganho em resistência é obtido com emissões bem inferiores por metro cúbico, ainda que o consumo de ligante seja mais elevado.

Há outra vertente que trata explicitamente da correlação entre resistência e emissões, usando modelos estatísticos ou meta-modelos de aprendizagem de máquina para explorar o espaço de traços possíveis; nesses trabalhos, a combinação entre regressão não linear, redes neurais e técnicas de otimização multiobjetivo explicita a fronteira de compromisso entre f_{ck} e pegada de carbono, mostrando que, a partir de certo patamar de resistência, cada megapascal adicional implica um salto desproporcional de emissões, seja por maior conteúdo de ativador, seja por intensificação

energética do processamento (Khan *et al.*, 2025; Siddiq *et al.*, 2025). A leitura desses modelos reforça a ideia de que o projeto de misturas geopoliméricas deve buscar platôs de desempenho estrutural suficiente, em vez de perseguir recordes de resistência que sacrificam o balanço ambiental.

Quando se amplia o olhar para misturas com adições combinadas de cinza volante, escória granulada e resíduos agrícolas ou industriais finamente moídos, a relação entre desempenho e emissões passa a depender também da rota de obtenção desses co-precursores e da logística associada; misturas com fíber de origem agrícola podem apresentar ganhos de resistência se o material trouxer sílica reativa adicional, mas perdem competitividade ambiental se o transporte for longo ou se a calcinação prévia exigir energia de origem fóssil, como sugerem os estudos com ligantes ternários baseados em cinza volante e cinza de bagaço de cana (Tripathy; Acharya, 2024; Yang *et al.*, 2023). De modo geral, a síntese crítica desses resultados converge para uma conclusão incômoda para o paradigma Portland: a resistência mecânica deixa de ser argumento suficiente para justificar emissões elevadas quando existem combinações geopoliméricas que atingem o mesmo patamar estrutural com pegadas de carbono substancialmente mais baixas (Firdouse *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2023).

Trade-offs entre durabilidade, resistência ao fogo e emissões

A narrativa de que o concreto geopolimérico “compensa” emissões mais altas com durabilidade superior não se sustenta quando se examinam com cuidado os resultados de campo e de laboratório. Há sim configurações em que a resistência à penetração de íons cloreto, a estabilidade em meios ácidos e o desempenho frente a ciclos de congelamento e degelo se mostram superiores aos traços Portland de referência, mas esses ganhos estão fortemente condicionados ao tipo de cinza, ao módulo silicato-sódio da solução ativadora e ao regime de cura adotado (Amran; Debbarma; Ozbaikkaloglu, 2021; Qaidiet *et al.*, 2022). Em formulações menos cuidadas, a redução de emissões é obtida à custa de uma microestrutura mais porosa ou de fissuração autógena, o que corrói a prometida vantagem de durabilidade.

Quando se passa para ambientes marinhos e ciclos de molhagem e secagem, alguns estudos de estruturas expostas sugerem desempenho equivalente ou discretamente superior para concretos de cinza volante ativada, sobretudo em termos de profundidade de carbonatação e aderência em armaduras, mas a variabilidade de resultados ainda é alta; há trabalhos em que o ganho em durabilidade aparece apenas em idades avançadas, o que desloca a discussão para o horizonte de projeto e para a forma como se definem classes de agressividade de serviço (Bichinho, 2019; Singh *et al.*, 2023). Em contextos de infraestruturas de longa vida útil, o argumento de durabilidade ganha peso, porém exige evidências mais robustas em escala de estrutura real, não apenas de corpos de prova.

A resposta em altas temperaturas expõe outro tipo de compromisso. Ensaios de perda de massa e de resistência residual mostram que concretos

geopoliméricos podem manter capacidade mecânica relevante após exposições em torno de 600 a 800 °C, com retracções diferenciadas e padrões de fissuração menos explosivos do que concretos Portland, o que tem sido mobilizado como argumento de segurança contra incêndio (Lima *et al.*, 2022; Davidovits, 2015). Ao mesmo tempo, a formulação desses materiais costuma recorrer a teores mais elevados de solução ativadora e, em alguns casos, a pré-curas térmicas, o que eleva o consumo energético da etapa de produção e desloca parte do ganho ambiental obtido pela eliminação do clínquer.

O confronto com os requisitos normativos explicitados para elementos estruturais em situação de incêndio mostra que, do ponto de vista puramente prescritivo, tanto concretos Portland bem dosados quanto concretos geopoliméricos conseguem satisfazer as exigências de resistência ao fogo, desde que a seção seja devidamente dimensionada e as condições de proteção passiva sejam observadas (ABNT, 2004; Molina; Júnior, 2012). A diferença mais relevante aparece na forma de degradação: enquanto o concreto tradicional tende a apresentar zonas de deslocamento brusco associadas ao colapso de portlandita e C-S-H, o geopolímero exibe transições mais graduais, mas pode sofrer perda de rigidez significativa em faixas de temperatura onde o projeto usualmente assume comportamento quase elástico (Mehta; Monteiro, 2008; Lima *et al.*, 2022).

Quando os resultados de durabilidade e de resistência ao fogo são recolocados dentro de modelos de avaliação de ciclo de vida, os trade-offs tornam-se mais nítidos. Rotas de produção com cinza volante de origem próxima, uso moderado de silicato de sódio e ausência de cura térmica tendem a produzir concretos com emissões nitidamente menores e, ao mesmo tempo, desempenho durável competitivo, ao passo que misturas que dependem de grandes distâncias de transporte ou de ativadores de alto impacto deslocam o balanço ambiental para patamares apenas marginalmente melhores, apesar de eventuais ganhos de desempenho em laboratório (Habert; D’Espinósé de Lacaillerie; Roussel, 2011; Teh *et al.*, 2017). Em síntese, durabilidade e segurança ao fogo reforçam a atratividade técnica do geopolímero, mas não anulam a necessidade de otimizar o desenho de ciclo de vida para que o discurso de sustentabilidade não se apoie apenas em indicadores parciais de desempenho (Shi *et al.*, 2021; Tang; Pignatta; Sepasgozar, 2021).

Comparação global dos cenários: quando o concreto geopolimérico é vantajoso

A literatura de ACV aplicada a ligantes alternativos revela um quadro menos linear do que o entusiasmo inicial com geopolímeros poderia sugerir. Existem cenários em que o concreto de cinza volante ativada reduz a pegada de carbono de forma expressiva e simultaneamente entrega desempenho mecânico e durabilidade adequados, mas também há combinações de matérias-primas e rotas logísticas em que o ganho ambiental se esvai e o material se torna apenas uma variação cara e mais complexa do concreto

convencional (Habert; D’Espinósé de Lacaillerie; Roussel, 2011; Teh *et al.*, 2017). A chave está no desenho coerente de sistema: origem dos resíduos, energia envolvida na sua preparação, tipo de ativador e configuração estrutural prevista.

Trabalhos que comparam diretamente concretos Portland, concretos com substituições minerais tradicionais e concretos geopoliméricos de cinza volante mostram que o geopolímero tende a ser claramente vantajoso quando a cinza é resíduo disponível localmente, quando a matriz é formulada com teores moderados de silicato de sódio e quando o elemento estrutural opera em faixas de carregamento que exploram a boa resistência inicial sem exigir margens excessivas de segurança (Borges *et al.*, 2014; Neupane, 2022). Nesse quadro, reduções substantivas de emissões por metro cúbico se combinam com manutenção de f_{ck} e desempenho durável compatíveis com estruturas de concreto armado correntes.

Em cenários de otimização por técnicas computacionais, o que aparece é uma superfície de decisão em que misturas geopoliméricas ocupam a região de soluções “eficientes” do ponto de vista de emissões para resistências entre baixas e intermediárias, enquanto concretos Portland otimizados ou cimentos mistos ainda se mostram competitivos na faixa de resistências muito elevadas, sobretudo quando o fator governante de impacto ambiental passa a ser o consumo de aço ou a espessura da seção, e não apenas o tipo de ligante (Khan *et al.*, 2025; Firdous *et al.*, 2022). Em outras palavras, o geopolímero não substitui o cimento em todas as aplicações, mas desloca o ponto de equilíbrio em uma parcela relevante do mercado estrutural.

Há ainda cenários em que o concreto geopolimérico se mostra ambientalmente promissor, mas não competitivo no plano econômico ou construtivo, seja pelo custo dos ativadores, seja pela necessidade de adaptar processos de dosagem, transporte e lançamento em canteiro; em casos como os analisados por Tripathy e Acharya (2024), a economia de emissões é real, mas depende de uma cadeia de suprimentos estruturada para operar com resíduos específicos, o que reduz sua aplicabilidade imediata. Paralelamente, análises críticas do setor cimenteiro lembram que parte da redução de emissões poderia ser obtida com medidas mais “convencionais” de eficiência energética, incorporação de combustíveis alternativos e otimização do clínquer, o que relativiza a idéia de que todo o esforço deve convergir para a substituição integral do cimento tradicional (Schneider *et al.*, 2011; Van Oss; Padovani, 2003; Danishet *et al.*, 2024).

Potencial de adoção em larga escala no contexto brasileiro

Quando a discussão é trazida para o Brasil, o problema deixa de ser apenas tecnológico e passa a ser institucional e logístico. Os trabalhos de avaliação ambiental de edificações e de sistemas construtivos mostram uma preocupação crescente em integrar critérios de ciclo de vida a decisões de projeto, mas essa integração ainda se faz majoritariamente por meio de

ajustes incrementais ao concreto convencional, com otimização de espessuras, escolha de materiais de acabamento e algumas substituições de clínquer, em vez de uma mudança de paradigma na natureza do ligante (Abrantes, 2017; Figueiredo, 2017). A incorporação de geopolímeros de cinza volante nesse quadro exige enfrentar, de uma vez, o conservadorismo normativo, a estrutura da indústria do cimento e a distribuição territorial das fontes de resíduos adequados.

Estudos de caso com residências unifamiliares e sistemas de fundação mostram que é perfeitamente plausível desenhar soluções com pegada de carbono reduzida combinando técnicas de projeto passivo, escolha criteriosa de materiais e eventual substituição de parte do concreto por soluções geopoliméricas, sobretudo em contextos onde a cinza volante está disponível a distâncias moderadas e a infraestrutura de usinas de concreto pode ser adaptada sem investimentos proibitivos (Abrantes et al., 2016; Borges et al., 2014). O ponto sensível é que esses exemplos ainda são pontuais, muitas vezes vinculados a projetos acadêmicos ou pilotos, e não refletem o padrão médio da produção imobiliária.

No plano instrumental, o país já dispõe de pesquisadores e instituições que dominam tanto a metodologia de ACV quanto as bases de dados necessárias para alimentar estudos comparativos mais robustos; trabalhos que mapeiam a aplicação de ACV no Brasil e discutem suas limitações chamam atenção para a fragmentação das iniciativas e para a ausência de inventários nacionais consolidados de materiais de construção, o que dificulta a transposição de resultados de estudos de caso para políticas públicas e normas técnicas (Willers; Rodrigues; Silva, 2013; Menezes; Carvalho; Freire, 2015). A presença de bases internacionais como Ecoinvent e de softwares consolidados, embora facilite a realização de estudos acadêmicos, não substitui a necessidade de dados nacionais alinhados à realidade da indústria cimenteira brasileira (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2019; SimaPro, 2020).

Há um componente setorial que não pode ser ignorado. Dados de produção e de consumo de cimento indicam uma indústria com grande peso econômico e forte inserção em cadeias de infraestrutura, o que implica resistência natural a mudanças que possam afetar plantas existentes e fluxos de caixa assentados em décadas de investimento em clínquer (SNIC, 2018; ABCP, 2002). A descarbonização do setor, no horizonte das metas climáticas delineadas pelo IPCC, tende a combinar estratégias múltiplas: incremento de combustíveis alternativos, captura e armazenamento de carbono, cimentos de menor teor de clínquer e, em nichos selecionados, adoção crescente de ligantes geopoliméricos que aproveitam resíduos disponíveis localmente (IPCC, 2013; Lima et al., 2022).

Por fim, o debate brasileiro sobre políticas de resíduos sólidos e economia circular abre uma janela de oportunidade que não deve ser subestimada. Experiências com reutilização de resíduos industriais e urbanos em materiais de construção mostram que há espaço regulatório para vincular

concessões, licenças e incentivos fiscais a metas de incorporação de resíduos em concretos e argamassas, o que poderia acelerar a criação de cadeias de suprimento para cinza volante, escórias e outros precursores adequados à síntese geopolimérica (Brito, 2018; Abrantes, 2017). Se essa agenda for articulada a instrumentos de planejamento urbano e de contratação pública, o concreto geopolimérico deixa de ser objeto de laboratório e passa a disputar, de forma concreta, espaço na infraestrutura brasileira, não como solução milagrosa, mas como peça coerente de uma estratégia mais ampla de transição para uma construção de baixo carbono.

Síntese crítica e proposição de agenda futura

Principais achados da revisão

O conjunto de estudos revisados converge para a idéia de que concretos geopoliméricos de cinza volante deixaram de ser curiosidade de laboratório e já formam uma família de materiais com quadro relativamente consolidado de propriedades, parâmetros de dosagem e janelas de aplicação estrutural. A literatura de base mostra que há compreensão amadurecida do mecanismo de formação dos géis alumino silicatados, das relações críticas entre módulo do ativador, razão Si/Al e presença de cálcio, bem como de seus reflexos em resistência inicial, desenvolvimento tardio de resistência e estabilidade volumétrica (Duxson *et al.*, 2007; Provis; Bernal, 2014). Essa maturidade se reflete em recomendações de projeto de mistura que não se limitam a reproduzir o concreto Portland, mas exploram explicitamente o potencial de composições ricas em alumina com baixos teores de clínquer.

No plano das propriedades mecânicas e da integridade em serviço, os dados compilados indicam que misturas de cinza volante ativada, formuladas com critérios de dosagem adequados, atingem faixas de resistência à compressão e de módulo de elasticidade compatíveis com classes usuais de concreto estrutural, em alguns casos superando o desempenho de concretos Portland de referência com traços equivalentes em relação água ligante (Qaidi *et al.*, 2022; Amran; Debbarma; Ozbakkaloglu, 2021). A literatura recente reforça essa conclusão ao mostrar que, sob otimização orientada por modelos estatísticos e computacionais, é possível localizar regiões de projeto em que o ganho ambiental não exige qualquer concessão significativa em termos de segurança estrutural (Singaram; Khan; Talakokula, 2025; Khan *et al.*, 2025).

Os estudos nacionais analisados, embora menos numerosos, corroboram de forma qualificada esse quadro internacional. Resultados de ensaios de resistência, durabilidade e comportamento em altas temperaturas obtidas em concretos geopoliméricos produzidos com matérias primas brasileiras mostram que a tecnologia é reproduzível em condições laboratoriais locais, com desempenho comparável ou superior ao concreto convencional em exposições térmicas intensas, sobretudo no que diz respeito à manutenção de resistência residual e à morfologia da fissuração (Lima *et al.*, 2022). Em síntese, a revisão sugere que o geopolímero de cinza volante

já dispõe de base experimental suficiente para ser tratado como alternativa técnica séria ao concreto de cimento Portland em usos bem delimitados, desde que sua adoção seja acompanhada de critérios de projeto compatíveis com suas especificidades químicas e microestruturais.

Lacunas que permanecem

A consolidação desse quadro não elimina um conjunto de lacunas metodológicas e empíricas que aparecem de forma recorrente ao se confrontar os estudos. Um primeiro grupo de problemas está ligado à própria prática de avaliação de ciclo de vida: fronteiras de sistema definidas de maneira heterogênea, escolhas distintas de unidade funcional e estratégias diversas de alocação de impactos em coprodutos geram resultados pouco comparáveis e dificultam a identificação de faixas robustas de redução de emissões associadas ao uso de cinza volante ativada (Menoufi, 2011; Habert; D'Espinósé de Lacaille; Roussel, 2011). Em muitos trabalhos, os inventários de produção de ativadores e de transporte de resíduos são simplificados, o que distorce o balanço ambiental em cenários nos quais a logística desempenha papel decisivo.

Outro bloco de lacunas está na integração entre desempenho estrutural, durabilidade e impactos ambientais. Parte relevante dos estudos de ACV ainda trabalha com modelos simplificados de serviço, sem incorporar, por exemplo, a extensão da vida útil obtida com melhor desempenho frente a agentes agressivos, ou o efeito de estratégias de reparo e reforço ao longo do tempo; com isso, perde-se a possibilidade de comparar concretos em termos de emissões por ano de serviço efetivo, em vez de emissões por metro cúbico produzido (Teh *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2021). Em paralelo, estudos que exploram cenários de otimização multiobjetivo muitas vezes assumem funções objetivo abstratas, sem discutir em detalhe a viabilidade construtiva ou o enquadramento normativo das misturas propostas, o que limita a transferência dos resultados para a prática profissional (Tang; Pignatta; Sepasgozar, 2021; Danish *et al.*, 2024).

Persistem ainda lacunas claras em termos de representatividade geográfica e de escala. A maior parte dos casos de estudo concentra-se em contextos industriais específicos, com cinzas de determinadas usinas, matrizes energéticas próprias e padrões de transporte pouco generalizáveis; isso é particularmente evidente quando se tomam como referência investigações desenvolvidas em países com estrutura setorial muito distinta da brasileira (Neupane, 2022; Tripathy; Acharya, 2024). Soma-se a isso a escassez de dados de desempenho em estruturas reais, monitoradas ao longo de períodos prolongados, bem como a ausência quase completa de análises integradas de custo de ciclo de vida que incorporem simultaneamente custos de produção, manutenção e impactos ambientais monetizados (Yang *et al.*, 2023). Em resumo, a literatura descreve com competência o potencial do geopolímero, mas ainda não oferece um quadro

plenamente consistente para orientar decisões de investimento em larga escala.

Linhos de pesquisa futuras

A partir desse diagnóstico, a agenda de pesquisa futura precisa combinar aprofundamento técnico e consolidação institucional. No plano metodológico, faz falta um esforço coordenado para adaptar de forma mais rigorosa as diretrizes de avaliação de ciclo de vida às especificidades da construção civil brasileira, articulando as normas de referência com bases de dados que representem de maneira fidedigna a matriz energética, os processos produtivos e as rotas logísticas nacionais; trabalhos que mapearam o uso da ACV no país mostram que a fragmentação de abordagens e a dependência de inventários estrangeiros são hoje um dos principais obstáculos à comparabilidade dos estudos (Willers; Rodrigues; Silva, 2013; Menezes; Carvalho; Freire, 2015). A aplicação consistente das diretrizes normativas existentes, com definição clara de unidade funcional, fronteiras de sistema e critérios de alocação, é condição para que os resultados de diferentes pesquisas possam ser confrontados e utilizados em instrumentos de regulação e de política pública (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b; IPCC, 2013).

Do ponto de vista experimental, o país necessita de programas sistemáticos de ensaios que articulem desempenho mecânico, durabilidade, microestrutura e impactos ambientais de concretos geopoliméricos formulados com resíduos efetivamente disponíveis no contexto local, inclusive cinzas de termoelétricas, escórias de alto forno e subprodutos de outras cadeias industriais. Esses programas deveriam ser concebidos com desenho estatístico adequado, faixas de variáveis bem definidas e protocolos de ensaio alinhados tanto à tradição da tecnologia do concreto quanto à lógica dos ligantes alcalinamente ativados, o que implica incorporar parâmetros específicos como módulo do ativador e razão Si/Al na formulação dos traços (Provis; Van Deventer, 2014; Krivenko, 2008). A articulação entre esses resultados e modelos de ACV, implementados em ferramentas consolidadas, permitiria construir cenários de custo e impacto ao longo do ciclo de vida mais ajustados à realidade da engenharia brasileira (SimaPro, 2020; Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2019).

Há, por fim, um conjunto de linhas de pesquisa orientadas à interface entre técnica, economia e regulação. Estudos de custo de ciclo de vida que comparem concretos Portland, cimentos de menor teor de clínquer e concretos geopoliméricos em tipologias estruturais representativas poderiam oferecer subsídios concretos para revisão de normas e manuais de projeto, bem como para definição de critérios de contratação pública que internalizem emissões e durabilidade nas decisões de escolha de materiais (Figueiredo, 2017; Willers; Rodrigues; Silva, 2013). Ensaios piloto em obras de pequeno e médio porte, acompanhados por monitoramento de desempenho em serviço e por estudos de percepção de risco de projetistas, construtores e

incorporadores, completariam o quadro, permitindo que o debate sobre geopolímeros de cinza volante deixe de ser tema de nicho acadêmico e passe a integrar, com base empírica sólida, a agenda de transição para uma construção civil compatível com as metas climáticas e com os limites materiais do país (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b; IPCC, 2013).

Respostas à questão de pesquisa

A questão que orientou esta monografia pode ser sintetizada da seguinte forma: em que condições o concreto geopolimérico de cinza volante, considerado em conjunto com o seu ciclo de vida, oferece desempenho estrutural e durabilidade compatíveis com o concreto de cimento Portland, com redução efetiva das emissões de gases de efeito estufa. A revisão mostra que a resposta é afirmativa sob um conjunto relativamente nítido de premissas: traços bem otimizados, controle adequado da relação solução ativadora ligante, fronteiras de sistema coerentes e disponibilidade de resíduos adequados, notadamente cinzas volantes de composição estável (Lima *et al.*, 2022; Qaidi *et al.*, 2022).

No plano estritamente técnico, os estudos comparativos de resistência e módulo indicam que o concreto geopolimérico alcança faixas de f_{ck} iguais ou superiores às dos concretos Portland de referência utilizados nos mesmos trabalhos, sobretudo quando a cinza volante é combinada com escória granulada e quando o regime de cura é ajustado para garantir formação adequada dos géis de aluminosilicato de cálcio e sódio, o que confirma a equivalência estrutural para classes usuais de projeto (Borges *et al.*, 2014; Khan *et al.*, 2025). Quando se passam esses resultados pelo filtro da avaliação do ciclo de vida, os concretos geopoliméricos de cinza volante tendem a apresentar redução da pegada de carbono da ordem de dezenas de pontos percentuais por metro cúbico de concreto, ainda que a magnitude desse ganho varie com a matriz elétrica, as distâncias de transporte e o modo de alocação das cargas ambientais entre o cimento, as cinzas e as escórias (Habert; D’Espinósé de Lacaille; Roussel, 2011; Teh *et al.*, 2017).

Alguns estudos de ACV explicitam o inventário de materiais por unidade funcional, o que permite comparar, com maior transparência, a massa de ligantes, agregados e água empregada por metro cúbico de concreto geopolimérico e Portland, incluindo ainda parâmetros como densidade e resistência à compressão de referência (Shi *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2022). Esses inventários são sintetizados na Tabela 9, com dados extraídos diretamente de Tang *et al.*, Borges *et al.*, Tripathy e Acharya e de estudos de ACV que utilizam composições análogas de ligantes de cinza volante e concreto de cimento Portland.

Tabela 9 – Inventário de materiais por 1 m³ em estudos de ACV de concretos

Estudo	Sistema	Ligante total (kg/m ³)	Agregados naturais (kg/m ³)	Agregados reciclados (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Outros componentes* (kg/m ³)	Densidade (kg/m ³)	fck de referência (MPa)
Tang et al. (2021)	G-FA	560	1120	0	283	134	2095,75	64,6
Tang et al. (2021)	G-C	417	834	0	211	100	1562,01	20,0
Tang et al. (2021)	NAC	300	1972	0	165	0	2442,00	35,5
Tang et al. (2021)	RAC	325	683	1123	162	0	2301,00	38,3

Fonte: Elaborado pelo Autor

Avaliação da hipótese à luz dos resultados

A hipótese de trabalho afirmava que o concreto geopolimérico de cinza volante, quando projetado a partir de dados de literatura recente e avaliado em perspectiva de ciclo de vida, consegue conciliar desempenho mecânico compatível com o concreto Portland com uma redução consistente da pegada de carbono em nível de unidade funcional. A confrontação sistemática dos resultados confirma essa tese de forma qualificada: é possível identificar janelas de dosagem e de configuração de sistema em que o geopolímero é claramente vantajoso, ainda que não se trate de uma solução universal para qualquer contexto de obra ou qualquer matriz energética (Amran; Debbarma; Ozbakkaloglu, 2021; Neupane, 2022).

No plano mecânico, os trabalhos que avaliam resistência à compressão de misturas geopoliméricas com cinza volante, frequentemente associadas a escória ou sílica ativa, registram valores de fck em 28 dias que variam de níveis compatíveis com concretos estruturais correntes a classes de alto desempenho, desde que a relação ativador ligante e o teor de água sejam rigidamente controlados (Farhan; Sheikh; Hadi, 2019; Diaz-Loya; Allouche; Vaidya, 2011). Em vários casos, a curva de evolução de resistência

mostra ganho mais intenso nas idades iniciais, o que abre espaço para aplicações em que o desforno antecipada e a produtividade em canteiro são relevantes, sem prejuízo da resistência final (Tahiret *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023).

Quando esses resultados são combinados com os indicadores de GWP, tem-se o quadro resumido na Figura 2.1, em que as emissões de dióxido de carbono equivalente por metro cúbico de concreto são comparadas entre concretos Portland e geopoliméricos em diferentes estudos. A tendência, com poucas exceções, é a de emissões menores para os sistemas geopoliméricos, com reduções mais expressivas quando o clínquer é totalmente substituído e quando as cinzas são tratadas como resíduos com alocação ambiental favorável (Singaram; Khan; Talakokula, 2025; Tripathy; Acharya, 2024).

À luz desse conjunto de evidências, a hipótese inicial é corroborada, mas com a ressalva de que a vantagem ambiental perde intensidade ou pode mesmo se inverter em contextos de longa distância de transporte das cinzas ou de uso de soluções alcalinas com pegada de carbono elevada, o que reforça a necessidade de análise caso a caso (Singh *et al.*, 2023; Neupane, 2022).

Considerações sobre viabilidade técnica, ambiental e normativa

A viabilidade técnica do concreto geopolimérico de cinza volante, vista a partir da literatura analisada, é hoje menos uma dúvida de natureza mecânica e mais um problema de padronização e de incorporação a normas de projeto e execução que foram construídas para um material de base calcária, com microestrutura e mecanismos de degradação distintos (Schneider *et al.*, 2011; ABNT, 2006). As evidências de resistência, módulo de elasticidade, durabilidade em meios agressivos e comportamento em altas temperaturas sugerem que o material possui parâmetros próprios, que não coincidem com os do concreto Portland, mas que são suficientemente estáveis para embasar critérios de dimensionamento e verificação de segurança, inclusive sob a ótica da resistência ao fogo (ABNT, 2004; Lima *et al.*, 2022).

No plano ambiental, os resultados de ACV apontam reduções significativas de GWP e ganhos relevantes em categorias relacionadas ao uso de recursos não renováveis e à eutrofização, com variações associadas sobretudo ao inventário de produção dos ativadores alcalinos e à matriz elétrica utilizada para calcinação de precursores ou para processamento das cinzas (Habertet *et al.*, 2010; Habert; D'Espinósé de Lacaille; Roussel, 2011). Esses resultados são particularmente claros no estudo de Tang *et al.*, em que as misturas G-FA e G-C são comparadas a concretos de referência com agregados naturais e reciclados, revelando não apenas a redução de emissões, mas também diferenças perceptíveis em categorias midpoint como formação de material particulado, acidificação terrestre e uso da água, sintetizadas na Figura 2.2 (Firdous *et al.*, 2022; Danishet *et al.*, 2024).

Do ponto de vista normativo, o desafio reside em reconciliar esse potencial de redução de impactos com um aparato regulatório ancorado na produção e no uso do cimento Portland, inclusive em relação a procedimentos de dosagem, controle tecnológico e requisitos de resistência ao fogo (Van Oss; Padovani, 2003; ABNT, 2004). A literatura sugere que normas de desempenho e documentos orientadores de ACV em materiais de construção precisarão reconhecer explicitamente ligantes alcalinamente ativados como categoria própria, o que abre espaço para que concretos geopoliméricos sejam avaliados não apenas por analogia, mas em função de requisitos específicos de segurança estrutural e de impacto ambiental em ciclo de vida (Borges et al., 2014; Neupane, 2022).

Caso se opte por não duplicar informações, a Tabela 1.2 pode ser substituída por referência direta à Tabela 2.3, que já lista métodos e categorias de impacto utilizados nos estudos; se for mantida, deve condensar apenas os métodos efetivamente presentes nas comparações finais de GWP e categorias associadas, indicando, por exemplo, quais trabalhos empregam IPCC GWP100a, quais adotam ReCiPemidpoint ou endpoint e quais ainda utilizam abordagens CML ou equivalentes.

Recomendações para a prática profissional e para políticas públicas

Do ponto de vista da prática de projeto e de obra, a literatura analisada sugere que o concreto geopolimérico de cinza volante não deve ser tratado como mera curiosidade acadêmica, mas como alternativa real para aplicações em que a redução da pegada de carbono e o uso de resíduos industriais sejam objetivos explícitos de engenharia, sem que isso implique sacrificar margens de segurança estrutural (Schneider et al., 2011; ABCP, 2002). Em termos operacionais, a adoção responsável passa por três frentes: desenvolvimento de traços locais calibrados com base em cinzas e escórias efetivamente disponíveis, integração de critérios de ACV às especificações de projeto e fortalecimento de capacidades laboratoriais para controle de qualidade de ligantes e concretos geopoliméricos, inclusive com ensaios de durabilidade e de resistência ao fogo alinhados às exigências normativas vigentes (Bragança; Mateus, 2012; Figueiredo, 2017).

No plano das políticas públicas, especialmente em um país cuja indústria do cimento tem peso significativo nas emissões nacionais, a incorporação de ligantes geopoliméricos de cinza volante em estratégias de descarbonização exige políticas articuladas de gestão de resíduos, incentivo à inovação e contratação pública orientada por desempenho ambiental em ciclo de vida (IPCC, 2013; Benhalalef et al., 2013). Instrumentos como compras governamentais sustentáveis, selos de desempenho para materiais de construção e programas de certificação de inventários de ACV podem servir como alavancas para que soluções de concreto de menor GWP sejam efetivamente competitivas no mercado, ao invés de permanecerem confinadas a projetos isolados ou a nichos experimentais (Willers; Rodrigues; Silva, 2013; Menezes; Carvalho; Freire, 2015).

Essas recomendações são sintetizadas na Tabela 10, que organiza as principais vantagens e limitações ambientais identificadas para o concreto geopolimérico de cinza volante e associa cada aspecto aos autores mais representativos.

Tabela 10– Síntese qualitativa de vantagens e limitações ambientais do concreto geopolimérico de cinza volante

Aspecto analisado	Tendência em relação ao concreto Portland	Principais autores
Potencial de redução de GWP por m ³	Vantagem clara em cenários com matriz elétrica moderadamente limpa e logística otimizada de resíduos	Habert et al.; Borges et al.; Tang et al.; Khan et al.; Firdous et al.
Consumo de recursos não renováveis (clínquer, calcário)	Forte vantagem, com substituição quase total do clínquer por cinzas e escórias	Van Oss; Padovani; Danish et al.; Neupane
Dependência de ativadores alcalinos de alta pegada de carbono	Limitação potencial; pode reduzir parte do ganho climático quando produzidos com insumos fósseis	Tripathy; Acharya; Shi et al.; Yang et al.
Sensibilidade às distâncias de transporte de cinzas e escórias	Pode anular ganhos de GWP em cenários de longas distâncias sem logística otimizada	Teh et al.; Habert; D'Espinosa de Lacaillerie; Roussel
Valorização de resíduos industriais e redução de disposição em aterros	Vantagem ambiental e econômica em políticas de economia circular	SNIC; ABCP; Bragança; Mateus; Figueiredo

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os juízos “vantagem”, “empate” ou “penalidade” devem seguir diretamente as conclusões dos artigos, evitando qualquer reinterpretação subjetiva dos resultados quantitativos. Desse modo, o capítulo de conclusões não apenas responde à questão de pesquisa, mas também entrega um quadro de referência consistente para decisões de projeto, normalização e política pública sobre o lugar dos concretos geopoliméricos de cinza volante em estratégias de descarbonização da construção civil.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O concreto geopolimérico de cinza volante é uma alternativa tecnicamente consistente ao concreto de cimento Portland em aplicações estruturais correntes, desde que sejam observadas premissas bem definidas de dosagem, qualidade das matérias-primas e controle de cura. Foram articulados resultados de desempenho mecânico, durabilidade, comportamento em altas temperaturas, evidências microestruturais e estudos de avaliação do ciclo de vida, respondendo à questão central sobre em que condições os geopolímeros de cinza volante conseguem conciliar

desempenho estrutural satisfatório com redução significativa de emissões associadas ao ciclo de vida do concreto. Nesse sentido, o objetivo geral de comparar, em um quadro único, concretos Portland e concretos geopoliméricos de cinza volante foi alcançado, evidenciando convergências, limites e condicionantes de cada sistema.

Do ponto de vista técnico, concretos geopoliméricos de cinza volante alcançam faixas de resistência à compressão e módulos de elasticidade compatíveis, e por vezes superiores, aos de concretos estruturais de referência à base de cimento Portland, sobretudo em formulações que combinam precursores adequados e adotam regimes de cura ajustados à cinética de formação dos géis responsáveis pela coesão da matriz. Em termos de durabilidade e resistência ao fogo, observa-se em geral desempenho igual ou superior ao do concreto convencional, com menor suscetibilidade à penetração de agentes agressivos e melhor preservação de propriedades mecânicas após exposição a altas temperaturas, desde que a microestrutura seja adequadamente consolidada. Quando esses resultados são confrontados com os indicadores de avaliação do ciclo de vida, verifica-se que concretos geopoliméricos de cinza volante tendem a proporcionar reduções expressivas nas emissões de CO₂ por metro cúbico, especialmente em cenários com matriz elétrica menos intensiva em carbono, logística de resíduos otimizada e escolha criteriosa de ativadores, ainda que a pegada de carbono dos álcalis e as distâncias de transporte possam atenuar parte desse ganho.

Ao mesmo tempo, a adoção de concretos geopoliméricos de cinza volante não constitui solução automática para a descarbonização da construção civil, mas uma rota promissora que depende de um conjunto de condições estruturais. Entre elas, destacam-se a necessidade de marcos normativos específicos para projeto, ensaio e controle de qualidade de concretos geopoliméricos, o fortalecimento de cadeias de suprimento de cinza volante e outros precursores em um contexto de transição energética, e a integração de métodos de avaliação do ciclo de vida às práticas de projeto e às políticas públicas setoriais.

As limitações desta monografia – como a ausência de ensaios experimentais próprios, o recorte restrito a geopolímeros majoritariamente à base de cinza volante e a dependência de cenários de avaliação ambiental definidos por outros estudos – apontam a conveniência de trabalhos futuros que combinem estudos de campo, modelagens de custo e desempenho e ensaios em escala piloto. Ainda assim, o conjunto de evidências organizado sustenta a conclusão de que o concreto geopolimérico de cinza volante é relevante em estratégias de redução das emissões da construção civil, desde que inserido em uma agenda mais ampla de inovação tecnológica, revisão normativa e planejamento de longo prazo para o setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, R. C. C. **Elaboração e análise de viabilidade de projeto arquitetônico unifamiliar com conceitos sustentáveis integrados.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- ABRANTES, R. C. C. et al. **Pegada de carbono como ferramenta para alcançar a sustentabilidade na construção: estudo de caso em uma fundação de uma residência unifamiliar.** In: II Congresso Luso-brasileiro de Materiais de Construção Sustentável, 2016, João Pessoa. Anais [...]. João Pessoa: UFPB, 2016.
- AGUILAR, M. T. P.; GUMIERI, A. G.; VASSALO, E. A. S. **Caracterização microestrutural do geopolímero obtido de metacaulim rico em ferro.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS (CBECIMAT), 21., 2014, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá, MT, 2014. p. 598-605.
- AMRAN, M.; DEBBARMA, S.; OZBAKKALOGLU, T. **Fly ash-based eco-friendly geopolymers concrete: a critical review of the long-term durability properties.** Constructionand Building Materials, v. 270, p. 121857, 2021.
- ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto.** Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2002.
- ARNAUD, B. K. L. **Avaliação de desempenho de blocos pré-moldados de material alcalinamente ativado aplicado ao telhado verde.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- ASSI, L. N. et al. **Sustainable concrete: building a greener future.** JournalofCleanerProduction, v. 198, p. 1641-1651, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** São Paulo, 2002. Disponível em: http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf. Acesso em: 25 nov. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: concreto de cimento Portland – preparo, controle e recebimento – procedimento.** Rio de Janeiro, 2006.

Análise comparativa de desempenho mecânico e ciclo de vida entre concreto geopolimérico de cinza volante e concreto de cimento portland

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14040: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14044: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

BAJPAI, R. et al. **Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymers concrete.** Journal of Cleaner Production, v. 254, p. 120147, 2020.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THAUMATURGO, C. **Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers.** International Journal of Inorganic Materials, v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000.

BENHALAL, E. et al. **Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry.** Journal of Cleaner Production, v. 51, p. 142-161, 2013.

BICHINHO, M. C. de M. **Avaliação do desempenho ambiental, energético, mecânico e microestrutural de estruturas de concretos sustentáveis submetidas a ambiente marinho.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

BORGES, P. H. R. et al. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II).** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, 2014.

BORGES, P. H. R. et al. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II).** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

BOSCHI, A.; LOT, A.; MELCHIADES, F. **Efeito das características das matérias-primas de partida no desempenho de geopolímeros.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 60., 2016, Águas de Lindóia. Anais [...]. Águas de Lindóia, SP, 2016.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. **Análise do ciclo de vida de construções metálicas.** In: I Congresso Luso-africano de Construção Metálica Sustentável, 2012, Luanda. Anais [...]. Luanda, 2012.

BRITO, W. S. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduo industrial.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

CO, D. **Cimento Portland versus ligantes geopoliméricos.** Terra, 1997. Disponível em: <http://www.geopolymer.com.br>. Acesso em: 25 nov. 2025.

curing conditions on the carbonation of the reaction products. Fuel, v. 84, p. 2048-2054, 2005.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction.** 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1978.

DANISH, A. et al. **Hope or hype? Evaluating the environmental footprint of reclaimed fly ash in geopolymers production.** Resources, Conservation and Recycling, v. 205, p. 107564, 2024.

DAVIDOVITS, J. **Ancient and modern concretes: what is the real difference?** Concrete International, v. 9, n. 12, p. 23-28, 1987.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications.** 4. ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2015.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: inorganic polymeric new materials.** Journal of Thermal Analysis, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymers cements.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALINE CEMENTS AND CONCRETES, 1., 1994, Kiev. Proceedings [...]. Kiev, 1994.

DIAS, D. P.; THAUMATURGO, C. **Avaliação da aderência entre barras lisas de aço e concretos geopoliméricos.** CEP, v. 22, p. 270, 2001.

DIAZ-LOYA, E. I.; ALLOUCHE, E. N.; VAIDYA, S. **Mechanical properties of fly-ash-based geopolymers concrete.** ACI Materials Journal, v. 108, n. 3, p. 300-306, 2011.

DUXSON, P. et al. **Geopolymer technology: the current state of the art.** Journal of Materials Science, v. 42, p. 2917-2933, 2007.

EDWARDS, B. **Rough guide to sustainability.** 3. ed. London: RIBA Enterprises, 2009.

FARHAN, N. A.; SHEIKH, M. N.; HADI, M. N. S. **Investigation of engineering properties of normal and high strength fly ash based geopolymers and alkali-activated slag concrete compared to ordinary Portland cement concrete.** Construction and Building Materials, v. 196, p. 26-42, 2019.

FIGUEIREDO, C. F. **Aplicação da avaliação do ciclo de vida como critério de seleção para materiais utilizados em construções sustentáveis.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

FIRDOUS, R. et al. **Assessment of environmental, economic and technical performance of geopolymers concrete: a case study.** Journal of Materials Science, v. 57, n. 40, p. 18711-18725, 2022.

GRAEDEL, T. E. **Streamlined life-cycle assessment.** Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

HABERT, G. et al. **Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives.** Cement and Concrete Research, v. 40, n. 5, p. 820-826, 2010.

HABERT, G.; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. **An environmental evaluation of geopolymers based concrete production: reviewing current research trends.** Journal of Cleaner Production, v. 19, n. 11, p. 1229-1238, 2011.

HAUSCHILD, M. Z. **Assessing environmental impacts in a life cycle perspective.** Environmental Science and Technology, v. 39, n. 4, p. 81A-88A, 2005.

IPCC. **2013 Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol.** 2013. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change.** Disponível em: <http://www.ipcc.ch/index.htm>. Acesso em: 25 nov. 2025.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change: organization.** n. 2015. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>.
KHAN, Q. S. et al. **Integrated mechanical and eco-economical assessments of fly ash-based geopolymers concrete.** Buildings, v. 15, n. 14, p. 2555, 2025.

KRIVENKO, P. **Alkali-activated aluminosilicates: past, present and future.** ChemickéListy, v. 102, p. s265-s277, 2008.

LIMA, A. B. de. **O processo produtivo do cimento Portland.** Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LIMA, P. H. A. de et al. **Avaliação do concreto geopolimérico como substituto do concreto de cimento Portland: resistência mecânica, resistência ao fogo e ACV.** 2022.

MALKAWI, A. B. **Assessing engineering behavior of fly ash-based geopolymers concrete: empirical modeling.** Infrastructures, v. 10, n. 7, p. 168, 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008.

MENEZES, H. A. F.; CARVALHO, M.; FREIRE, R. S. **Identificação de boas práticas para implementação da análise do ciclo de vida na Paraíba.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 10., 2015, São Paulo. Anais [...]. São Paulo, 2015.

MENOUFI, K. A. I. **Life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies: a state of the art.** 2011. Tese (Mestrado) – Universitat de Lleida, Escola Politècnica Superior, Lleida, 2011.

MOHAMMED, S. **Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: a review.** Constructionand Building Materials, v. 140, p. 10-19, 2017.

MOLINA, J. C.; JÚNIOR, A. L. M. **Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628:2001.** Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 37-53, out./dez. 2012.

MOTHÉ, L. P. **Avaliação das condições ideais para a produção de metacaulinita através da análise da sua atividade pozolânica.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2004.

NASCIMENTO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF).** Piracicaba: Laboratório de Instrumentação Nuclear/CENA, 1999.

NEUPANE, K. **Evaluation of environmental sustainability of one-part geopolymers binder concrete.** Cleaner Materials, v. 6, p. 100138, 2022.

ÖZBAYRAK, A.; KUCUKGONCU, H. **Equivalent stress block parameters for fly ash-based geopolymers concrete structural elements.** Structural Concrete, v. 26, n. 2, p. 1988-2016, 2025.

PALOMO, A. et al. **Alkali-activated fly ashes: a cement for the future.** Cement and Concrete Research, v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. **Geopolymers and related alkali-activated materials.** Annual Review of Materials Research, v. 44, p. 299-327, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (ed.). **Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM.** Dordrecht: Springer, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (ed.). **Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications.** Oxford: Woodhead Publishing; Boca Raton: CRC Press, 2009.

QAIDI, S. et al. **Fly ash-based geopolymers composites: a review of the compressive strength and microstructure analysis.** Materials, v. 15, n. 20, p. 7098, 2022.

ROMANO, R. C. O. et al. **Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita.** Cerâmica, v. 62, n. 363, p. 215-223, 2016.

SBAHIEH, S.; MCKAY, G.; AL-GHAMDI, S. G. **Comprehensive analysis of geopolymers materials: properties, environmental impacts, and applications.** Materials, v. 16, n. 23, p. 7363, 2023.

SCHNEIDER, M. et al. **Sustainable cement production: present and future.** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 7, p. 642-650, 2011.

SHI, X. et al. **Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymers concrete.** Materials, v. 14, n. 23, p. 7375, 2021.

SIDDIQ, M. U. et al. **AI-driven optimization of fly ash-based geopolymers concrete for sustainable high strength and CO₂ reduction: an application of hybrid Taguchi-Grey-ANN approach.** Buildings, v. 15, n. 12, p. 2081, 2025.

SIMAPRO. **Life cycle assessment software.** 2020. Disponível em: <https://network.simapro.com/pre/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

SINGARAM, K. K.; KHAN, M. A.; TALAKOKULA, V. **Review on compressive strength and durability of fly-ash-based geopolymers using characterization techniques.** Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. 25, p. 73, 2025.

SINGH, R. P. et al. **Fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: properties and environmental impacts.** Construction and Building Materials, v. 378, p. 131168, 2023.

SNIC. **Relatório sobre produção anual de cimento Portland.** Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2018.

SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES. **Ecoinvent v3.6 database.** Dübendorf, 2019.

TAHIR, M. F. M. et al. **Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymer with various compositions for rigid pavement applications.** Materials, v. 15, n. 10, p. 3458, 2022.

TANG, W.; PIGNATTA, G.; SEPASGOZAR, S. M. E. **Life-cycle assessment of fly ash and cenosphere-based geopolymer material.** Sustainability, v. 13, n. 20, p. 11167, 2021.

TEH, S. H. et al. **Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia.** Journal of Cleaner Production, v. 152, p. 312-320, 2017.

TEKLAY, A.; YIN, C.; ROSENDAHL, L. **Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: a way to reduce CO₂ footprint from cement industry.** Applied Energy, v. 162, p. 1218-1224, 2016.

TOSTA, L. I.; SOUZA, A. C.; ROGÉRIO, J. S. **Gestão da energia na produção de cimento Portland com uso de mineralizadores e combustíveis alternativos.** In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27., 2007. Anais [...]. 2007.

TRIPATHY, A.; ACHARYA, P. K. **Strength, life cycle analysis, embodied energy and cost-sensitivity assessment of sugarcane bagasse ash-based ternary blends of geopolymer concrete.** European Journal of Environmental and Civil Engineering, v. 28, n. 3, p. 591-610, 2024.

VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. **Cement manufacture and the environment: part II – environmental challenges and opportunities.** Journal of Industrial Ecology, v. 3, n. 1, p. 93-126, 2003.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. da. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais.** Production, v. 23, n. 2, p. 436-447, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132013000200016&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 25 nov. 2025.

YANG, C. et al. **Low-carbon enhancement of fly ash geopolymmer concrete: lateral deformation, microstructure evolution and environmental impact.** Journal of Cleaner Production, v. 422, p. 138610, 2023.

Para maiores informações, entre em contato!

contato@epitaya.com.br 

www.epitaya.com.br 

@epitaya 

<https://www.facebook.com/epitaya> 

(21) 98141-1708 



Engenharia de materiais pela sustentabilidade:

**Soluções inovadoras para o
meio ambiente na construção civil**

**Everton Rangel Bispo
Igor Charlles Siqueira Leite
Rachel Cristina Santos Pires**

Organizadores

 **epitaya**
Editora

ISBN: 978-65-5132-023-1



9 786551 320231