

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDREY FONSECA ALVES

**AVALIAÇÃO ECONÔMICO-AMBIENTAL COMPARATIVA DE MISTURAS
DE CONCRETO CONFECCIONADOS COM A INSERÇÃO DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS**

MANAUS

2025

ANDREY FONSECA ALVES

**AVALIAÇÃO ECONÔMICO-AMBIENTAL COMPARATIVA DE MISTURAS
DE CONCRETO CONFECCIONADOS COM A INSERÇÃO DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal do Amazonas
(UFAM), como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Lilyanne Rocha Garcez

MANAUS

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A474a Alves, Andrey Fonseca

Avaliação econômico-ambiental comparativa de misturas de concreto confeccionados com a inserção de resíduos agroindustriais / Andrey Fonseca Alves. - 2025.

66 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Lilyanne Rocha Garcez.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Manaus, 2025.

1. Concreto sustentável. 2. Custo-benefício. 3. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 4. Cinza do caroço de açaí. 5. Cinza volante. I. Garcez, Lilyanne Rocha. II. Universidade Federal do Amazonas. Faculdade de Tecnologia. Curso de Engenharia Civil. III. Título


ANDREY FONSECA ALVES

**AVALIAÇÃO ECONÔMICO-AMBIENTAL COMPARATIVA DE MISTURAS
DE CONCRETO CONFECCIONADOS COM A INSERÇÃO DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS**


Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Amazonas
(UFAM), como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 18.12.2025.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LILYANNE ROCHA GARCEZ**
Data: 30/01/2026 09:51:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Lilyanne Rocha Garcez - UFAM
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **ELLEM CRISTIANE MORAIS DE SOUSA CONTENTI**
Data: 30/01/2026 09:54:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.^a Ellem Cristiane Morais de Sousa Contente - UFAM
Avaliadora

Documento assinado digitalmente
 **MATHEUS PENA DA SILVA E SILVA**
Data: 30/01/2026 10:07:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Matheus Pena da Silva e Silva - UFAM
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Adonis e Moniete, minha base inabalável. Vocês me ajudaram desde sempre, seja com as caronas, as mensalidades ou os conselhos, mas, acima de tudo, inspiraram a construção do meu caráter. Ao meu pai, o melhor exemplo que alguém poderia ter: obrigado por sua bondade, lealdade, paciência e sabedoria. À minha mãe, minha "coach" incansável: obrigado por ser dura na queda, por me ensinar a ter força independentemente da dificuldade, a nunca aceitar menos do que mereço e a jamais deixar que passem por cima de mim. Sou quem sou hoje graças a vocês.

Ao meu tio e padrinho, Roger, que não só cuidou de mim e me ensinou lições valiosas sobre a vida, mas foi a minha grande inspiração para escolher a Engenharia Civil, profissão na qual hoje tenho o orgulho de me formar.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Lilyanne Rocha Garcez, agradeço imensamente pela gentileza e pela orientação constante ao longo desta trajetória. Obrigado pela oportunidade de desenvolver o projeto de Iniciação Científica (PIBIC), que serviu como a base fundamental para a construção deste trabalho. Sou grato não apenas pelo suporte técnico, mas também pelo acolhimento nos momentos de dúvida, quando questioneei minha própria capacidade, e pelo incentivo que me fez persistir.

À minha melhor amiga, Eduarda (Duda), a irmã que a vida me deu. Obrigado por estar ao meu lado no momento de maior dificuldade da minha vida, quando quase perdi meu propósito. Você me ouviu todos os dias sem reclamar e me impulsionou a seguir este caminho. Mesmo não sendo a mais presente fisicamente, você faz valer cada momento. Não sei o que teria sido da minha vida sem você.

Aos meus amigos da faculdade, em especial à Carol e à Manu, por me fazerem companhia e arrancarem as risadas mais sinceras nos momentos de estresse. Ao Magno, de quem tenho imenso orgulho; ver seu amadurecimento, sua superação após as decepções e sua ascensão profissional me provou que somos capazes de sair do mais profundo vazio quando buscamos força em nós mesmos e em Deus.

Um agradecimento especial à "Mesa de Dominó" da UFAM, onde passei horas jogando conversa fora, fazendo as maiores leseiras, mas onde também amadureci e fiz amizades para a vida toda.

Aos meus amigos: Gabriel Moura (O Piri), que, apesar do jeito caótico, me ensinou o verdadeiro significado de lealdade; Lucas Modesto (O Shark), amigo desde o início, que sempre fez questão da minha presença e hoje me enche de orgulho pelo homem e

profissional que se tornou no Corpo de Bombeiros; Leonardo Andrade (O Leo), minha inspiração diária, que me ensinou a ver a vida com mais leveza e a ter fé no processo, por mais demorado que seja; Vinicius Alexandre (O Vini Ra), que chegou há pouco tempo mas já se mostrou essencial, sempre demonstrando gratidão e compreensão; e ao Leandro, o "quinto cavaleiro", que demorei a entender, mas que se revelou um amigo de coração enorme que nunca abandona os seus.

Não menos importante, o ano de 2025 me reservou duas pessoas que entraram na minha vida de paraquedas e como gratas surpresas foram os melhores presentes deste ano, Izabela, minha parceira máxima do trabalho e dona Amanda Porto, muito mais que só uma amiga, uma mulher fascinante que me cativa da forma mais genuína e sincera a cada dia que passo ao lado dela, definitivamente única para mim.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), manifesto minha gratidão pelo suporte institucional e, especificamente, pelo incentivo financeiro concedido através da bolsa de pesquisa, essencial para a execução do projeto do PIBIC que originou este estudo. Foi nesta casa que vivi os melhores e mais desafiadores sete anos da minha vida. Entrei por estes portões como um jovem sonhador e inexperiente de 18 anos e despeço-me agora, aos 26, realizado como filho, amigo e profissional. Este trabalho é o símbolo maior dessa jornada de transformação e de todas as conquistas que aqui construí.

Encerro este ciclo sabendo que é apenas o começo, levando comigo a lição que aprendi com a vida e com meus heróis: "O mundo não é um arco-íris. É um lugar sujo e cruel que não se importa com o quão durão você é. Vai te colocar de joelhos e te manter lá se você deixar. Mas não é sobre o quão forte você consegue bater, é sobre o quão forte você consegue apanhar e continuar seguindo em frente, o quanto você consegue aguentar e continuar seguindo em frente. É assim que se ganha!" (Rocky Balboa).

RESUMO

A indústria da construção civil, embora vital para o desenvolvimento socioeconômico, enfrenta o desafio de mitigar seus significativos passivos ambientais, especialmente aqueles associados à produção de concreto convencional com cimento Portland (CPV). Assim, este trabalho apresenta uma avaliação econômico-ambiental comparativa da substituição parcial do Cimento CP-V pelo cimento considerado como sustentável LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*) em combinação com resíduos agroindustriais (cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cinza do caroço de açaí, cinza volante e sílica ativa) aplicados as misturas de concreto produzidas em laboratório. A metodologia integrou a Análise do Ciclo de Vida (ACV) realizada com o software OpenLCA e a base de dados Ecoinvent, e, ainda, uma análise econômica baseada em custos de produção e insumos utilizando referências como SINAPI e TCPO. Os resultados ambientais indicaram que as misturas com LC³ e a adição de resíduos, especialmente a cinza do bagaço de cana, proporcionaram reduções significativas em categorias de impacto como aquecimento global e uso da terra, em comparação ao traço de referência com o uso do cimento CP-V. A avaliação integrada demonstrou que a adoção dessas alternativas não reduz apenas a pegada de carbono e o consumo de recursos naturais, mas também apresenta viabilidade econômica potencial através da redução do consumo de clínquer e da valorização de subprodutos locais. Conclui-se que a aplicabilidade de concretos com LC³ e resíduos agroindustriais representa uma estratégia eficaz para promover a sustentabilidade na construção civil, alinhando desempenho técnico, benefícios ambientais e competitividade econômica.

Palavras-chave: Concreto sustentável. Custo-benefício. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Cinza do caroço de açaí. Cinza volante. Sílica ativa.

ABSTRACT

The construction industry, while vital for socioeconomic development, faces the challenge of mitigating its significant environmental liabilities, especially those associated with the production of conventional Portland cement (CPV) concrete. Therefore, this work presents a comparative economic-environmental assessment of the partial replacement of CPV with sustainable cement LC³ (Limestone Calcined Clay Cement) in combination with agro-industrial waste (sugarcane bagasse ash, açai seed ash, fly ash, and silica fume) applied to laboratory-produced concrete samples. The methodology integrated Life Cycle Assessment (LCA) performed using OpenLCA software and the Ecoinvent database, with an economic analysis based on production and input costs, using references such as SINAPI and TCPO. The environmental results indicated that the mixtures with LC³ and waste, especially sugarcane bagasse ash, provided significant reductions in impact categories such as global warming and land use, compared to the reference mix with CPV. The integrated assessment demonstrated that the adoption of these alternatives not only reduces the carbon footprint and the consumption of natural resources but also presents potential economic viability through the reduction of clinker consumption and the valorization of local by-products. It is concluded that the use of concrete with LC³ and agro-industrial waste represents an effective strategy to promote sustainability in civil construction, aligning technical performance, environmental benefits, and economic competitiveness.

Keywords: Sustainable concrete. LC³ cement. Agro-industrial waste. Sugarcane bagasse ash. Acai seed ash. Fly ash. Active silica.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Resultado da ACV para formação de matéria particulada	35
Gráfico 2. Resultado da ACV para aquecimento global	37
Gráfico 3. Resultado da ACV para uso da terra	38
Gráfico 4. Resultado da ACV para recursos minerais	39
Gráfico 5. Resultado da ACV para formação de ozônio	40
Gráfico 6. Resultado da ACV para depleção de ozônio	42
Gráfico 7. Resultado da ACV para acidificação	43
Gráfico 8. Resultado da ACV para ecotoxicidade	44
Gráfico 9. Resultado da matriz Monte Carlo para análise de incertezas	46
Gráfico 10. Matriz de Ecoeficiência Detalhada	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição utilizada dos materiais em quilogramas	29
Tabela 2. Proporção das misturas de concreto em porcentagem	31
Tabela 3. Composição do custo unitário e frete dos insumos (Manaus-AM)	47
Tabela 4. Custo total de produção por m ³ de concreto	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vidas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBC	Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar
CCA	Policloreto de Vinila
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CPV	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI)
CV	Cinza Volante
GWP	Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	International Organization for Standardization
LC ³	Limestone Calcined Clay Cement (Cimento, Argila Calcificada e Calcário)
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de Alumínio (Alumina)
CaO	Óxido de Cálcio
CO_2	Dióxido de Carbono
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
SiO_2	Dióxido de Silício (Sílica)
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
R\$	Real (Moeda Brasileira)
°C	Graus Celsius
a/c	Relação água/cimento
μm	Micrômetro

SUMÁRIO

SUMÁRIO	11
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. A indústria da Construção Civil	14
2.1.1. Os materiais aplicados à construção civil	14
2.1.2. Resíduos sólidos na construção civil	15
2.2. A sustentabilidade da Indústria da Construção Civil	17
2.3. As matrizes cimentícias e o concreto	18
2.4. Resíduos aplicados em matriz cimentícia	19
2.5. Resíduos aplicados em matriz cimentícia	22
2.5.1. Objetivo e escopo da ACV.....	23
2.5.2. Inventário do Ciclo de Vida	24
2.5.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1. Definição dos parâmetros de cálculo e insumos	27
3.2. Procedimentos de dosagens	30
3.3. Caracterização dos materiais	30
3.4. Análise do Ciclo de Vida (ACV)	32
3.4.1. Inventário do ciclo de vida	32
3.4.2. Avaliação dos impactos ambientais (AICV)	33
3.5. Análise estatística integrada	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. Resultados da ACV	34
4.1.1. Formação de matéria particulada	34
4.1.2. Aquecimento global	35
4.1.3. Uso da terra.....	37
4.1.4. Escassez de recursos minerais	38
4.1.5. Formação de ozônio ao ecossistema terrestre.....	39
4.1.6. Depleção de ozônio	40
4.1.7. Acidificação terrestre	42
4.1.8. Ecotoxicidade terrestre.....	43
4.2. Análise estatística pela Matriz Pedigree	44
4.3. Análise econômica	45
4.4. Análise estatística integrada	48
CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecida como um vetor estratégico para o desenvolvimento socioeconômico brasileiro, destacando-se por sua capacidade de impulsionar a economia e absorver mão de obra (Monteiro Filha; Costa; Rocha, 2010; Tomazia *et al.*, 2024). Contudo, essa relevância se contrapõe aos significativos passivos ambientais gerados pela atividade (Tomazia *et al.*, 2024), que incluem o consumo intensivo de recursos naturais e a expressiva geração de resíduos. O concreto, sendo o principal material estrutural utilizado (Lara, 2013), é um dos principais focos dessa problemática. Sua produção, centrada no cimento Portland, é um notório potencializador do aquecimento global devido às altas emissões de CO₂ associadas à sua fabricação (Santoro e Kripka, 2017; Mehta; Monteiro, 2014).

Diante desse cenário e em resposta a uma sociedade cada vez mais exigente (Tomazia *et al.*, 2024), emerge a necessidade de promover mudanças tecnológicas e comportamentais no setor para mitigar seus impactos negativos. A busca por alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis tem ganhado força. Nesse contexto, destacam-se tanto o uso de cimentos alternativos, como o LC³ (Limestone Calcined Clay Cement), quanto a incorporação de resíduos industriais e agroindustriais como substitutos parciais do cimento.

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que possibilita uma análise crítica na especificação desses materiais (Caldas e Sposto, 2017). Embora a viabilidade ambiental de matrizes cimentícias com misturas alternativas tenha sido comprovada, a adoção efetiva pelo setor construtivo depende também da comprovação de sua viabilidade econômica. A indústria busca constantemente soluções inovadoras para reduzir custos, e a seleção criteriosa dos materiais impacta diretamente o custo final da obra (Rohden, 2011).

Estudos desenvolvidos no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) desenvolvida pelo autor no ciclo 2023/2024 investigaram os impactos ambientais de diferentes traços de concreto, cujos resultados demonstraram que as misturas utilizando o cimento Portland convencional (CPV) apresentaram os maiores impactos ambientais dentro das categorias analisadas, reforçando a importância de validar alternativas mais sustentáveis, como o LC³.

Para compor este trabalho serão integrados os resultados obtidos na ACV realizada por meio do PIBIC/UFAM, cujo projeto intitulava "Análise comparativa do

ciclo de vida do concreto utilizando resíduos industriais, agroindustriais e os cimentos CPV e LC³", no qual investigou-se o desempenho ambiental de diferentes traços de concreto, acrescentando uma análise econômica baseada em custos de produção, transporte e beneficiamento, utilizando como referência tabelas de composição de preços (TCPO) e dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação econômico-ambiental comparativa entre misturas de concreto utilizando o cimento Portland convencional (CPV) e o cimento sustentável LC³, combinado com os resíduos agroindustriais: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação econômico-ambiental comparativa entre misturas de concreto utilizando o CPV e o sistema LC³ combinado aos referidos resíduos agroindustriais, visando determinar a viabilidade global dessas alternativas sustentáveis.

1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise comparativa da viabilidade econômico-ambiental das misturas de concreto produzidos com cimento Portland (CPV), com cimento LC³, e com a inserção de resíduos agroindustriais às misturas.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS INTRODUÇÃO

- Quantificar os impactos ambientais associados às misturas de concreto com cimento CPV e LC³ a partir da Análise do Ciclo de Vida (ACV);
- Comparar os custos de produção do concreto convencional e do concreto sustentável com a inserção de resíduos agroindustriais;
- Integrar os resultados econômicos e ambientais, para avaliar conjuntamente o custo-benefício, destacando as vantagens e desvantagens da aplicação de resíduos na produção de concreto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A indústria da Construção Civil

A construção civil é reconhecida como um pilar fundamental e vetor estratégico para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, dada sua complexa articulação intersetorial, capacidade de impulsionar a economia, absorver mão de obra e implementar infraestruturas essenciais (Monteiro Filha; Costa; Rocha, 2010; Tomazia *et al.*, 2024). Entretanto, tal relevância se contrapõe aos significativos passivos ambientais que a atividade gera, notadamente o consumo intensivo de recursos naturais e a expressiva geração de resíduos, cuja gestão inadequada agrava os prejuízos ao meio ambiente (Tomazia *et al.*, 2024).

Como este setor exerce um papel diretivo na expansão e configuração estrutural das cidades, a incorporação de preceitos de sustentabilidade torna-se imperativa para nortear um desenvolvimento futuro com menor impacto, buscando atenuar os danos ambientais já consolidados (Macedo e Martins, 2011). Diante desse cenário, e em resposta a uma sociedade cada vez mais exigente, emerge a necessidade de promover profundas mudanças culturais, tecnológicas e comportamentais no setor, a fim de mitigar seus impactos negativos (Tomazia *et al.*, 2024).

A atividade da construção civil exerce uma pressão significativa sobre o meio ambiente, manifestada tanto pelo consumo intensivo de recursos naturais, como madeira, cimento e energia, quanto pela geração expressiva de resíduos sólidos nas etapas de execução e manutenção de obras. O descarte inadequado desses rejeitos representa um relevante passivo ambiental, tornando imperativa a estreita interação entre as práticas da engenharia civil e a gestão ambiental para mitigar tais impactos (Brasil, 2000).

2.1.1. Os materiais aplicados à construção civil

O domínio sobre os materiais de construção é uma premissa fundamental na engenharia civil, envolvendo desde os componentes estruturais básicos até os sistemas de acabamento. A análise técnica desses materiais começa pela compreensão de suas grandezas físicas, regidas por normas, e pela correta aplicação de seus constituintes essenciais (Santos; Real; Lopes, 2018; Lara, 2013).

O concreto se destaca como o principal material estrutural, sendo um compósito formado por aglomerantes, como o cimento Portland, e agregados inertes, como areia e

brita (Lara, 2013). O desempenho deste material é avaliado em dois estados distintos. No estado fresco, propriedades como a trabalhabilidade, coesão e consistência são determinantes para evitar patologias como a segregação e a exsudação, sendo seu comportamento aprimorado com o uso de aditivos químicos e adições minerais. Já no estado endurecido, o parâmetro principal de qualidade é a resistência à compressão, que é diretamente influenciada pela relação água/cimento e verificada por meio de um rigoroso controle tecnológico.

A garantia da qualidade final do concreto depende criticamente das etapas executivas de mistura, transporte, lançamento, adensamento e, fundamentalmente, da cura, que assegura a completa hidratação do cimento e o desenvolvimento da resistência projetada (Santos; Real; Lopes, 2018).

A engenharia civil contemporânea enfrenta o desafio de conciliar sua relevância socioeconômica com a crescente demanda por sustentabilidade ambiental. A construção civil, reconhecida como um pilar para o desenvolvimento econômico e a geração de empregos em larga escala é simultaneamente pressionada a mitigar seus impactos ecológicos em um cenário de crise climática (Nunes, 2019).

A inovação em materiais e tecnologias construtivas emerge como um fator determinante para a evolução do setor. A busca por alternativas que otimizem a durabilidade e a eficiência das estruturas, ao mesmo tempo em que promovem a redução do impacto ambiental, tem impulsionado a adoção de soluções avançadas, como o bioconcreto, a nanotecnologia e outras tecnologias disruptivas que permitem maior precisão executiva e minimização de desperdícios (Chen; Yossef, 2015; Pereira *et al.*, 2024).

Portanto, a integração de materiais inovadores e práticas construtivas mais responsáveis é fundamental não apenas para aprimorar o desempenho técnico das edificações, mas também para consolidar um paradigma de construção sustentável que responda às vulnerabilidades macroeconômicas e aos imperativos ambientais atuais (Nunes, 2019; Pereira *et al.*, 2024).

2.1.2. Resíduos sólidos na construção civil

A conceituação de resíduo sólido abrange dimensões técnicas e sociais, associando-se tanto à percepção de inutilidade e desperdício quanto aos impactos decorrentes dos padrões de consumo (Simoncini *et al.*, 2023). A geração de resíduos é

um fenômeno inerente ao desenvolvimento humano e tende a se intensificar com o avanço tecnológico e o crescimento econômico (Arantes e Pereira, 2021). A composição desses resíduos reflete o nível socioeconômico: países desenvolvidos produzem mais recicláveis, enquanto em nações em desenvolvimento, como o Brasil, predomina a fração orgânica, embora com aumento gradual dos recicláveis (Nascimento *et al.*, 2015; Brasil, 2012).

Com o intuito de reduzir os impactos ambientais decorrentes dessa geração, foram estabelecidos importantes marcos legais, como a Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007) e a própria PNRS (Bicalho e Pereira, 2018).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, define resíduos como materiais, substâncias ou objetos resultantes das atividades humanas que, devido às suas características, não podem ser lançados em redes de esgoto ou corpos d'água. Essa política consolidou princípios fundamentais, como a responsabilidade compartilhada, a logística reversa e o poluidor-pagador, além de estabelecer critérios técnicos de classificação dos resíduos de acordo com sua origem e grau de periculosidade (Berríos Godoy, 2013).

A geração de resíduos no setor de construção Civil é um desafio ambiental crítico, impulsionado pela expansão urbana e desenvolvimento econômico (Camilo *et al.*, 2022). O volume é expressivo: em 2020, o país gerou 75 milhões de toneladas de RCC, correspondendo a 50% de todos os resíduos sólidos nacionais (IBGE, 2021), e em 2022, foram 45 milhões de toneladas (Abrema, 2023). Embora de baixa periculosidade individual, o volume total representa um risco à saúde pública e ao meio ambiente (Karpinski *et al.*, 2009)

A principal causa da alta geração de resíduos é a hegemonia do sistema construtivo convencional no Brasil, baseado em concreto e alvenaria argamassada (Sousa, 2024), o que se reflete na composição gravimétrica, dominada por argamassa (63%) e concreto/blocos (29%) (SINIR, 2019; Fernandez, 2012). Fatores como a baixa qualificação da mão de obra, técnicas construtivas pouco racionalizadas (Miotto, 2013) e gestão deficiente (Nagalli, 2016) agravam o desperdício.

Apesar dos avanços normativos, a implementação da PNRS enfrenta limitações estruturais e regionais, especialmente em municípios de menor porte. A efetiva gestão dos resíduos requer sistemas integrados baseados nos 3Rs – reduzir, reutilizar e reciclar – aliados à disposição final adequada em aterros sanitários, considerados a solução mais segura do ponto de vista ambiental (Mota *et al.*, 2014).

Embora a incorporação de resíduos como matéria-prima secundária seja fundamental para a sustentabilidade, sua implementação enfrenta barreiras de investimento (Moraes; Souza, 2016). Para impulsionar essa prática, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), instituído em 2022, estabeleceu a meta de elevar a taxa de reciclagem de RCC no país dos atuais 7% para 25% até o ano de 2040 (Moreira, Cardoso e Arante, 2024).

Sendo que mesmo após quinze anos de vigência da PNRS, o Brasil ainda apresenta deficiências significativas na gestão de resíduos (Costa e Ribas, 2025). Em 2022, apenas 61% das 77,1 milhões de toneladas de resíduos coletados receberam destinação ambientalmente adequada, enquanto 38,9% foram descartados de forma irregular, evidenciando desigualdades regionais e fragilidade na efetivação das políticas públicas (Abrema, 2023).

2.2. A sustentabilidade da Indústria da Construção Civil

A sustentabilidade na construção civil é definida como um processo holístico que visa a harmonia entre ambiente construído e o natural (Du Plessis, 2002), exigindo a integração das dimensões econômica, social e ambiental ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento (Araújo, 2009) e o respeito aos limites de suporte do planeta (Sattler, 2017).

A avaliação prática desse desempenho foca em três eixos principais: a gestão da energia, da água e dos materiais (Associação Brasileira Dos Escritórios De Arquitetura, 2007, p. 2-3). A implementação desses eixos é guiada por princípios como a minimização do consumo de recursos, a maximização da reutilização de componentes, o uso de fontes renováveis e recicláveis, a proteção ao ambiente natural e a criação de ambientes internos saudáveis e não tóxicos (Kibert, 1994).

A urgência dessa abordagem é impulsionada pelos impactos significativos do setor, responsável por cerca de 39% das emissões globais de carbono (Global Status Report, 2020) e mais de 40% do consumo energético mundial (Mingrone, 2016), além de ser um dos maiores consumidores de água (Pessarello, 2008). O setor também se caracteriza pelo uso intensivo de recursos naturais, muitas vezes não renováveis, e pela alta geração de resíduos (Karpinsk, 2009), o que exige gestão responsável (Resolução Conama 307/02) e a aplicação rigorosa dos "Rs" (Antiqueira e Sekine, 2020).

Nesse contexto, a seleção de materiais é crucial, exigindo que o engenheiro

(Pereira, 2023) pondere os trade-offs: o concreto impacta pelas emissões de CO₂ em sua produção (Pacheco-Torgal, 2013); a madeira requer manejo responsável (Santiago, 2014); e o aço, embora reciclável (Lima, 2018), demanda alta intensidade energética em sua fabricação (Ferreira, 2017).

A implementação de soluções, definida como "construção verde" (Kruger e Seville, 2016), foca em otimizar o consumo de materiais e energia e reduzir resíduos (MMA, 2017). As estratégias recomendadas incluem a análise do ciclo de vida, o uso de energias renováveis, a gestão eficiente da água (como captação pluvial) e a preferência por materiais locais, recicláveis e não tóxicos (MMA, 2017).

Tais práticas devem ser aplicadas tanto na escala urbana, com adaptação à topografia e fomento à mobilidade sustentável, quanto na escala da edificação, com adequação climática e uso de coberturas verdes (Larrosa e Bueno, 2017). O sucesso desta transição, contudo, depende da ação sinérgica entre todos os agentes da cadeia: clientes, profissionais, indústria e órgãos reguladores (Du Plessis, 2002).

2.3. As matrizes cimentícias e o concreto

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo (Mehta; Monteiro, 2014) e o de maior utilização na construção civil (Lima *et al.*, 2014), sendo essencial para obras de infraestrutura e edificações (Mehta; Monteiro, 2014). Conceitualmente, é definido como um compósito formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e água, podendo incorporar componentes minoritários, como adições minerais e aditivos químicos (Araújo, 2010; ABNT, 2015; Almeida, 2015; Lima *et al.*, 2014).

A versatilidade do concreto permite sua aplicação em diversas tipologias, como o concreto convencional usado em pisos ou estruturas armadas como pilares e sapatas (Varela, 2018) e uma vasta gama de outros tipos, como o autoadensável (CAA), o de alto desempenho (CAD), o projetado, o pré-moldado e o reforçado com fibras (Almeida, 2015). Segundo afirma Lima *et al.* (2014) atribuem seu sucesso competitivo a duas vantagens principais: a elevada resistência à deterioração quando exposto à água (superior ao aço ou madeira) e a ampla disponibilidade de seus componentes a um custo acessível. Essas características, somadas à alta resistência e durabilidade (Tormen *et al.*, 2020), consolidam o concreto como material fundamental (Lima *et al.*, 2014).

Para garantir o desempenho e a longevidade do material, é crucial o processo de

dosagem, definido por Helene (2005) como o conjunto de ações para definir o traço, a proporção ideal (em massa ou volume) dos componentes. A preparação adequada do concreto, desde a análise da composição até a cura, é vital, pois quaisquer alterações nas quantidades especificadas podem causar mudanças significativas na qualidade desejada (Silva *et al.*, 2018; Pena e Oliveira, 2021).

Apesar de suas vantagens técnicas, a produção tradicional de concreto gera expressivos impactos ambientais. Conforme Tormena *et al.* (2020), a indústria do concreto é a maior consumidora individual de recursos naturais (água, agregados e cimento). De fato, estima-se que o setor consuma cerca de 40% de todos os recursos não renováveis explorados (Santos e Cabral, 2020). O principal componente, o cimento Portland, é um notório potencializador do aquecimento global devido às altas emissões de CO₂ em sua fabricação (Santoro e Kripka, 2017; Mehta; Monteiro, 2014).

2.4. Resíduos aplicados em matriz cimentícia

A sílica ativa, também denominada microsilica, é um subproduto industrial na forma de um pó fino pulverizado, originado do processo de fabricação de ligas de ferro-silício ou silício metálico em fornos elétricos de arco submerso (Neville, 2016; Souza, 2021). Trata-se de um material ultrafino, com diâmetro médio de partícula da ordem de 0,1 µm e elevada área superficial (15-25 m²/g), o que lhe confere alto grau de pozolanicidade (Mehta; Monteiro, 2014). Suas propriedades físico-químicas variam conforme o processo de fabricação, e a norma ABNT NBR 13956:2012 a classifica em três tipos: não densificada (massa específica de 150-350 kg/m³), densificada (350-700 kg/m³) e em dispersão aquosa (50% de sólidos) (Souza, 2017).

A atuação da sílica ativa em compósitos cimentícios ocorre por duas vias principais: uma física e outra química (Hermann *et al.*, 2016; Neville, 2016; Dias *et al.*, 2022). O efeito físico (fíler) consiste no preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento por suas partículas ultrafinas, otimizando o empacotamento granulométrico e refinando a microestrutura (Hermann *et al.*, 2016; Silva, 2024). O efeito químico (pozolânico) é a reação da sílica (SiO₂) com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), ou portlandita, resultante da hidratação do cimento, que forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional (Hermann *et al.*, 2016; Silva, 2024). Esse processo altera o número e o tamanho dos cristais de portlandita, modificando e acelerando a hidratação do cimento (Nagrockienė; Girskas e Skripkiūnas, 2017; Yu *et al.*, 2014; León *et al.*, 2014).

As alterações microestruturais promovem melhorias significativas. No estado fresco, a elevada área superficial melhora as propriedades reológicas, aumentando a coesão, a retenção de água e reduzindo a exsudação e a segregação (ABNT, 2012; Souza, 2021; Silva, 2024). No estado endurecido, o refinamento microestrutural resulta em menor permeabilidade, melhor aderência (pasta/agregado e pasta/armadura) e ganhos expressivos em desempenho mecânico (resistência à compressão e flexão) e durabilidade. A durabilidade é notavelmente aprimorada, com aumento da resistência a sulfatos, à abrasão, à difusão de íons cloreto e mitigação da reação álcali-agregado (Souza, 2021; Silva, 2024).

A dosagem de sílica ativa é usualmente recomendada em teores de 5% a 15% em relação à massa de cimento (Hermann *et al.*, 2016; Soares, 2018). Contudo, a elevada área superficial do material aumenta significativamente a demanda de água (Neville, 2016). Para manter a trabalhabilidade e a consistência da mistura sem alterar a relação água/cimento, torna-se indispensável o uso de aditivos superplastificantes (Mehta; Monteiro, 2014; Li *et al.*, 2017).

A cinza volante (CV) é um subproduto mineral particulado e fino (Mehta e Monteiro, 2014; ASTM, 2021) originado da queima de carvão pulverizado em usinas termelétricas, sendo capturada dos gases de exaustão por filtros ou precipitadores eletrostáticos (Junckes, 2015; Provis e Bernal, 2014). Sua composição química é predominantemente formada por uma fase vítrea (aluminossilicato amorfo), minerais cristalinos e carbono não queimado (Provis e Bernal, 2014), com destaque para os óxidos de Silício (SiO_2), Alumínio (Al_2O_3), Cálcio (CaO) e Ferro (Fe_2O_3) (Recena, 2011; Medeiros, 2018). Contudo, por ser um subproduto e não um material manufaturado, a CV apresenta uma variabilidade físico-química intrínseca, governada pelo tipo de carvão e pela tecnologia de combustão, o que torna suas propriedades imprevisíveis (Medeiros, 2018; Provis e Bernal, 2014). Em países onde a geração termelétrica é oscilante, essa variação é ainda mais acentuada (Medeiros, 2018).

Fisicamente, as partículas da cinza volante são majoritariamente esféricas (Junckes, 2015), embora possam ter morfologias irregulares (Medeiros, 2018), com diâmetros usuais entre 1 μm e 100 μm (Junckes, 2015). Sua massa específica, tipicamente entre 1,9 e 2,4 g/cm^3 , é significativamente inferior à do cimento (3,15 g/cm^3), exigindo que sua substituição seja calculada em volume absoluto (Dal Molin, 2011). A heterogeneidade morfológica, como a presença de cenosferas (baixa densidade) ou partículas de carbono porosas, torna a medição de propriedades como a

área superficial pelo método de Blaine imprecisa (Medeiros, 2018). Normativamente, a ASTM C618 (2021) classifica a CV, sendo a Classe F definida por uma soma de óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) maior que 70% e CaO menor que 18% (ASTM, 2021).

Quando utilizada em substituição parcial ao cimento (usualmente 15-35%), a cinza volante atuou por duas vias: como material inerte de preenchimento (efeito fíler) e como agente pozolânico (Junckes, 2015). A reatividade pozolânica ocorre quando a fase vítrea (sílica amorfa) reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) da hidratação do cimento, formando C-S-H adicional (Junckes, 2015; Provis e Bernal, 2014).

Esse refinamento microestrutural, assim como o de outras cinzas industriais, melhora o desempenho do compósito (Cordeiro *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2019). A granulometria é crucial: cinzas mais finas reduzem a demanda de água, diminuindo a porosidade e aumentando a resistência (Chindaprasirt *et al.*, 2004). A adição também reduz o calor de hidratação, devido ao efeito de diluição e à reação pozolânica mais lenta em temperaturas ambientes (Junckes, 2015).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) é um resíduo mineral obtido a partir da queima do bagaço da cana em caldeiras, após o processamento para produção de açúcar e etanol (Lima *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2017). Essa combustão, realizada entre 800 °C e 1.000 °C, gera cinzas ricas em sílica (SiO_2), com teores que variam de 88,2% a 96,2%, devido à formação de fases cristalinas de quartzo em sua microestrutura (Almeida *et al.*, 2015; Arif, Clark e Lane, 2016; Clark *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2019). Estima-se que cada tonelada de cana processada produza aproximadamente 6 kg de CBC (Conab, 2024).

A reatividade pozolânica da CBC depende fortemente da temperatura de calcinação, sendo verificado que a queima controlada a 600 °C potencializa suas propriedades como adição mineral ao concreto (Cordeiro, Toledo e Fairbairn, 2009). Quando devidamente calcinada e moída, a CBC pode substituir até 20% do cimento Portland, proporcionando aumento da resistência à compressão em função do efeito fíler, que melhora o empacotamento das partículas e a densificação da matriz cimentícia (Chusilp, Jaturapitakkul e Kiattikomo, 2010; Cordeiro *et al.*, 2008).

Além dos benefícios mecânicos, a incorporação da CBC contribui para o desenvolvimento sustentável ao reduzir o impacto ambiental da disposição de resíduos agroindustriais e as emissões de CO_2 relacionadas à produção de cimento (Barroso, 2011).

Para alcançar desempenho satisfatório, entretanto, é essencial que o material

apresente predominância de sílica amorfa, granulometria fina e homogeneização por moagem, garantindo reatividade adequada e compatibilidade com matrizes cimentícias (Nunes *et al.*, 2008; Sampaio, Souza e Gouveia, 2014; Feitosa *et al.*, 2023).

O caroço de açaí, que representa a maior fração do fruto (Teixeira *et al.*, 2005), configura-se como uma biomassa de elevado potencial de geração de resíduos (Araújo *et al.*, 2021). A utilização da cinza proveniente de sua queima (CCA) como adição mineral em concretos e argamassas surge como uma alternativa ambientalmente viável, pois, além de reduzir a disposição inadequada de resíduos, contribui para a mitigação das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento (Sales e Filho, 2014).

A eficiência da CCA depende diretamente de seu processamento térmico, as cinzas obtidas de queimadas não controladas tendem a apresentar microestrutura cristalina, baixa amorficidade (Tapajós *et al.*, 2014) e partículas irregulares, o que reduz a reatividade e aumenta a porosidade do compósito (Moura *et al.*, 2021). O controle da temperatura de queima e o beneficiamento por moagem são fundamentais para o aumento da área superficial e da atividade pozolânica (Cordeiro *et al.*, 2019).

O principal mecanismo de atuação da cinza do caroço de açaí (CCA) é o efeito microfíler, no qual suas partículas finas preenchem os vazios entre as frações maiores de cimento e agregados, promovendo melhor empacotamento (Cordeiro *et al.*, 2019) e densificação da matriz (Oliveira *et al.*, 2020; Garcez *et al.*, 2023; Garcez *et al.*, 2024). Essa ação física reduz a porosidade e a absorção de água (Oliveira *et al.*, 2020; Garcez *et al.*, 2023; Garcez *et al.*, 2024), além de favorecer a formação e o refinamento dos produtos de hidratação (Garcez *et al.*, 2023; Garcez *et al.*, 2024).

Embora a CCA de queima não controlada possa reduzir a resistência final, as substituições parciais de 10% a 20%, a CCA podem aumentar a durabilidade proporcionada pelo efeito fíler (Tapajós *et al.*, 2014). Além da trabalhabilidade do concreto, especificamente ao reduzir a propensão à carbonatação (Do Nascimento *et al.*, 2018). A superfície específica da cinza processada também influencia positivamente em relação à quantidade de finos e a demanda de água da mistura (Araújo *et al.*, 2021).

2.5. Resíduos aplicados em matriz cimentícia

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia robusta para a análise e quantificação das contribuições e potenciais impactos ambientais associados a um sistema, processo ou produto (Campos, 2012; Ribaski *et al.*, 2020).

É uma abordagem, conhecida como "do berço ao túmulo", baseia-se no reconhecimento de que qualquer entidade física percorre múltiplos estágios ao longo de sua existência, desde a extração de matérias-primas até sua obsolescência e destinação final (Campos, 2012). A metodologia tem como responsabilidade estruturar de forma acurada as consequências ambientais de todos os fluxos de materiais e energia identificados no sistema (Russo, Rizzi e Montelisciani, 2014).

O propósito central da ACV é identificar os pontos críticos onde intervenções podem gerar melhorias, permitindo a incorporação de práticas sustentáveis e apoiando a formulação de decisões fundamentadas em dados transparentes (Russo, Rizzi e Montelisciani, 2014; Coltro, 2007). Na prática, sua aplicação permite uma análise crítica na especificação de materiais, como no caso de misturas de concreto (Caldas e Sposto, 2017), ou no aprimoramento de sistemas de reciclagem (Coltro, 2007). Os resultados são expressos numericamente em categorias de impacto, o que viabiliza a comparação entre diferentes produtos e auxilia na avaliação de sua viabilidade (Berezuk, 2015).

Metodologicamente, a ACV é estruturada em quatro fases interdependentes, conforme a série c (ABNT, 2014): (a) Definição do Objetivo e Escopo, que estabelece a abrangência, o nível de detalhamento e as fronteiras do sistema; (b) Análise de Inventário (ICV), focada na coleta de dados de entradas e saídas; (c) Avaliação de Impacto (AICV), que traduz os dados do inventário em significância ambiental; e (d) Interpretação, onde os resultados são sumarizados para prover conclusões e recomendações alinhadas ao objetivo inicial.

2.5.1. Objetivo e escopo da ACV

A fase inicial da Análise do Ciclo de Vida (ACV) é a definição do objetivo e do escopo. A definição do objetivo exige a documentação clara de aspectos fundamentais, incluindo a aplicação pretendida dos resultados, as razões (internas ou externas) para a condução do estudo e o público-alvo específico. Além disso, deve-se detalhar as limitações do método (sejam elas de cobertura de impacto ou metodológicas), identificar os responsáveis e financiadores do estudo, e declarar explicitamente se os resultados se destinam a afirmações comparativas de divulgação pública (Joint Research Centre, 2010).

Uma vez estabelecido o objetivo, a definição do escopo detalha o objeto de estudo, especificando as unidades de processo que serão avaliadas (Bento, 2016). Esta etapa exige a descrição de múltiplos itens alinhados ao objetivo, como o tipo de estudo

(ACV ou ICV), o sistema de produto, suas funções, e a definição das fronteiras do sistema, que inclui as regras de corte. O escopo também deve determinar as categorias de impacto e os métodos de Avaliação de Impacto (AICV) a serem aplicados, os requisitos de qualidade dos dados (cobertura temporal, geográfica e tecnológica), suas fontes e incertezas, a necessidade de análise crítica e o formato do relatório final (Joint Research Centre, 2010).

Dentro do escopo, a unidade funcional é um elemento central, pois fornece a descrição quantitativa e qualitativa precisa da função do sistema, sendo indispensável para garantir a validade de qualquer comparação entre produtos (Bento, 2016). Além disso, uma decisão crucial de modelagem deve ser tomada nesta fase: a escolha entre uma abordagem atribucional ou consequencial, e o método de tratamento de processos multifuncionais (alocação ou expansão do sistema). Essa decisão inicial é crítica, pois impactará diretamente as escolhas subsequentes, incluindo o tipo de dados de inventário a serem coletados (Bento, 2016).

2.5.2. Inventário do Ciclo de Vida

O Inventário do Ciclo de Vida consiste na coleta e cálculo dos dados que quantificam as entradas e saídas de um sistema de produto, como o uso de recursos e as liberações para o ambiente (ABNT, 2014). Este inventário documenta os fluxos de energia, materiais e emissões (Dong *et al.*, 2015) em todas as etapas do ciclo, desde a extração de matérias-primas até o descarte (Vieira; Calmon; Coelho, 2016), e servirá de base para a avaliação de impacto (ABNT, 2014). Para isso, recomenda-se a elaboração de um quadro de fluxo técnico do sistema (Bento, 2016). Os dados utilizados podem ser primários, coletados diretamente nos processos, ou secundários, obtidos de bases de dados genéricas ou literatura (Joint Research Centre, 2010).

A coleta de dados é uma etapa exaustiva, pois um ciclo de vida pode conter milhares de processos unitários, tornando a coleta integral de dados primários impraticável (Moreau *et al.*, 2012; Building Research Establishment, 2013). Como alternativa, sugere-se o uso de bancos de dados do inventário (Dong *et al.*, 2015) ou uma abordagem híbrida: utilizar dados medidos (primários) para os processos específicos da indústria e dados calculados ou estimados (secundários) para processos fora do seu controle, como a produção de matérias-primas (Passauello *et al.*, 2014). É crucial definir as fronteiras do sistema, explicitando os processos incluídos e excluídos num diagrama (Joint Research Centre, 2010), pois a qualidade geral do estudo é afetada pelo

componente de dados de pior qualidade (Bento, 2016).

Para gerenciar a complexidade, aplicam-se critérios de corte para fluxos de baixa participação (Building Research Establishment, 2013), geralmente 1% do fluxo mássico de entrada, desde que o total desconsiderado seja inferior a 5% da energia e massa do módulo (Passauello *et al.*, 2014). Contudo, processos com efeitos ambientais significativos, elevado uso de energia ou classificados como resíduos perigosos devem ser incluídos independentemente de sua participação, balanços de massa são usados para assegurar que as entradas são suficientes para todas as saídas (Passauello *et al.*, 2014).

Finalmente, os dados coletados são ajustados ao fluxo de referência, que se relaciona quantitativamente com a unidade funcional (Bento, 2016), resultando na quantificação de recursos e emissões que alimentará a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) (Passauello *et al.*, 2014).

2.5.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a fase da ACV destinada a compreender e avaliar os potenciais impactos ambientais (ABNT, 2014). Sua função primordial é traduzir os fluxos elementares de entradas e saídas, quantificados na fase do inventário, em indicadores de impacto relacionados à saúde humana, ao ecossistema e ao esgotamento de recursos (Bento, 2016). O detalhamento desta análise, bem como a escolha das categorias de impacto e das metodologias, depende diretamente do objetivo e do escopo definidos no início do estudo (ABNT, 2014).

Nesta etapa, os dados do ICV são agregados em categorias de impacto conforme o método selecionado, o qual geralmente é do tipo multicategoria (Monteiro e Freire, 2012). Esses métodos, frequentemente implementados em ferramentas computacionais (ABNT, 2014), podem ser orientados a "ponto médio" (midpoint) ou "ponto final" (endpoint). Os métodos de ponto médio focam em um ponto específico na cadeia de causa e efeito, como a acidificação ou a eutrofização (Bare e Gloria, 2008). Em contrapartida, os métodos de ponto final avaliam o dano resultante em elementos que a sociedade busca proteger, sendo, por essa razão, muitas vezes considerados mais compreensíveis para os tomadores de decisão (Bare e Gloria, 2008).

A AICV também tem a função de apoiar a interpretação dos resultados. Para isso, podem ser aplicadas etapas opcionais, como a normalização e a ponderação, que visam obter um resultado agregado (ABNT, 2014). A normalização consiste em calcular a magnitude dos indicadores em relação a uma informação de referência. A ponderação,

por sua vez, utiliza fatores numéricos baseados em escolhas de valores para agregar os resultados entre as diferentes categorias (ABNT, 2014). É fundamental notar que a ponderação exige a normalização prévia, sob o risco de fornecer resultados falsos (Joint Research Centre, 2010). Além disso, a análise de impacto é necessária para a aplicação de regras de corte e para a avaliação da completude dos dados (Bento, 2016).

É crucial compreender que a AICV analisa impactos potenciais decorrentes de intervenções que cruzam a fronteira entre a tecnosfera e a ecosfera (Bento, 2016). Portanto, os resultados da AICV devem ser interpretados como indicadores de relevância ambiental, e não como previsões de efeitos reais, diferenciando-se de uma avaliação de risco. O cálculo desses indicadores deve seguir estritamente os métodos definidos no escopo do estudo (Bento, 2016).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho possui caráter qualitativo e quantitativo, com enfoque exploratório baseado no levantamento e análise de dados secundários. O estudo divide-se em duas etapas etapas complementares:

- **Análise do Ciclo de Vida (ACV):** análise ambiental das misturas de concreto, cujos dados primários foram extraídos do Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica (PIBIC) (Alves, 2024);
- **Análise Econômica:** estudo do custo-benefício das misturas de concreto, considerando as particularidades logísticas da região de Manaus-AM.

3.1. Definição dos parâmetros de cálculo e insumos

Para o estudo comparativo, foram selecionados materiais convencionais e, visando a substituição parcial do clínquer, materiais alternativos e resíduos.

Os materiais constituintes foram:

- **Cimento Portland (CP V):** Cimento de alta resistência inicial, composto majoritariamente por silicatos de cálcio.
- **Cimento LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*):** Como não é comercializado prontamente no Brasil, foi simulado por meio de uma mistura aglomerante composta por clínquer, metacaulinita – Fonte de aluminossilicatos (52% SiO₂, 40,5% Al₂O₃) e fíler calcário – Carbonato de cálcio com 99% de pureza.
- **Resíduos (Substitutos Parciais):**
 - **Sílica Ativa (SA):** Subproduto da produção de silício metálico ou ligas de ferrosilício.
 - **Cinza Volante (CV):** Resíduo da queima de carvão mineral em termelétricas.
 - **Cinza do Bagaço de Cana (CBC):** Resíduo agroindustrial da produção de açúcar e etanol.
 - **Cinza do Caroço de Açaí (CCA):** Obtida pelo beneficiamento térmico do caroço de açaí (calcinação a 600°C por 6h).

Visando a comparação técnica e econômica, as quantidades dos insumos foram normalizadas para a produção de 1 m³ de concreto, assumindo uma densidade teórica de

aproximadamente 2.400 kg/m³, conforme recomendação da NBR 6118 (2023), para fins de cálculo. A Tabela 1 apresenta a composição de cada material para os traços estudados.

Tabela 1. Composição utilizada dos materiais em quilogramas

Material	CPV (Ref)	LC3	LC ³ + CV	LC ³ + SA	LC ³ + CBC	LC ³ + CCA
Clínquer / CPV	350,0	192,5	157,5	157,5	157,5	157,5
Metacaulinita	-	105,0	105,0	105,0	105,0	105,0
Fíler	-	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5
CV	-	-	19,3	-	-	-
SA	-	-	-	19,3	-	-
CBC	-	-	-	-	19,3	-
CCA	-	-	-	-	-	19,3
Areia Média	822,5	822,5	822,5	822,5	822,5	822,5
Brita (Seixo)	997,5	997,5	997,5	997,5	997,5	997,5
Água	220,5	220,5	220,5	220,5	220,5	220,5
Superplastificante	-	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Massa total (kg/m ³)	2.390,5	2.394,8	2.379,0	2.379,0	2.379,0	2.379,0

Fonte: próprio autor (2025)

Para a análise de custos, a composição de custos unitários e os preços dos insumos basearam-se nos dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) referente à localidade de Manaus (AM), data-base setembro de 2025, com encargos sociais não desonerados em cotações de mercado local para itens não tabelados, como as adições minerais e aditivos específicos.

Para insumos não constantes na tabela oficial ou com especificidades químicas (como aditivos de alta performance e adições minerais), foram realizadas cotações diretas no mercado local e utilizados valores médios de literatura técnica especializada.

As premissas adotadas para cada grupo de materiais foram:

- Cimento Portland (CP V-ARI): Adotou-se o preço mediano de R\$ 0,86/kg, obtido via pesquisa local de mercado, referente ao cimento de alta resistência inicial a granel, considerando a densidade teórica de 3.100 kg/m³.
- Agregados (Areia e Brita): Valores extraídos do SINAPI e convertidos para massa considerando a densidade teórica de 1.600 kg/m³.
- Areia Média: Ref. SINAPI 000370 = R\$ 110,00/m³ ou \approx R\$ 0,07/kg

- Brita 1: Ref. SINAPI 004721 = R\$ 278,53/m³ ou ≈ R\$ 0,17/kg
- Água de Amassamento: Utilizou-se a referência SINAPI 044480 pressupondo fornecimento via rede pública, ao custo de R\$ 18,92/m³ (≈ R\$ 0,019/kg), densidade teórica de 1.000 kg/m³.
- Aditivo Superplastificante (PCE): Devido à especificidade química não contemplada no SINAPI, adotou-se o preço de mercado estimado para a região de R\$ 60,00/kg, densidade teórica de 1.070 kg/m³.
- Materiais Alternativos (LC³ e Adições):
 - Metacaulinita e Fíler Calcário: Custo de aquisição em R\$ 1,00/kg, baseado na média de mercado e estudos correlatos, densidades teóricas de 2.600 kg/m³.
 - Sílica Ativa: Custo estimado em R\$ 1,60/kg, densidade teórica de 3.100 kg/m³.
 - Cinzas (Volante, Bagaço de Cana e Carvão de Açúcar): Consideradas resíduos agroindustriais, com custo de aquisição nulo (R\$ 0,00/kg), densidade teórica (não considerada).

Visando refletir a realidade regional amazônica, o custo de transporte foi calculado separadamente e acrescido ao valor de aquisição. Utilizou-se como base a composição auxiliar SINAPI 93590 (Transporte com caminhão basculante de 10 m³, em via urbana pavimentada), com custo unitário de R\$ 1,05/m³.km.

O custo do frete (C_{frete}) foi obtido pela relação entre o custo volumétrico do transporte, a densidade do material e a Distância Média de Transporte (DMT) específica:

$$C_{frete} = \left(\frac{1,05}{\rho_{material}} \right) \times DMT$$

Onde:

$\rho_{material}$: Densidade do insumo (kg/m³);

DMT: Distância da fonte até a usina/laboratório.

As distâncias consideradas foram: 540 km para a areia (jazidas distantes), 45 km para o cimento, 950 km para insumos incorporados ao concreto. O custo energético de processamento dos materiais na usina não foi contabilizado, mantendo a coerência com as fronteiras do sistema adotadas na Análise do Ciclo de Vida (ACV).

3.2. Procedimentos de dosagens

O programa experimental envolveu a ACV de seis misturas distintas, detalhadas na Tabela 2. A mistura de concreto de referência (Corpo de prova padrão - CPV) utilizou o traço 1 : 2,35 : 2,85 (cimento: agregado fino: agregado graúdo, em massa), proporção comum para fins estruturais no Brasil.

A relação água/aglutinante (w/b) foi fixada em 0,63, obtida experimentalmente para um abatimento de 100 mm sem uso de superplastificante.

Para a confecção das misturas LC³, utilizou-se o cimento Portland CP V-ARI 40 (ASTM C150 Tipo III), composto por 90% de clínquer, substituindo-o parcialmente por metacaulinita (30%) e fíler calcário (15%), por ser a composição mais próxima da usada para um cimento LC³.

Nas misturas LC³(S), LC³(CV), LC³(SBC) e LC³(CCA), o percentual de matérias-primas alternativas (resíduos) foi fixado em 10% da massa do aglomerante, visando a redução do clínquer. Para preservar a relação a/b, foi adicionado um superplastificante à base de Policarboxilato éter (PCE).

Tabela 2. Proporção das misturas de concreto em porcentagem

Material	CPV (Ref)	LC3	LC ³ + CV	LC ³ + SA	LC ³ + CBC	LC ³ + CCA
Clínquer / CPV	100	55	45	45	45	45
Metacaulinita	-	30	30	30	30	30
Fíler	-	15	15	15	15	15
CV	-	-	10	-	-	-
SA	-	-	-	10	-	-
CBC	-	-	-	-	10	-
CCA	-	-	-	-	-	10

Fonte: próprio autor (2025)

3.3. Caracterização dos materiais

Como etapa preliminar à avaliação ambiental e econômica, as misturas desenvolvidas foram caracterizadas quanto à sua resistência à compressão axial (f_{ck}) aos 28 dias. Esta caracterização tem por objetivo validar a função estrutural, definindo a aplicabilidade de cada traço em conformidade com as normas brasileiras vigentes.

Os resultados de resistência à compressão foram obtidos por meio do rompimento dos corpos de prova aos 28 dias, sendo: CPV 32Mpa, LC³ 28,5 Mpa, as misturas contendo

LC³ + SA, CV e CBC apresentaram a média dos resultados em 22 Mpa e a mistura com a CCA apresentou resultado de 14 Mpa.

Sob a ótica da ABNT NBR 8953:2015, que classifica os concretos para fins estruturais pela massa específica e resistência, os traços CPV, LC³ puro e LC³ + Sílica enquadram-se no Grupo I (Classes C20 a C50). Especificamente, o traço CPV (32 MPa) atende à classe C30, enquanto os traços LC³ (28,5 MPa) enquadram-se na classe C25.

Já a distinção funcional baseia-se na ABNT NBR 6118:2023 (Projeto de estruturas de concreto). Conforme o item 8.2.1 desta norma, a classe mínima para concretos com armadura passiva (concreto armado) é a C20 (20 MPa). Desta forma: As misturas CPV e LC³ (Puro, Sílica, CV e CBC), por apresentarem resistência superior a 20 MPa, são validadas como aptas para fins estruturais. A mistura LC³ + Cinza do Carvão de Açai (CCA), com resistência média de 14,0 MPa, situa-se abaixo do limite normativo mínimo para concreto armado. Portanto, este traço é caracterizado tecnicamente como material para aplicações não estruturais ou elementos de vedação (como blocos de alvenaria ou pavimentação leve), onde a exigência mecânica é inferior.

O traço LC³ alcançou 28,5 MPa, aproximadamente 11% inferior ao CPV, comportamento coerente com as análises de Garcez (2023), que relaciona essa diferença à menor fração de clínquer do sistema e ao efeito de diluição, que supera os ganhos provenientes da reação sinérgica entre argila calcinada e fíler calcário na formação de carbo aluminatos. Tal efeito implica na redução de desempenho observada nas misturas ternárias, nas quais a substituição parcial do cimento diminui a disponibilidade de silicatos de cálcio essenciais à resistência inicial, embora as adições pozolânicas contribuam para maior densificação microestrutural em idades mais avançada.

No caso da Cinza Volante, o resultado corrobora Casagrande *et al.* (2019) e Matos, Junckes e Prudêncio Jr (2019), que atribuem a menor resistência aos 28 dias à lenta reação pozolânica deste material, que tende a contribuir mais efetivamente em idades avançadas.

Rocha, Mennucci e Suegama (2015) apontam que a CBC atua essencialmente como fíler, sem contribuir para reações de hidratação, de modo que sua porosidade e capacidade de absorção diminuem a água disponível na pasta e, conseqüentemente, a resistência mecânica. De forma complementar, Oliveira (2021) explica que a absorção de água pelas partículas de cinza aumenta o índice de vazios e a porosidade da matriz, especialmente em maiores teores de substituição, resultando em maiores valores de absorção e queda de resistência.

A mistura contendo Cinza do Carvão de Açaf (CCA) apresentou o pior desempenho mecânico do estudo, atingindo 14 MPa. Esse comportamento está de acordo com Garcez *et al.* (2024), que atribui à CCA uma estrutura porosa e irregular decorrente da queima do endocarpo lignocelulósico, característica que compromete a compactação e a eficiência da hidratação. Segundo Garcez (2023) também observa que esse resíduo, quando incorporado a matrizes cimentícias, tende a reduzir a resistência devido à sua baixa densidade e à atuação essencialmente como filler inerte, sem reatividade significativa nas primeiras idades. A expressiva queda para 14 MPa sugere que a CCA utilizada pode ter aumentado a demanda de água ou introduzido regiões frágeis na pasta, limitando quaisquer benefícios de empacotamento de partículas.

3.4. Análise do Ciclo de Vida (ACV)

O objetivo do estudo para aplicação da ACV foi investigar o ciclo de vida de diferentes traços de concreto, desde a extração das matérias-primas até a produção final. O escopo do sistema consistiu em avaliar comparativamente os potenciais impactos ambientais das misturas propostas.

As fronteiras do estudo foram delimitadas como "berço ao portão" (cradle-to-gate), englobando as etapas de extração de recursos naturais, transporte e processamento das matérias-primas até a usina de concreto. A unidade funcional utilizada para quantificar as funções do produto na ACV foi 1 kg de corpo de prova de concreto.

O fluxo de referência adotado para o inventário baseou-se na massa de matérias-primas necessárias para a produção desta unidade, 2,5 kg.

3.4.1. Inventário do ciclo de vida

A fase de inventário do Ciclo de Vida é definida como a coleta e cálculo dos dados que quantificam as entradas (recursos) e saídas (emissões) de um sistema de produto.

Para a análise ambiental, o inventário foi realizado utilizando o software livre OpenLCA. Os dados de inventário foram extraídos da base "Ecoinvent 3.7.1 cut-off unit regionalized", que abrange dados regionalizados para a construção civil no Brasil, conferindo maior confiabilidade à análise. Os fluxos de entradas (matérias-primas, energia) e saídas (emissões) foram devidamente contabilizados no projeto do PIBIC por Alves (2024). A modelagem computacional foi realizada no software open source OpenLCA.

3.4.2. Avaliação dos impactos ambientais (AICV)

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a fase que traduz os fluxos do inventário em potenciais impactos ambientais. O método selecionado para a AICV foi o ReCiPe, frequentemente adotado para matrizes cimentícias. Este método integra as abordagens midpoint (foco em pontos específicos da cadeia de causa e efeito, como acidificação) e endpoint (foco no dano final à saúde humana ou ecossistemas).

As categorias de impacto ambiental abordadas no estudo foram: formação de matéria particulada; aquecimento global ao ecossistema; uso da terra; escassez de recursos minerais; formação de ozônio ao ecossistema terrestre; depleção de ozônio estratosférico; acidificação terrestre; e ecotoxicidade terrestre.

A análise demonstra que, apesar da redução do teor de clínquer nos traços com cimento LC³, o custo total por m³ foi superior ao traço de referência (CPV). Isso se deve, majoritariamente, à necessidade de importação de metacaulinita e fíler de outras regiões e ao uso mandatório de superplastificante de alto desempenho para manter a trabalhabilidade das misturas com agregados finos.

3.5. Análise estatística integrada

A avaliação da viabilidade das misturas de concreto desenvolvidas seguiu uma abordagem multidimensional, integrando os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com a análise de custos de produção por meio de um procedimento metodológico que se iniciou com a normalização de dados relativos. Para permitir a comparação direta entre categorias com unidades distintas, todos os valores absolutos de custo (R\$/m³) e de impactos ambientais foram normalizados em relação à mistura de referência (CPV), atribuindo-se a esta o valor de 100%.

Foi desenvolvido um diagrama de dispersão relativa em formato de gráfico de quadrantes, onde o eixo das abscissas representa o custo relativo de produção e o eixo das ordenadas, o impacto ambiental relativo. No diagrama a dispersão dos pontos foi utilizada para uma análise de agrupamento e tendências, permitindo identificar as correlações entre o incremento financeiro e o ganho ambiental obtido em cada uma das oito categorias de impacto avaliadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados da análise econômica dos diferentes traços de concreto, seguidos pela integração com a avaliação ambiental (Eco-eficiência) extraída da ACV desenvolvida no PIBIC (Alves, 2014). O intuito é demonstrar se a viabilidade técnica e ambiental considerando o cenário de Manaus-AM.

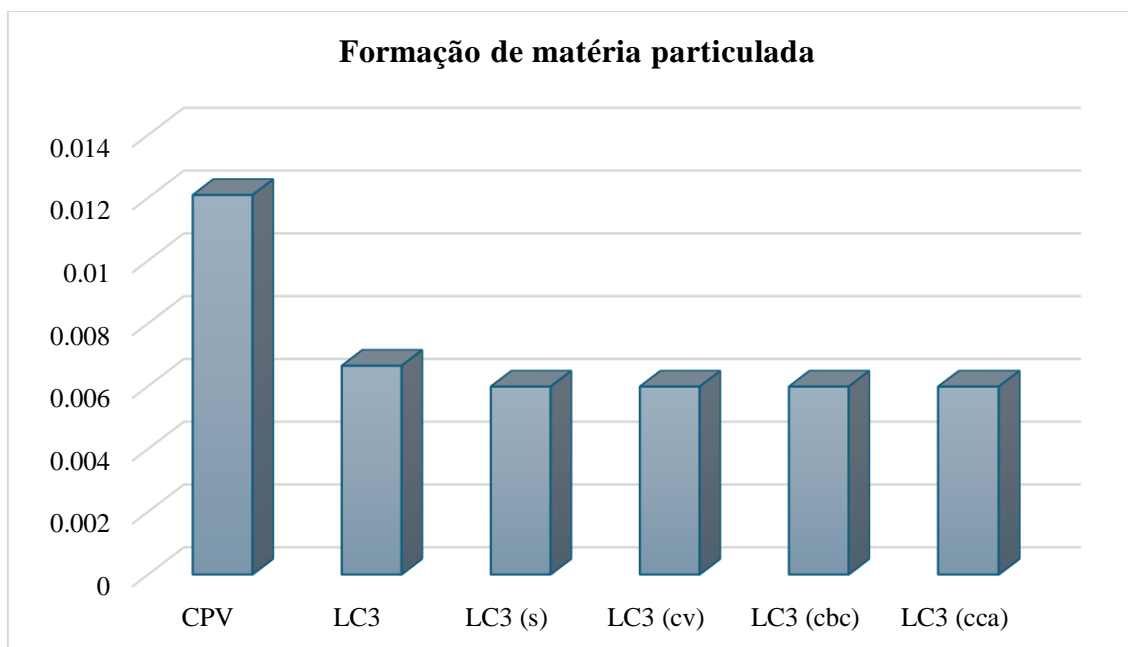
4.1. Resultados da ACV

Os resultados estão apresentados em gráficos abordando o comparativo quanto aos aspectos ambientais da mistura de solo-cimento utilizando os dois tipos de cimento (CPV e LC³) e com cada matéria-prima incorporada à mistura separadamente (sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana e cinza do caroço de açaí).

4.1.1. Formação de matéria particulada

O Gráfico 1 apresenta o resultado da ACV para a categoria de impacto “formação de matéria particulada”.

Gráfico 1. Resultado da ACV para formação de matéria particulada



Fonte: próprio autor (2025).

A formação de material particulado refere-se à dispersão atmosférica de substâncias químicas sólidas e líquidas que, devido às suas dimensões reduzidas,

permanecem em suspensão (Brito; Araújo e Silva, 2018). Segundo Medeiros (2016), tais partículas representam um risco toxicológico significativo, correlacionando-se ao aumento de patologias respiratórias, além de promoverem degradação ambiental via contaminação edáfica e danos à flora. O Gráfico 1 ilustra os indicadores de impacto obtidos nesta categoria.

A análise dos dados evidencia que o corpo de prova de referência, composto exclusivamente por cimento CPV, apresentou o maior potencial de impacto na geração de material particulado, sendo responsável por 28,32% do total da categoria. Em contrapartida, as matrizes contendo resíduos demonstraram melhor desempenho ambiental. Destaca-se o traço LC³ + CBC (Cinza do Bagaço da Cana), que registrou apenas 14,02% de impacto. Este resultado denota uma mitigação substancial de 50,49% em comparação ao uso isolado do CPV.

Ao confrontar estes achados com a literatura, verifica-se a eficácia da incorporação de CBC, segundo Assunção (2020), em sua Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de argamassas, reportou uma redução de 22,83% na formação de material particulado para os traços com maiores teores de substituição por cinzas, em relação à referência de cimento Portland. Corroborando essa tendência, Huang *et al.* (2023) observaram, em concretos com substituição parcial por CBC, uma diminuição de 8,78% no impacto ambiental comparado ao concreto convencional.

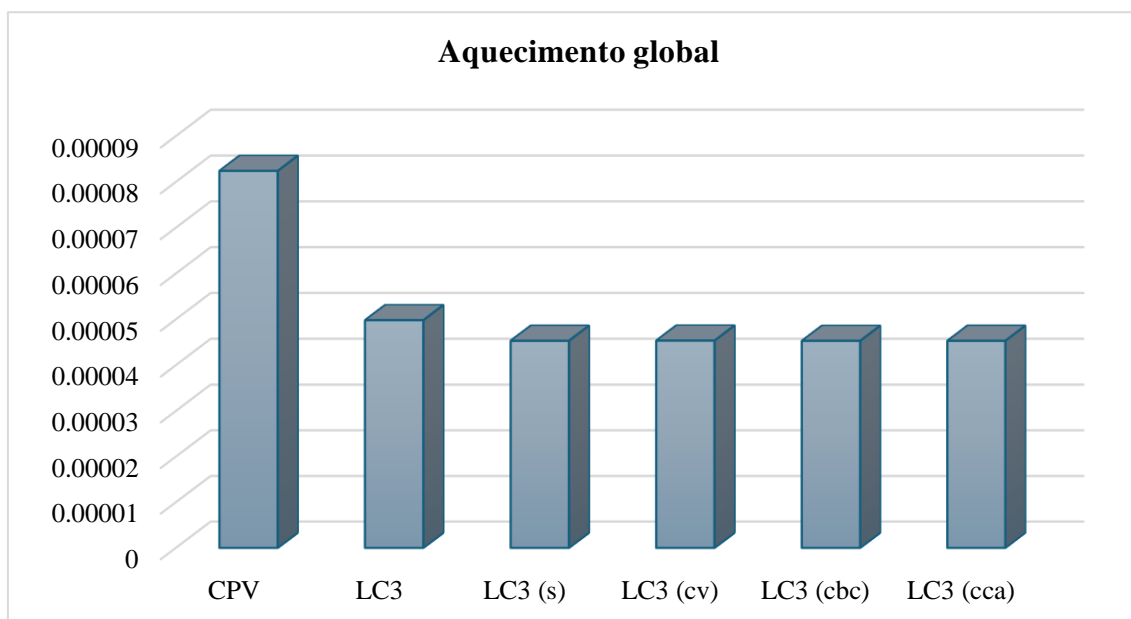
4.1.2. Aquecimento global

O Gráfico 2 apresenta o resultado da ACV para a categoria de impacto “aquecimento global”.

A categoria de impacto referente ao Aquecimento Global decorre da retenção de radiação térmica na atmosfera por gases de efeito estufa (GEE), notadamente o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), o que eleva as temperaturas médias globais (Sousa, 2008; Gatti, 2022). Esse fenômeno acarreta danos significativos à saúde humana e aos ecossistemas (Huijbregts *et al.*, 2016).

Embora o Potencial de Aquecimento Global (GWP) seja uma métrica eficaz para comparar a relevância dos GEE no ciclo de vida de um produto, ele é utilizado em conjunto com outros indicadores para uma avaliação ambiental abrangente. Os resultados desta categoria estão dispostos no Gráfico 2.

Gráfico 2. Resultado da ACV para aquecimento global



Fonte: próprio autor (2025).

A análise do Gráfico 2 demonstra que a dosagem com cimento CPV apresentou a maior contribuição para o aquecimento global. Esse desempenho atribui-se à elevada geração de emissões durante a produção do clínquer, incluindo monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂) (Roselló, 2017; Yeo et al., 2019) e dióxido de carbono (CO₂) (SNIC, 2013).

Em contrapartida, a mistura produzida com cimento LC³ associado à Cinza do Bagaço de Cana (CBC) registrou o menor impacto ambiental. A incorporação da CBC na composição permitiu atingir níveis expressivos de mitigação. Comparativamente, este traço obteve uma redução de impacto de aproximadamente 45,02% em relação ao CPV e de 9,05% em relação ao LC³ padrão.

Tais resultados corroboram Torres *et al.* (2020), que destacam as vantagens ambientais do uso da CBC na construção civil, auxiliando na diminuição das emissões de CO₂ inerentes à fabricação do cimento Portland. Adicionalmente, Fairbairn *et al.* (2012) ressaltam que a substituição parcial do clínquer por cinzas de bagaço pode reduzir consideravelmente as emissões; o estudo indica que, mesmo em cenários conservadores, a emissão média de CO₂ por tonelada de cinza chega a ser quase 100 vezes inferior à do clínquer.

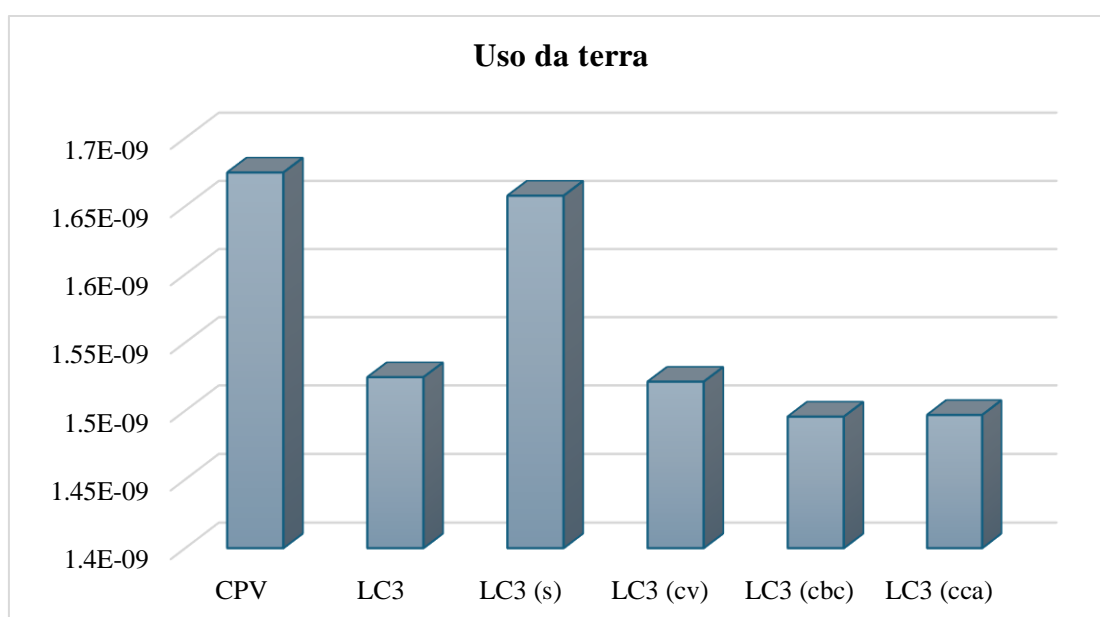
Essa tendência de redução do impacto no aquecimento global é validada por outros estudos. Berezuk (2015) observou uma diminuição de 3,19% no impacto de

concretos com substituição parcial por CBC em relação ao concreto de referência (CPV). Similarmente, Huang *et al.* (2023) verificaram que a substituição parcial por CBC resultou em um impacto 8,78% menor no traço com maior teor de cinzas, comparado ao concreto convencional.

4.1.3. Uso da terra

O Gráfico 3 apresenta o resultado da ACV para a categoria de impacto “uso da terra”.

Gráfico 3. Resultado da ACV para uso da terra



Fonte: próprio autor (2025).

A categoria de impacto "Uso da Terra" mensura a perda de biodiversidade decorrente da conversão de áreas naturais para fins de agricultura, silvicultura e urbanização, contabilizando também o tempo de regeneração ecossistêmica (Huijbregts et al., 2017). Tais alterações antrópicas podem desestabilizar biomas inteiros, conduzindo à extinção de espécies (Pitoli Lyra, 2022). Os dados referentes a este indicador encontram-se ilustrados no Gráfico 3.

A análise gráfica evidencia que a matriz de referência (CPV) apresenta a maior carga ambiental nesta categoria. Em contrapartida, a dosagem composta por cimento LC³ com adição de Cinza do Bagaço de Cana (CBC) obteve o menor índice de impacto. Segundo Assunção (2020), esse desempenho favorável deve-se à natureza da CBC como subproduto agroindustrial. Visto que a produção de açúcar e etanol é um pilar

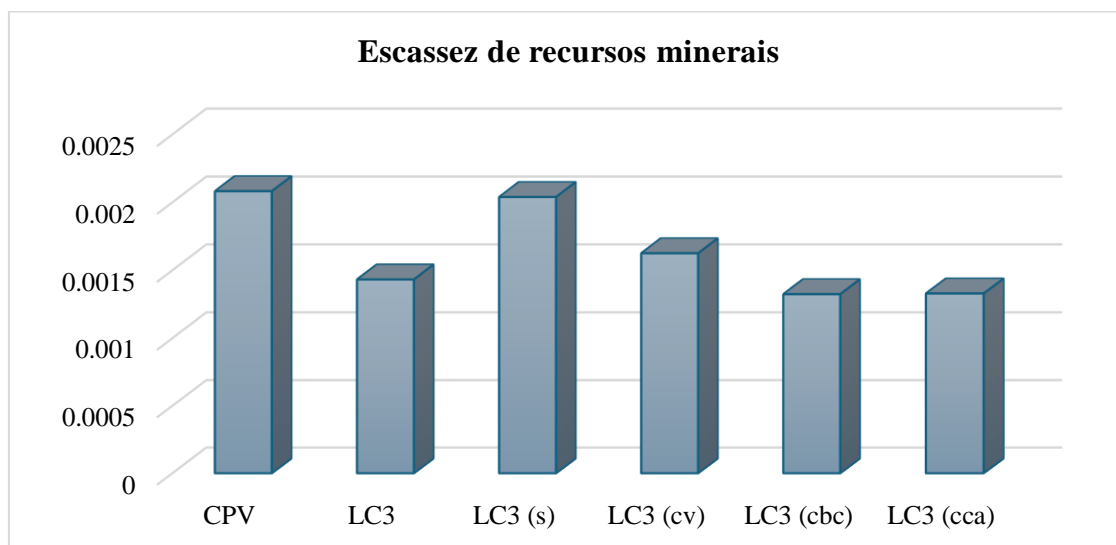
econômico preexistente, a valorização da cinza como matéria-prima secundária na construção civil evita a expansão de novas áreas agrícolas ou de mineração dedicadas exclusivamente à extração de insumos.

Quantitativamente, o CPV registrou um impacto de 17,87%, enquanto o compósito LC³ (CBC) apresentou 15,96%, resultando em uma mitigação relativa de 10,69%. Estes resultados contrastam com o estudo de Sinoh *et al.* (2020), que reportou um aumento de 58,4% no uso da terra para concretos com CBC. A divergência justifica-se metodologicamente: atribuíram os encargos ambientais do cultivo da cana ao concreto, enquanto a presente análise considera os "impactos evitados" pela remoção de um resíduo, isentando a cinza das cargas do processo agrícola primária.

4.1.4. Escassez de recursos minerais

O Gráfico 4 apresenta o resultado da ACV para a categoria de impacto “escassez de recursos minerais”.

Gráfico 4. Resultado da ACV para recursos minerais



Fonte: próprio autor (2025).

A categoria de impacto denominada Escassez de Recursos Minerais quantifica o esgotamento de reservas abióticas decorrente da produção industrial. Esta métrica avalia o custo excedente futuro para a extração de minérios, baseando-se na premissa de que a exploração contínua de reservas de alta qualidade torna a extração subsequente tecnicamente mais complexa e economicamente onerosa (Vieira et al., 2016; Huijbregts et al., 2017). Os indicadores obtidos encontram-se dispostos no Gráfico 4.

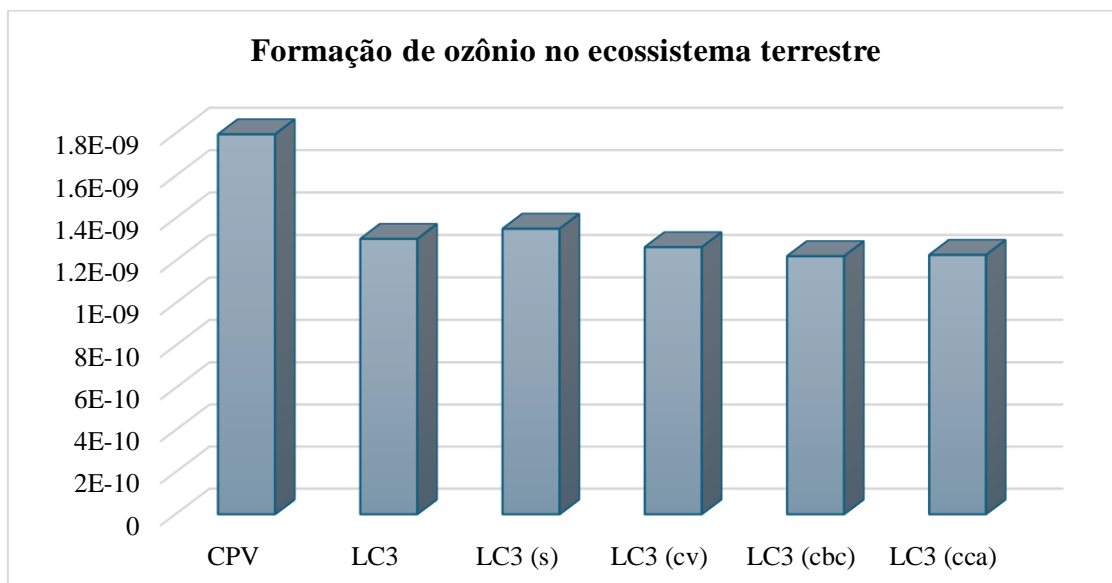
A análise dos dados revela que a matriz de referência (CPV) apresentou o maior índice de impacto. Tal resultado é corroborado por Vitorio Junior (2020), que atribui a elevada carga ambiental do CPV à demanda intensiva por matérias-primas virgens necessárias à sua fabricação. Em contrapartida, os traços formulados com cimento LC3 e incorporação de resíduos (cinzas) demonstraram desempenho superior. Segundo Santos (2013), a redução do teor de clínquer através da adição de cinzas gera benefícios duplos: mitigação de impactos ambientais e viabilidade econômica.

É pertinente ressaltar, contudo, o comportamento do traço com cimento LC3 isolado. Embora mais sustentável que o CPV, sua composição demanda metacaulinita, um material obtido via extração mineral de jazidas de argila, o que contribui para o impacto de uso do solo e esgotamento de recursos na região de lavra. Não obstante, a estratégia de substituição por cinzas demonstra-se eficaz: além de reduzir a extração de minerais primários, Machado e Carmona (2014) e Moraes et al. (2016) destacam que o uso desses resíduos pode aprimorar a resistência mecânica e reduzir o consumo global de cimento, otimizando a eficiência do material.

4.1.5. Formação de ozônio ao ecossistema terrestre

O Gráfico 5 apresenta o resultado da ACV para a categoria de impacto “formação de ozônio ao ecossistema terrestre”.

Gráfico 5. Resultado da ACV para formação de ozônio



Fonte: próprio autor (2025).

A categoria de impacto de Formação de Ozônio Fotoquímico refere-se à síntese de ozônio troposférico (O_3) nas camadas inferiores da atmosfera. Este fenômeno ocorre através de reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio (NO_x) e Compostos Orgânicos Voláteis (COV) ou hidrocarbonetos, catalisadas pela radiação solar (Silva et al., 2015). A alta concentração de ozônio troposférico é deletéria, estando associada ao aumento da morbidade respiratória e à redução da expectativa de vida humana (Van Zelm et al., 2016), bem como à fitotoxicidade, que compromete a biodiversidade vegetal e a produtividade dos ecossistemas (Pitoli Lyra, 2022; Huijbregts et al., 2017). Os resultados obtidos para esta categoria são detalhados no Gráfico 5.

A análise dos dados indica que o cimento CPV é o maior contribuinte para este impacto ambiental. Tal desempenho deve-se à elevada concentração de precursores de ozônio emitidos durante a clínquerização. Conforme Zimele et al. (2019), gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x) são subprodutos críticos da queima de combustíveis e da descarbonatação do calcário no forno de cimento.

O inventário confirma que o alto teor de clínquer no CPV é o fator determinante para suas emissões, corroborando estudos de Roselló (2017), Yeo et al. (2019) e Miranda (2023), que associam a produção de clínquer à liberação intensiva de CO, SO_2 e NO_x . Adicionalmente, processos auxiliares, como o transporte e o tratamento de água, contribuem para a pegada de carbono e emissões associadas (Isaia e Gastaldini, 2004).

Em contrapartida, as misturas formuladas com cimento LC³ apresentaram o menor potencial de formação de ozônio. A substituição parcial do clínquer por argila calcinada e calcário, somada à incorporação de resíduos, resultou em uma mitigação expressiva. Enquanto o CPV foi responsável por uma carga de impacto de referência, os traços com LC³ demonstraram uma redução média relativa de aproximadamente 31,98 %, validando a eficiência ambiental desta matriz cimentícia alternativa.

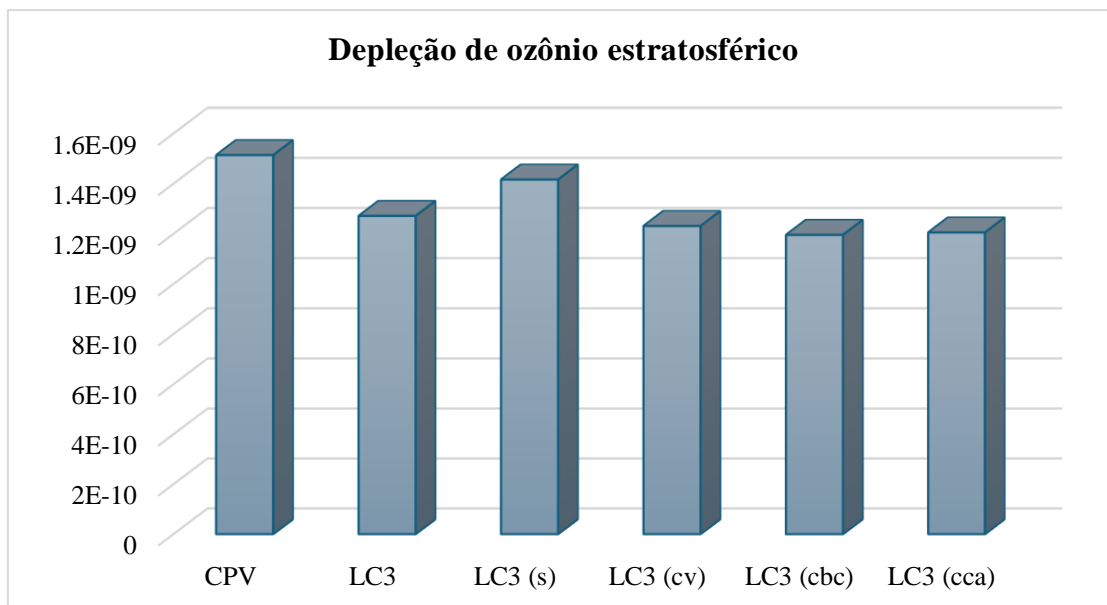
4.1.6. Depleção de ozônio

O Gráfico 6 apresenta o resultado da ACV para a categoria de impacto “depleção de ozônio estratosférico”.

A categoria de impacto de Depleção da Camada de Ozônio refere-se à degradação do ozônio estratosférico por substâncias halogenadas, como os clorofluorcarbonetos (CFCs). Ao atingirem a estratosfera, esses compostos catalisam a quebra das moléculas de ozônio, reduzindo a barreira natural contra a radiação

ultravioleta (UV) e potencializando riscos à saúde humana e à integridade dos ecossistemas (CNPEM, 2021). O desempenho das amostras nesta categoria é ilustrado no Gráfico 6.

Gráfico 6. Resultado da ACV para depleção de ozônio



Fonte: próprio autor (2025).

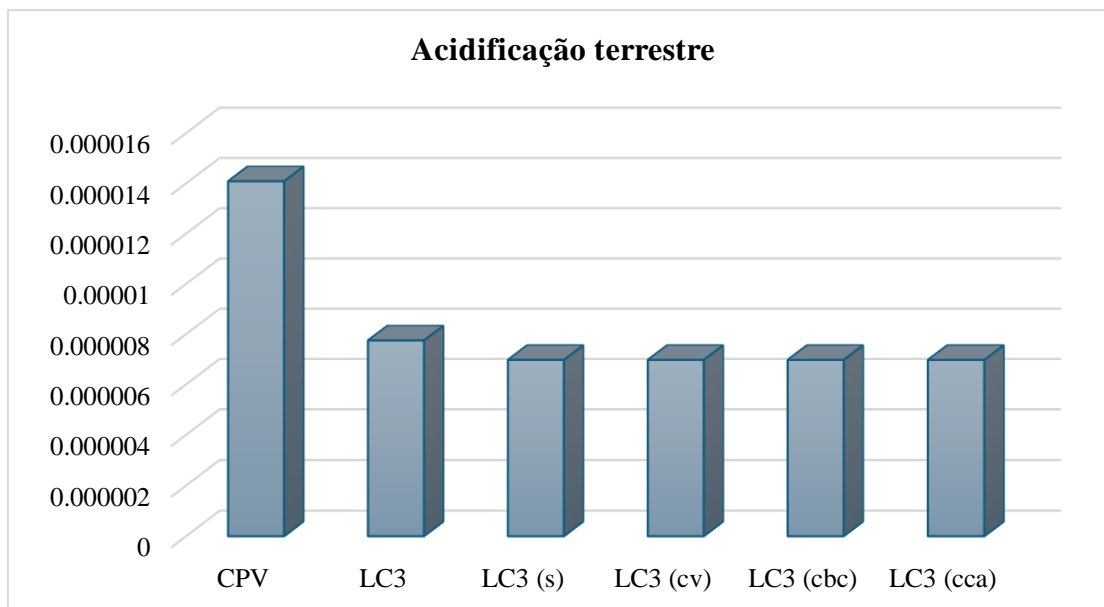
A análise dos dados evidencia uma correlação inversa entre o teor de substituição e o impacto ambiental: observa-se um declínio gradual no potencial de depleção à medida que se incorporam materiais alternativos à matriz cimentícia. Conseqüentemente, o cimento CPV figurou como o maior gerador de impacto, enquanto as dosagens com cimento LC³ apresentaram os melhores resultados ambientais. Em termos quantitativos, a adoção do sistema LC³ permitiu uma redução relativa de aproximadamente 21,01% em comparação à referência (CPV).

Tal comportamento encontra paralelo na literatura especializada. Assunção (2020), ao avaliar o ciclo de vida de argamassas com substituição parcial por Cinza do Bagaço de Cana (CBC), reportou uma redução de 22,36% no potencial de depleção do ozônio para o traço com maior teor de cinzas. De forma análoga, Bacelar (2020) verificou em concretos de alto desempenho uma diminuição média de 13% nesta mesma categoria, reforçando a eficácia da substituição de clínquer na mitigação deste impacto.

4.1.7. Acidificação terrestre

O Gráfico 7 apresenta o resultado da ACV para a categoria de impacto “acidificação terrestre”.

Gráfico 7. Resultado da ACV para acidificação



Fonte: próprio autor (2025).

A acidificação terrestre é definida como a alteração das propriedades químicas do solo decorrente da deposição de nutrientes acidificantes, notadamente compostos de nitrogênio e enxofre. Esse processo reduz o pH e a saturação por bases, elevando a concentração de íons hidrogênio (H^+) e a mobilidade do alumínio tóxico, o que compromete a biota vegetal (Sousa, 2008; Azevedo et al., 2014). O fenômeno é impulsionado pela emissão de dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e amônia (NH_3).

Esses gases reagem com a umidade atmosférica formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) e nítrico (HNO_3), precipitando-se sob a forma de chuva, névoa ou orvalho, causando danos a ecossistemas e estruturas civis. Os resultados desta categoria estão dispostos no Gráfico 7.

A análise do Gráfico 7 identifica a dosagem com cimento CPV como a maior contribuinte para a acidificação. Este impacto deve-se à predominância do clínquer na mistura, cuja produção envolve a queima intensiva de combustíveis fósseis, gerando altas emissões de SO_2 e NO_x (Singh *et al.*, 2020; Miranda, 2023). Adicionalmente, a

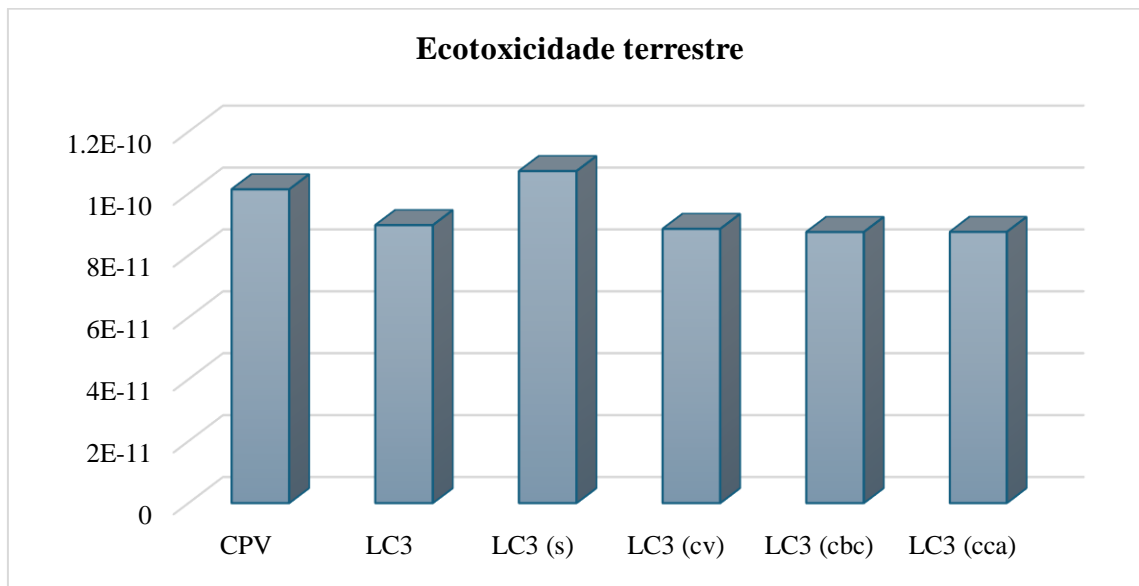
logística de transporte, dependente de matriz energética fóssil, agrava a carga de poluentes acidificantes (Assunção, 2020; Andrade, 2014), corroborando a relação direta entre poluição atmosférica e acidificação (Souza *et al.*, 2021; Raza *et al.*, 2024).

Em contrapartida, a utilização do cimento LC³ demonstrou uma mitigação expressiva. Enquanto o CPV foi responsável por uma contribuição de impacto de 28,33 %, as misturas com LC³ e resíduos apresentaram um índice médio de 14,02%. Essa diferença representa uma redução relativa de 50,49% no potencial de acidificação. Tal desempenho é superior ao observado por Assunção (2020), que obteve uma redução de 22,94% em concretos com substituição parcial por Cinza do Bagaço de Cana (CBC), validando o LC³ como uma alternativa eficaz para a preservação da qualidade ambiental e da paisagem (Berezuk, 2015).

4.1.8. Ecotoxicidade terrestre

O Gráfico 8 apresenta o resultado da ACV para a categoria de impacto “ecotoxicidade terrestre”.

Gráfico 8. Resultado da ACV para ecotoxicidade



Fonte: próprio autor (2025).

A categoria de impacto ambiental denominada ecotoxicidade terrestre mensura os danos potenciais à litosfera decorrentes da bioacumulação de substâncias químicas e metais pesados no solo (Silva *et al.*, 2015; Huijbregts *et al.*, 2016). Segundo Oliveira (2018), este indicador avalia a toxicidade gerada pela disposição de rejeitos e sua

interação com o meio edáfico. Os resultados estão ilustrados no Gráfico 8.

Conforme observado, a mistura composta por LC³ e Sílica Ativa apresentou o maior potencial de impacto nesta categoria. Este desempenho pode ser atribuído à composição química da metacaulinita e da própria sílica. A correlação entre altas dosagens de sílica ativa e o aumento da ecotoxicidade foi previamente identificada por Coz *et al.* (2009). Ao investigarem tecnologias de estabilização de lodos perigosos de fundição, os autores detectaram a presença de compostos ecotóxicos em matrizes cimentícias contendo elevadas concentrações de cal e sílica ativa.

Em contrapartida, o traço formulado com LC³ e Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBC) registrou o menor impacto ambiental. Este resultado corrobora as observações de Berezuk (2015), que indica que a valorização da CBC como substituto parcial de agregados ou aglomerantes tende a mitigar índices de toxicidade, favorecendo a integridade da fauna e flora locais. Quantitativamente, a incorporação da CBC proporcionou uma redução de 22,48 % na ecotoxicidade em relação à mistura de referência LC³. Tal comportamento alinha-se aos achados de Souza *et al.* (2021), que reportaram uma diminuição de aproximadamente 19,05 % nesta categoria de impacto ao utilizarem maiores teores de cinza de bagaço.

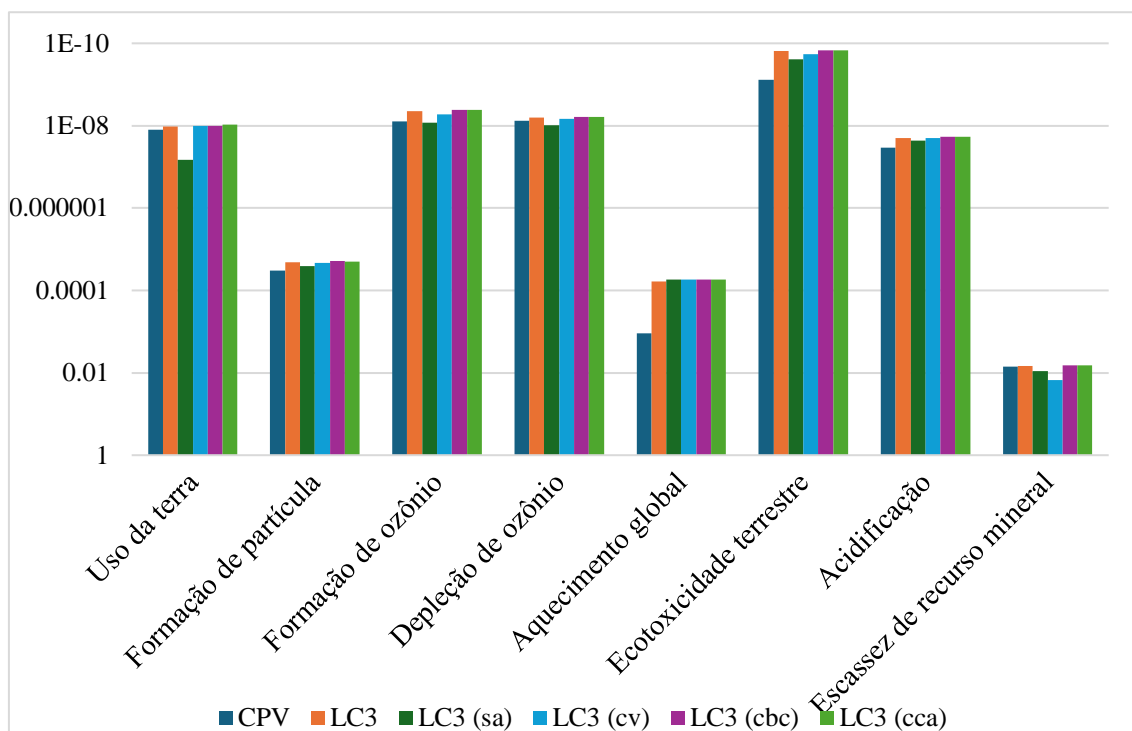
4.2. Análise estatística pela Matriz Pedigree

A análise de sensibilidade probabilística foi conduzida pelo método de Monte Carlo, permitindo quantificar as incertezas inerentes aos dados de entrada, gerado a partir da Matriz Pedigree. A ferramenta fornece indicadores de precisão estatística, onde a amplitude do desvio padrão sinaliza o grau de risco da amostra: elevações na dispersão dos dados comprometem a confiabilidade das estimativas de impacto ambiental (Marques; Oliveira; Balestrassi, 2001).

O Gráfico 9 sintetiza o comportamento dessas variáveis para os traços de referência (CPV) e alternativos (LC³), demonstrando a relação entre a média amostral e o desvio padrão calculado para cada categoria.

A análise da dispersão dos dados permite segregar as categorias de impacto em dois grupos distintos quanto à robustez dos resultados. O primeiro grupo, composto pelas categorias de Formação de Partículas, Aquecimento Global e Escassez de Recursos Minerais, apresentou valores de desvio padrão de magnitude desprezível, indicando uma alta precisão e homogeneidade nas estimativas obtidas.

Gráfico 9. Resultado da matriz Monte Carlo para análise de incertezas



Fonte: próprio autor (2025).

Em contrapartida, o segundo grupo abrangendo Depleção de Ozônio, Formação de Ozônio Fotoquímico e Ecotoxicidade Terrestre exibiu flutuações mais acentuadas, com uma dispersão relativa média da ordem de 40%. À luz desses indicadores estatísticos, conclui-se que as incertezas mais críticas do modelo concentram-se na categoria de Ecotoxicidade Terrestre. A elevada variabilidade evidenciada pelo desvio padrão nesta categoria sugere uma maior sensibilidade dos resultados frente às variações nos dados de entrada do inventário.

4.3. Análise econômica

A análise econômica foi realizada considerando o custo final dos insumos entregues em Manaus-AM e o consumo de materiais definidos na dosagem experimental. A composição detalhada dos custos unitários e do frete é apresentada na Tabela 3, enquanto o custo total para a produção de 1 m³ de cada mistura encontra-se resumido na Tabela 4.

Os dados da Tabela 4 evidenciam que o traço de referência (CPV) apresentou o menor custo de produção (R\$ 1.451,03/m³). Em contrapartida, todas as misturas contendo cimento LC³ e resíduos agroindustriais registraram um incremento substancial

nos custos, variando entre 34,32% e 37,04% acima da referência. O custo mais elevado foi observado na mistura LC³ (R\$ 1.979,66/m³), seguido de perto pela combinação com Sílica Ativa (LC³ + SA).

Tabela 3. Composição do custo unitário e frete dos insumos (Manaus-AM)

Material	Preço de aquisição (R\$/kg)	Distância (km)	Custo frete (R\$)	Valor final (R\$/kg)
Clínquer / CPV	0,86	45	0,02	0,88
Metacaulinita	1,00	950	0,38	1,38
Fíler	1,00	950	0,38	1,38
SA	1,60	950	0,45	2,05
Cinzas (resíduos)	0	950	0	0
Areia Média	0,07	540	0,35	0,42
Brita (Seixo)	0,17	950	0,62	0,79
Superplastificante	60	950	0,93	60,93
Água	0,02	0	0	0,02

Fonte: próprio autor (2025).

Tabela 4. Custo total de produção por m³ de concreto

Material	CPV (Ref)	LC ³	LC ³ + CV	LC ³ + SA	LC ³ + CBC	LC ³ + CCA
Custo Total (R\$/m ³)	1451,03	1979,66	1949,02	1988,55	1949,02	1949,02
Variação (referência)	-	+ 36,43%	+ 34,32%	+ 37,04%	+ 34,32%	+ 34,32%

Fonte: próprio autor (2025)

A disparidade de custos justifica-se, majoritariamente, pela logística de abastecimento e pela demanda química das misturas, conforme detalhado na Tabela 4, em relação a logística e frete, a necessidade de importação de metacaulinita, fíler calcário e sílica ativa de outras regiões, situadas a aproximadamente 950 km de distância, impôs um custo de frete oneroso aos insumos.

Esse cenário corrobora as conclusões de Piccini *et al.* (2022), que postulam que a competitividade financeira de concretos eco eficientes frente ao cimento portland é diretamente dependente da proximidade das fontes de matéria-prima. No contexto amazônico atual, a distância de transporte torna-se um fator determinante, elevando o ciclo de vida de custos.

Já para os aditivos químicos, o uso mandatório de superplastificante de alto desempenho para garantir a trabalhabilidade das misturas com elevado teor de finos (LC³ e resíduos) impactou significativamente o orçamento, dado o alto valor agregado deste insumo (R\$ 60,93/kg no preço final).

Sob a ótica da eficiência estrutural (relação R\$/MPa), o concreto convencional (CPV) demonstrou superioridade. A mistura contendo LC³ e Cinza do Carvão de Açai (CCA), por exemplo, apresentou um custo proporcionalmente três vezes superior para desempenhar a mesma função estrutural. Segundo Garcez *et al.* (2024), esse déficit mecânico em compósitos com resíduos sem beneficiamento energético otimizado é esperado, pois o material atua muitas vezes como um fíler de baixa reatividade, diluindo o clínquer.

No entanto, a viabilidade dessas alternativas não deve ser analisada sob uma ótica puramente monetária. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), discutida nas seções anteriores, indicou que o traço CPV, apesar de mais barato, é o maior detentor de impactos ambientais (aquecimento global e uso de recursos).

Em contraste, as misturas ternárias com LC³ e resíduos (CCA e CBC) reduziram substancialmente esses impactos. Essa dicotomia confirma o argumento de Cunha (2022) de que a produção de clínquer é o principal "hotspot" ambiental. Portanto, o custo adicional das misturas sustentáveis pode ser interpretado como o preço da mitigação de passivos ambientais e da preservação de recursos abióticos.

A avaliação baseada na tríade econômico-mecânico-ambiental indica que, a curto prazo, o concreto CPV permanece a escolha de mercado mais racional em Manaus, unindo menor custo à maior segurança estrutural. Entretanto, sob a perspectiva da Economia Circular defendida por Garcez *et al.* (2024), a incorporação de resíduos evita a disposição inadequada de biomassa e reduz a extração mineral.

Conclui-se, portanto, que a principal barreira para a adoção dessas tecnologias não é técnica, mas logística. Para que os sistemas de baixo carbono se tornem competitivos frente ao convencional, é imperativo o desenvolvimento de uma cadeia local de calcinação de argilas, eliminando a dependência do transporte de longa distância que, atualmente, onera o custo final em mais de 36 %.

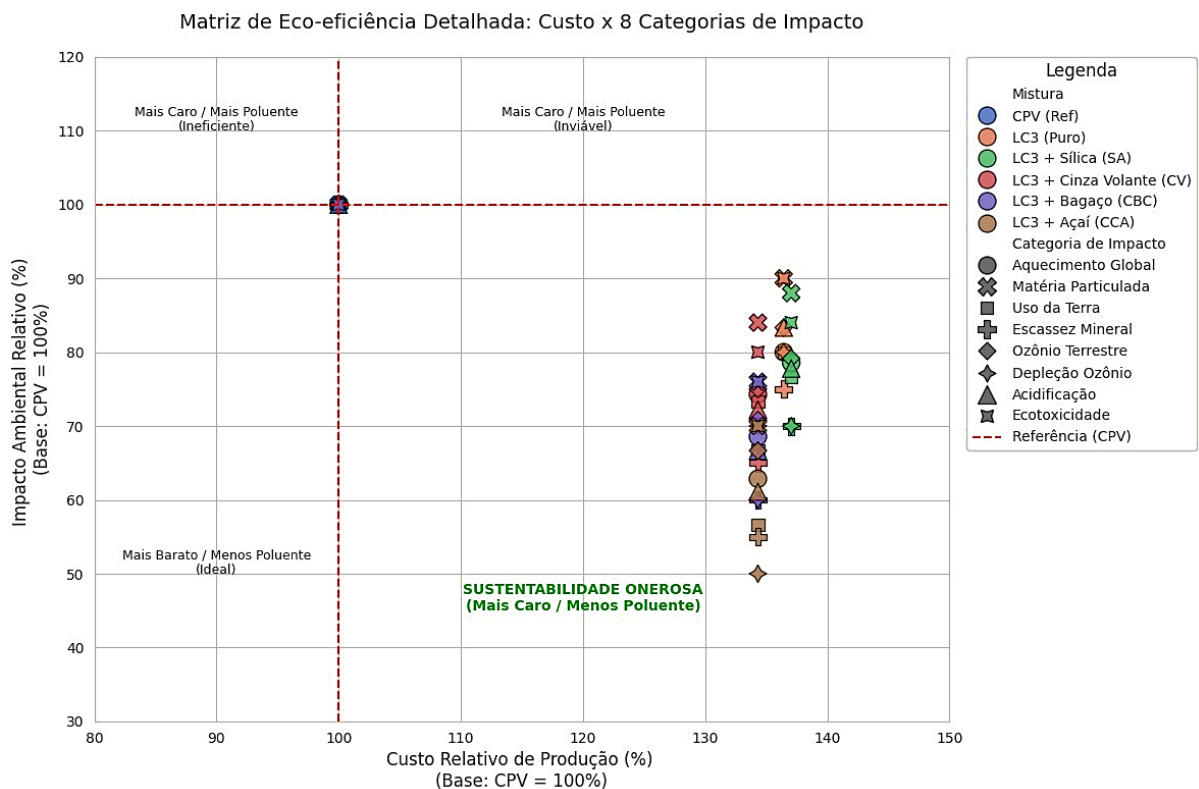
4.4. Análise estatística integrada

Para realizar uma comparação entre materiais que possuem unidades de medida muito diferentes (como Reais por metro cúbico versus pontuação de impacto ambiental), aplicou-se um método estatístico de Normalização de Dados. O intuito foi transformar os valores absolutos em porcentagens relativas, permitindo analisar custos e danos ambientais na mesma escala visual.

A normalização adotou o concreto convencional (CPV) como o padrão de referência (100%). A partir disso, o desempenho de cada mistura alternativa (LC³ com resíduos) foi calculado pela razão entre o seu valor e o valor do CPV.

O gráfico 10 apresenta a Matriz de Ecoeficiência Detalhada, onde cada forma geométrica representa uma das oito categorias de impacto avaliadas e as cores distinguem os traços de concreto. O Eixo X (Custo Econômico) indica o quanto a mistura custa em relação à referência. Valores acima de 100% representam custos maiores e o Eixo Y (Impacto Ambiental) indica o quanto a mistura polui em relação à referência. Valores abaixo de 100% representam redução de impacto.

Gráfico 10. Matriz de Ecoeficiência Detalhada



Fonte: próprio autor (2025)

As misturas foram classificadas com base em sua posição espacial em relação às linhas de referência de 100%, definindo-se quatro zonas de desempenho distintas: a sustentabilidade onerosa no quadrante inferior direito, caracterizada por misturas com custo superior à referência, mas com reduções significativas nos impactos ambientais; a inviabilidade no quadrante superior direito, onde tanto o custo quanto o impacto ambiental superam a referência; a ineficiência no quadrante superior esquerdo, indicando misturas mais caras e simultaneamente mais poluentes; e a eco-eficiência ideal no quadrante inferior esquerdo, representando o cenário ótimo de menor custo e menor impacto simultaneamente

A leitura analítica do gráfico evidencia dois comportamentos opostos que definem o cenário atual em Manaus: O Padrão da Referência (Ponto Vermelho) e o Padrão Sustentável (Nuvem de Pontos à Direita).

No padrão referência o concreto CPV concentra-se no ponto (100, 100). Isso significa que, hoje, ele é o "marco zero" do mercado: possui o menor custo possível, mas, em contrapartida, gera o máximo de impacto negativo em todas as oito categorias ambientais. Ele serve como o teto de poluição que buscamos reduzir.

As misturas com LC³ e resíduos (Açaí, Cana, Sílica, etc.) deslocaram-se todas para o 4º Quadrante (Canto inferior direito). Isso nos permite avaliar estatisticamente que:

A Barreira Econômica Constante (Eixo Horizontal): Todos os pontos sustentáveis alinharam-se verticalmente na faixa de 134% a 137%. Isso mostra que o "preço da sustentabilidade" é fixo: não importa qual resíduo você use, o custo do frete dos insumos básicos (vindas de fora do estado) sempre encarecerá o concreto em cerca de 36%.

O Ganho Ambiental Variável (Eixo Vertical): Diferente do custo, o benefício ambiental varia muito dependendo do resíduo. Os pontos mais baixos do gráfico (abaixo de 70%) pertencem à mistura com Cinza do Caroço de Açaí (CCA). Isso prova que o Açaí é o material mais ecoeficiente: pelo mesmo custo de transporte das outras misturas, ele entrega a maior redução de danos ao meio ambiente (mitigando simultaneamente aquecimento global, toxicidade e uso da terra).

A análise comprova que não existe, atualmente, uma solução "perfeita" (mais barata e menos poluente) devido exclusivamente à logística. O gráfico quantifica a troca necessária (trade-off): para a construção civil amazônica reduzir seus impactos ambientais pela metade (descer no eixo Y), o mercado precisa estar disposto a absorver um aumento de um terço no custo (avançar no eixo X).

CONCLUSÃO

A resistência à compressão aos 28 dias evidenciou clara superioridade do concreto convencional em relação ao sistema LC³ e às misturas ternárias com resíduos. O traço de referência com cimento CP V-ARI atingiu 32 MPa, resultado associado ao seu elevado teor de clínquer, cuja alta concentração de fases silicatadas reativas (C₃S e C₂S) favorece a rápida formação de C-S-H e, conseqüentemente, resistência elevada nesse período

Nas misturas ternárias (LC³ + 10% de Resíduo), onde o teor de clínquer foi reduzido para cerca de 45%, notou-se um impacto variável, porém com tendência de queda na resistência nas seguintes misturas: LC³ + Sílica Ativa; Cinza Volante; Bagaço, pois estas misturas apresentaram desempenhos intermediários (abaixo de 28,5 MPa), mas ainda com potencial estrutural. O desempenho reduzido das misturas com cinza de bagaço de cana (CBC) está associado sobretudo à sua baixa reatividade inicial e à elevada absorção de água.

Sob a ótica da aplicabilidade normativa, os resultados permitem classificar as misturas em dois grupos distintos de uso. O concreto CPV, o LC³ referência e as misturas ternárias com Sílica Ativa, Cinza Volante e Bagaço apresentaram resistências compatíveis com classes iguais ou superiores a C20, validando sua aplicação em elementos estruturais (vigas, pilares e lajes), conforme preconiza a NBR 6118. Por outro lado, a mistura com Cinza do Caroço de Açai (14 MPa), embora não atenda aos requisitos para concreto armado, demonstrou viabilidade técnica para aplicações não estruturais, como blocos de vedação, pavimentação de calçadas e mobiliário urbano, oferecendo uma destinação nobre para este resíduo abundante sem comprometer a segurança da edificação.

A Avaliação do Ciclo de Vida evidenciou um contraste marcante entre os desempenhos ambientais dos concretos convencionais e das misturas alternativas. Observou-se que o traço de referência com cimento CPV apresentou os maiores impactos em todas as categorias analisadas, incluindo aquecimento global, toxicidade e uso de recursos, enquanto as formulações ternárias contendo resíduos de biomassa, especialmente LC³ associado à Cinza do Caroço de Açai (CCA) e ao resíduo do Bagaço de Cana (CBC) destacaram-se por reduzir substancialmente esses impactos. Nesse sentido, os achados confirmam que a integração entre o sistema LC³ e a valorização de resíduos regionais possibilita a formulação de concretos com desempenho ambiental amplamente superior ao convencional, contribuindo para o alinhamento da construção

civil amazônica às metas internacionais de sustentabilidade.

A análise de viabilidade econômica indicou restrições à adoção imediata do sistema LC³, cujo custo de produção superou em aproximadamente 36,43% o do concreto de referência (CPV), disparidade atribuída aos onerosos custos logísticos de transporte dos materiais suplementares situados a 950 km de distância. Assim, a avaliação baseada na tríade econômico-mecânico-ambiental indica que, a curto prazo, o concreto CPV permanece como a escolha de mercado mais racional em Manaus, unindo menor custo à maior segurança estrutural. Entre os compósitos sustentáveis, mostram-se como boas alternativas a incorporação de Sílica Ativa que apresenta a melhor eficiência técnica global e a mistura com Cinza do Carvão de Açai (CCA) que maximiza os benefícios ecológicos.

Entretanto, é imperativo contextualizar a viabilidade futura à realidade local de Manaus. A barreira econômica identificada não reflete uma limitação tecnológica do material, mas sim a ausência de uma cadeia produtiva regional. A Amazônia possui abundância de solos argilosos com potencial para calcinação e enfrenta o desafio urbano da gestão de resíduos como o caroço de açai. Portanto, conclui-se que a competitividade do concreto sustentável na região depende diretamente do fomento à produção regional de metacaulinita e fíler. O desenvolvimento dessa indústria local eliminaria a dependência de insumos externos e o entrave logístico do frete, transformando o passivo ambiental da região em ativo econômico para a construção civil.

A realização deste trabalho permitiu mapear o potencial dos novos materiais cimentícios na região Norte, mas também evidenciou limitações que direcionam novas investigações.

Limitações do Estudo:

1. **Fronteira do Sistema:** A análise limitou-se à abordagem "berço ao portão" (cradle-to-gate). Não foram contabilizados os custos e impactos da fase de uso e manutenção. Conforme destacado por Piccini *et al.* (2022), a análise de Custo do Ciclo de Vida (LCC) completa deve incluir "custos de construção, manutenção e demolição", pois concretos com adições minerais tendem a apresentar maior durabilidade, o que poderia diluir o custo inicial mais alto ao longo do tempo.
2. **Dados Secundários:** O uso de dados genéricos da base Ecoinvent para processos de energia e transporte pode não refletir com exatidão a matriz de emissões específica da indústria amazonense.

Recomendações para Trabalhos Futuros:

1. **Investigação de Argilas Locais:** Mapear jazidas de argila na Região Metropolitana de Manaus aptas à calcinação. A produção autóctone da metacaulinita é a única forma de atender ao requisito de viabilidade apontado por Piccini *et al.* (2022), reduzindo a distância de transporte.
2. **Análise de "Berço ao Túmulo":** Expandir o estudo para incluir a durabilidade e manutenção. Cunha (2022) sugere que "estudos futuros abordem a análise de ciclo de vida considerando a vida útil de projeto", verificando se a maior resistência a ataques químicos do LC³ compensa o investimento inicial.
3. **Logística Fluvial:** Simular cenários de transporte dos insumos via modal hidroviário, aproveitando a malha fluvial amazônica para reduzir o custo de frete.
4. **Dosagem Otimizada:** Realizar estudos de empacotamento de partículas para reduzir o consumo de superplastificante, que representou uma parcela relevante do custo nas misturas LC³

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004-1: Resíduos sólidos — Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta — Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14040: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais — Classificação por massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. São Paulo: ABREMA, 2023.

ALBUQUERQUE, H. R.; LIRA, J.; SPOSTO, R. M. CO₂ emissions in mortar coating systems: comparative case study between projected and conventional method. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 4, p. 377-393, 2018.

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; MENDES, P. C. D. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. *Construction and Building Materials*, v. 82, p. 31-38, 2015.

ALMEIDA, R. G. Estudos sobre análise do ciclo de vida e sua aplicação para concreto estrutural. 2015

ALVES, Andrey Fonseca. Análise comparativa do ciclo de vida do concreto utilizando resíduos industriais, agroindustriais e os cimentos CPV e LC³. 2024. Relatório Final (Iniciação Científica) – Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, 2024.

- ANDRADE, L. S. Estudo do efeito da radiação ionizante em compostos orgânicos do diesel e do petróleo: hidrocarbonetos, sulfurados e nitrogenados. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2014.
- ANTIQUEIRA, L. M. O. R.; SEKINE, E. S. Os "erres" pós pandemia: princípios para sustentabilidade e cidadania. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 15, n. 4, p. 70–79, 2020.
- ARANTES, M. V. C.; PEREIRA, R. S. Análise crítica dos 10 anos de criação e implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil. *Revista Linceu On-Line*, v. 11, n. 1, p. 48-66, 2021
- ARAÚJO, J. C. S.; GARCIA, A. S.; BONFIM, F. P.; SOUZA, F. T. Influência da cinza do caroço de açaí nas propriedades de argamassas de chapisco. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 13, n. 3, 2021
- ARAÚJO, J. M. Curso de Concreto Armado. 3. ed. Rio Grande, RS: Dunas, 2010.
- ARAÚJO, V. M. Práticas Recomendadas para Gestão mais Sustentável de Canteiros de Obras. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- ARIF, E.; CLARK, M. W.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. *Construction and Building Materials*, v. 128, p. 287-297, 2016.
- ASBEA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA. Recomendação básicas para projetos de arquitetura. São Paulo, 2007.
- ASSUNÇÃO, A. A. Avaliação do ciclo de vida de argamassas com substituição parcial de cimento portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 1. ed. West Conshohocken, Pennsylvania, 2021.
- AZEVEDO, L. B. et al. Terrestrial acidification. LC-Impact Version 0.5: A Spatially Differentiated Life Cycle Impact Assessment Approach; Eds, 2014.
- BACELAR, B. A. Avaliação de impactos ambientais da produção de vigas protendidas de concretos de alto desempenho com substituição parcial de cimento. 2020. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020

- BARE, J. C.; GLORIA, T. P. Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 10, p. 1021–1035, 2008.
- BARROSO, T. R. Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com diferentes características físicas e químicas. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.
- BENTO, R. C. Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento. 2016. Tese (Doutorado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Carlos, 2016
- BEREZUK, F. D. Avaliação do ciclo de vida do concreto convencional com cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial da areia. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.
- BICALHO, M. L.; PEREIRA, J. R. Participação social e a gestão dos resíduos sólidos urbanos: um estudo de caso de Lavras (MG). *Gestão & Regionalidade*, v. 34, n. 100, 2018.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010
- BRASIL. Ministério da Educação. Referenciais Curriculares Nacionais da Educação Profissional de Nível Técnico: Área profissional: Construção Civil. Brasília, DF: MEC, 2000.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Construção Sustentável. Brasília, 2017.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação. Brasília, 2012.
- BRE – BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804:2012. Watford: BRE, 2013.
- BRITO, P. H. F.; ARAÚJO, R. S.; SILVA, G. M. Composição química do material particulado atmosférico: uma revisão de literatura. *Holos*, v. 4, p. 62-74, 2018.
- CABRAL, A. E. B.; MOREIRA, K. M. V. Manual sobre os resíduos sólidos da construção civil. Fortaleza: Sinduscon CE, 2011.

- CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M. CO₂ emissions related to building materials transportation in Brazil: comparative study on structural ceramic and concrete bricks. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 4, p. 91-108, 2017.
- CAMILO, B. Q. et al. Resíduos sólidos na construção civil: análise da gestão frente aos impactos causados ao meio ambiente. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 2, p. e32711220994, 2022.
- CAMPOS, M. G. Abordagem de ciclo de vida na avaliação de impactos ambientais no processamento primário offshore. 2012. Projeto de Graduação (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- CASAGRANDE, C. A. et al. Efeito da substituição do cimento por cinza volante em concretos autoadensáveis de alto desempenho. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, v. 1, n. 21, p. 1-10, 2019.
- CHINDAPRASIRT, P.; HOMWUTTIWONG, S.; SIRIVIVATNANON, V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 7, p. 1087–1092, 2004.
- CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Use of bagasse ash as pozzolanic material in concrete. *Building Materials and Construction*, v. 23, p. 3352-3358, 2009.
- CLARK, M. W. et al. High-efficiency cogeneration boiler bagasse ash geochemistry and mineralogical change effects on the potential reuse in synthetic zeolites, geopolymers, cements, mortars, and concretes. *Heliyon*, v. 3, n. 4, p. e00294, 2017.
- CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS (CNPEN). Laboratório Nacional de Biorrenováveis (LNBR). Avaliação do ciclo de vida (ACV): guia introdutório. Campinas, 2021
- COLTRO, L. Avaliação do Ciclo de Vida - ACV. In: MOURAD, A. L. et al. (org.). Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão. Campinas: CETEA/ITAL, 2007. p. 7-13.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2023/24 – quarto levantamento. v. 11. Brasília, DF: Conab, 2024.
- CORDEIRO, G. C. et al. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 5, p. 410-418, 2008.
- CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 3301-3303, 2009.

- CORDEIRO, L. N. P. et al. Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. *Ambiente Construído*, v. 19, n. 1, p. 45–55, 2019.
- COSTA, D. L. M.; RIBAS, L. M. Impacto de alguns instrumentos da Lei nº 12.305/2010 nas ações sustentáveis: 15 anos de Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Multitemas*, v. 30, n. 75, 2025.
- COZ, A. et al. Influence of commercial and residual sorbents and silicates as additives on the stabilisation/solidification of organic and inorganic industrial waste. *Journal of hazardous materials*, v. 164, n. 2-3, p. 755-761, 2009.
- CUNHA, I. B. Análise dos impactos ambientais de concretos com agregado reciclado de resíduos de construção civil. 2022. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8, p. 261-310.
- DIAS, D. A. R. C. et al. Influência da sílica ativa e metacaulim como substituição do cimento em concreto poroso. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2022.
- DO NASCIMENTO, K. F. S.; OLIVEIRA, T. M. C. Aproveitamento das cinzas de caroço de açaí na produção de concreto sustentável analisando sua durabilidade. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2018, Maceió. Anais... Maceió, 2018.
- DONG, Y. H. et al. Substituting local data for overseas life cycle inventories - A case study of concrete products in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 414–422, 2015.
- DU PLESSIS, C. et al. Agenda 21 for sustainable construction in developing countries. *CSIR Report BOU E*, v. 204, p. 2-5, 2002.
- FEITOSA, C. J. D. et al. Caracterização e aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em misturas de concreto seco. *Revista Principia*, v. 60, n. 3, p. 1021–1036, 2023.
- FERNANDEZ, J. A. B. Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil. Brasília: IPEA, 2012.
- FERREIRA, A. *Materiais de Construção: Propriedades e Aplicações*. São Paulo: Editora Blucher, 2017.
- GABC. 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. [S. l.: s. n.], 2020

GARCEZ, L. R. Propriedades físicas e mecânicas da mistura de solo-cimento, utilizando o cimento LC³ (Limestone Calcined Clay Cement) e a incorporação das matérias-primas: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana (*Saccharum officinarum* L) e cinza do caroço de açaí (*Euterpe precatoria* Martius). 2023. 169 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2023

GARCEZ, L. R. et al. Characteristics of the açaí seed (*Euterpe precatoria* Martius) after thermal processing and its potential in soil-cement brick. *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, article e02816, 2024.

GARCEZ, L. R. et al. Mechanical strength and Life Cycle Assessment (LCA) of soil-cement: comparison between mixtures of soil with ASTM type III cement, LC³, and the incorporation of by products and agroindustrial residues. *Construction and Building Materials*, v. 411, article 134331, 2023

GATTI, L. M. Análise do ciclo de vida da produção caseira de cerveja artesanal do tipo pilsen. 2022. 54 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022

GODOY, M. R. B. Dificuldades para aplicar a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil. *Caderno de Geografia*, v. 23, n. 39, p. 1-12, 2013.

HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (coord.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. v. 2. São Paulo: Ibracon, 2005. Cap 15.

HERMANN, A. et al. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 1, p. 48-65, 2016.

HUANG, P. et al. (2023). Application of sugar cane bagasse ash as filler in ultra-high performance concrete. *Journal of Building Engineering*, 71, 106447

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, p. 138-147, 2017.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe 2016 v1.1. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. National Institute for Public Health and the Environment. 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa de Saneamento Básico*. 2021.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Environmental and economic perspectives of concrete with high mineral addition content: a case study. *Ambiente Construído*. v. 4, n. 2, p. 19-30. 2004

JOINT RESEARCH CENTRE EUROPEAN COMMISSION et al. General guide for Life Cycle Assessment-Detailed guidance. ILCD Handbook International Reference Life Cycle Data System, European Union, 2010.

JUNCKES, J. Aproveitamento de cinzas pesadas e cinzas volantes de carvão mineral em concretos e argamassas. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

KARPINSKI, L. A. et al. Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental. Porto Alegre: Edipucrs, 2009.

KIBERT, C. J. Establishing principles and a model for sustainable construction. In: CIB TG 16, 1994. Anais... University of Florida, 1994. p. 3-12

KRUGER, A.; SEVILLE, C. Construção Verde - Princípios e Práticas na Construção Residencial. São Paulo: Editora Cengage Learning, 2016.

LARA, L. A. M. Materiais de construção. Ouro Preto: IFMG, 2013.

LARROSA, C. A. A.; BUENO, L. S. Construções Sustentáveis: O Aspecto Social e o Desafio Cultural na Engenharia Civil. IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação, p. 156-163, 2017.

LARUCCIA, M. M. Sustentabilidade e Impactos Ambientais da Construção Civil. Revista Eniac Pesquisa, v. 3, n. 1, p. 69–84, 2014

LEÓN, N. et al. Effect of nano-Si₂O and nano-Al₂O₃ on cement mortars for use in agriculture and livestock production. Biosystems Engineering, v. 123, p. 1-11, 2014

LI, L. G. et al. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. Construction and Building Materials, v. 140, p. 229-238, 2017.

LI, X.; ZHU, Y.; ZHANG, Z. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. Building and Environment, v. 45, n. 3, p. 766–775, 2010.

LIMA, A. S.; CRUZ, L. F. Economia circular no setor da construção civil – resíduos classe A. Prociênci@s, v. 2, n. 1, p. 1-16, 2019.

LIMA, R. Estruturas de Aço: Projetos e Aplicações. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018.

LIMA, R. S.; LIMA, R. R. R. Guia para elaboração de projeto de gerenciamento de resíduos da construção civil. Curitiba: Crea-PR, 2009.

LIMA, S. A.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; MORETTI, J. P.; PORTELLA, K. F.

Concretes made with sugarcane bagasse ash: evaluation of the durability for carbonation and abrasion tests. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 2, p. 201-212, 2011.

LIMA, S. F. et al. Concreto e suas inovações. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 1, n. 1, p. 31-40, 2014.

MACEDO, A. T.; MARTINS, M. F. A Sustentabilidade urbana na perspectiva das empresas construtoras em Campina Grande – PB. 2011.

MACHADO, M. A. T. C.; CARMONA, J.C. B. Utilização de concreto produzido a partir de cinza na construção de canais para transporte de vinhaça na indústria de cana de açúcar. In: Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFGD (ENEPEX), Mato Grosso do Sul, 2014. Anais... Dourados: Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, 2014.

MARQUES, E. P.; OLIVEIRA, F. A. de; BALESTRASSI, P. P. Quantificação da análise de riscos em investimentos usando medidas de dispersão. *Produção Online*, Itajubá, v. 1, n. 1, p. 1-9, out. 2001

MATOS, P. R.; JUNCKES, R.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Influência do uso de cinza volante na elevação adiabática de temperatura e resistência à compressão de concretos. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 1-16, 2019.

MEDEIROS, R. Estudo da influência das características da cinza volante nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido: proposta de método simplificado em argamassa. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MEDEIROS, L. M. Impactos ambientais de sistemas construtivos: um exercício de análise de ciclo de vida. 2016. 122 f. 2016. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental: Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENDES, C. S. Diagnóstico do aproveitamento dos resíduos da construção civil em São Luís, MA. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014

MINGRONE, R. C. C. Sustentabilidade na construção civil: análise comparativa dos conceitos empregados em obras segundo as certificações AQUA-HQE E LEED. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016

MIOTTO, J. L. Princípios para o projeto e produção das construções sustentáveis. Ponta Grossa: UEPG/NUTEAD, 2013.

- MIRANDA, J. A. P. Monitoramento de emissões gasosas num forno de clínquer. 2023. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.
- MONTEIRO FILHA, D. C.; COSTA, A. C. R.; ROCHA, E. R. P. Perspectivas e desafios para inovar na construção civil. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 31, p. 353-410, 2010.
- MONTEIRO, H.; FREIRE, F. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. Energy and Buildings, v. 47, p. 572–583, 2012.
- MORAES, P.; SOUZA, C. R. O Impacto ambiental de uma edificação. Revista Organização Sistêmica, v. 7, n. 4, p. 173–187, 2016.
- MORAES, J. C. B. et al.; Increasing the sustainability of alkali-activated binders: The use of sugarcane straw ash (SCSA). Construction and Building Materials, v. 124, p. 148-154, 2016.
- MOREAU, V. et al. Statistical estimation of missing data in life cycle inventory: An application to hydroelectric power plants. Journal of Cleaner Production, v. 37, p. 335–341, 2012.
- MOREIRA, M. Q.; CARDOSO, P. L.; ARANTES, M. M. Implantação de um plano de gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil. Facit Business and Technology Journal, v. 1, n. 56, 2024.
- MOTA, P. H. R. et al. Conscientização ambiental de estudantes de Engenharia Civil em relação à necessidade de gestão de resíduos da construção civil. In: XXVII congresso interamericano de engenharia sanitária e ambiental, 2013. Anais... ABES, 2013.
- MOURA, W. A. et al. Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. Ambiente Construído, v. 21, n. 1, p. 69–80, 2021.
- NAGALLI, A. Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- NAGROCKIENĖ, D.; GIRSKAS, G.; SKRIPKIŪNAS, G. Properties of concrete modified with mineral additives. Construction and Building Materials, v. 135, p. 37-42, 2017.
- NASCIMENTO, V. F. et al. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. Revista Ambiente & Água, v. 10, n. 4, p. 889-902, 2015.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016

NUNES, I. H. S. et al. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. *Revista Tecnológica*, v. 17, n. 1, p. 39-48, 2008.

OLIVEIRA, M. G. et al. Análise bibliográfica da (re)utilização do caroço de açaí na indústria da construção civil. In: II congresso araguaense de ciências exata, tecnológica e social aplicada, 2020. Anais... 2020.

OLIVEIRA, S. T. M. et al. Cinza a partir do bagaço da cana-de-açúcar reutilizada como parte integrante em argamassas e concretos na indústria civil. In: XXXVII encontro nacional de engenharia de produção, 2017, Joinville. Anais... Joinville, 2017.

OLIVEIRA, Priscila Fernandes de. Impactos ambientais da produção agrícola do tabaco orgânico e convencional no Sul do Brasil. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Santa Cruz do Sul, 2018

OLIVEIRA, W. S. Uso de cinzas brutas de bagaço de cana-de-açúcar como material substitutivo no concreto. 2021. 78 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Eco-eficiência na construção e materiais de construção: avaliação do ciclo de vida (LCA), rotulagem ecológica e materiais verdes. [S. l.: s. n.], 2013.

PASSUELLO, A. C. B. et al. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. *Ambiente Construído*, v. 14, p. 7-20, 2014.

PENA, I. R.; OLIVEIRA, R. F. de. Avaliação da resistência à compressão do concreto simples. *Revista GeTeC*, v. 10, n. 26, p 35-51, 2021.

PEREIRA, R. S. Segurança e Funcionalidade em Projetos de Engenharia. Belo Horizonte: Editora Prática, 2023.

PEREIRA, S. S. et al. Inovações na Engenharia Civil: uma análise das novas tendências em materiais de construção. *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 12, p. e11169, 2024.

PESSARELLO, R. G. Estudo exploratório quanto ao consumo de água na produção de obras de edifícios: avaliação e fatores indicadores. 2008. Monografia (Especialização) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

PICCINI, G. D. et al. Análise do custo do ciclo de vida de concretos ecoamigáveis com agregado residual de demolição e pozolana. *Mix Sustentável*, Florianópolis, v.9, n.1, p.62-70, dez. 2022

PITOLLI LYRA, G. Aplicação das cinzas da indústria sucroalcooleira como

biopozolanas e fertilizante: cana-de-açúcar e cana-energia. 2023. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de València.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual review of materials research*, v. 44, n. 1, p. 299-327, 2014.

Raza, M. H. et al. Strength, porosity and life cycle analysis of geopolymer and hybrid cement mortars for sustainable construction. *Science of The Total Environment*, v. 907, p. 167839, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167839>

RECENA, F. A. P. Método de Dosagem de Concreto pelo Volume de Pasta Com Emprego de Cinza Volante. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RIBASKI, N. G. et al. Avaliação do ciclo de vida, estudo de caso aplicado ao plantio de Pinus no Paraná, Brasil. *Brazilian Journal of Technology*, v. 3, n. 1, p. 2-20, 2020

ROCHA, L. R. C.; MENNUCCI, M. M.; SUEGAMA, P. H. Influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades mecânicas do concreto. *Revista de Engenharia Civil IMED*, v. 8, n. 2, p. 11-25, 2021

ROHDEN, A. B. Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ROSELLÓ, J. et al. Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. *Industrial Crops and Products*, v. 103, p. 39–50, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.030>

RUSSO, D.; RIZZI, C.; MONTELISCIANI, G. Inventive guidelines for a TRIZ-based eco-design matrix. *Journal of Cleaner Production*, v. 76, p. 95-105, 2014.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, p. 113–125, 2013.

SAMPAIO, Z. S.; SOUZA, J. A.; GOUVEIA, A. M. G. Avaliação da influência da cinza do bagaço da cana-de-açúcar obtida sob diferentes condições de queima como adição em pastas de cimento Portland. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 7, n. 5, p. 728-751, 2014.

SANTIAGO, L. Florestas e madeira: Uma abordagem sustentável. São Paulo: Editora Senac, 2014.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Studies on Environmental Impact Assessment of Reinforced Concrete in Different Life Cycle Phases. *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*, v. 1, n. 2, p. 32-40, 2017.

SANTOS, D. V.; CABRAL, A. E. B. Análise técnica da reciclagem de resíduos de construção em canteiro de obras. *Ambiente Construído*, v. 20, p. 363, 2020.

SANTOS, L. F.; REAL, L. V.; LOPES, K. L. *Materiais de Construção Civil II*. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

SATTLER, M. A. Entrevista. *Mix Sustentável*, v. 3, n. 1, 2017.

SANTOS, F.A. Utilização das cinzas de cana-de-açúcar como material pozolânico na produção de concreto. Monografia – Curso de tecnologia em biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia – FATEC, Araçatuba, 2013.

SILVA, D. C. et al. A influência do traço na resistência à compressão do concreto. In: I CONGRESSO NACIONAL DE DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 2018, Natal. Anais... Campina Grande: Realize Editora, 2018.

SILVA, R. G. Análise do potencial da sílica ativa como adição para concretos de alto desempenho submetidos a meios agressivos. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024

SILVA, G. A. et al. Avaliação do ciclo de vida: ontologia terminológica. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2015.

SIMONCINI, J. B. V. B. et al. Educação Ambiental e resíduos sólidos urbanos no Brasil. *ANALECTA*, v. 8, n. 1, 2023.

SINGH, B N . et al. 2020. Geopolymer cement and concrete: properties. *Mater. Today: Proc.* 29, 743–748.

SINIR+. Resíduos sólidos da construção civil. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-da-construcaocivil/> . Acesso em: 25 out. 2025

SINOH, S. S. et al. Life cycle assessment of sugarcane bagasse ash as partial cement replacement in concrete. In: 4th International Conference on Sustainable Innovation 2020–Technology, Engineering and Agriculture (ICoSITEA 2020). Atlantis Press, 2021. p. 144-150

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO-SNIC. Relatório anual 2013. Rio de Janeiro: SNIC, 2014. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/re_l_anual_2013.pdf. Acesso em: 24 nov. 2025

SOARES, E. A. Estudo da influência da sílica ativa nas propriedades reológicas e mecânicas de argamassas. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

- SOUSA, C. A. O. Impactos ambientais gerados pelos resíduos provenientes da construção civil. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) — Faculdade Edufor, São Luís, 2024.
- SOUSA, S. R. Normalização de critérios ambientais aplicados à avaliação do ciclo de vida. 2008. 73 p. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SOUZA, A. L. R. de. Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto. 2021. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- SOUZA, A. M., et al. Application of the desirability function for the development of new composite eco-efficiency indicators for concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 40, p. 102374, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102374>
- SOUZA, G. T. Dosagem experimental de concreto massa com adição de sílica ativa aplicado em barragem. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental) — Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2017.
- TAPAJÓS, L. S. et al. A influência da cinza do caroço de açaí em propriedades mecânicas e absorção de água de concretos. In: 56º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2014, Natal. Anais... Natal, 2014.
- TEIXEIRA, L. B. et al. Processo de compostagem usando resíduos das agroindústrias de Açaí e de palmito de Açaizeiro. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2005.
- TOMAZIA, A. J. F. S. et al. Os Impactos ao Meio Ambiente Causados pelos Descarte de Materiais e Resíduos de Obras da Construção Civil. *Revista do Encontro de Gestão e Tecnologia*, v. 1, n. 4, p. 65-72, 2024.
- TORMEN, A. F. et al. Estudos sobre alternativas de projeto para a minimização do impacto ambiental de edifícios em concreto armado. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales*, v. 13, n. 1, p. 153-171, 2020.
- VARELA, M. Apostila de materiais de construção: curso técnico em edificações. Natal: IFRN, 2018
- VAN ZELM, R. et al. Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: Damage to human health and vegetation. *Atmospheric Environment*, v. 134, p. 129-137, 2016.
- VIEIRA, M. D. et al. Surplus cost potential as a life cycle impact indicator for metal extraction. *Resources*, v.5, n.1, 2016. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES5010002>

VITORIO JUNIOR, P. C. Avaliação de projetos para habitação de interesse social com foco na sustentabilidade. 2020. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

XU, Q. et al. Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, v. 12, n. 1, p. 39, 2019.

YEO, J. Y. et al. Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics. *Journal of the Energy Institute*, v. 92, n. 1, p. 27–37, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.003>

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. *Construction and Building Materials*, v. 65, p. 140-150, 2014

ZIMELE, Z. et al. Life cycle assessment of foam concrete production in Latvia, *Environ. Clim. Technol.* vol. 23 (no. 3) (2019) 70–84, <https://doi.org/10.2478/rtuct-2019-00>