

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DANIEL OLIVEIRA DE AZEVEDO SAMPAIO

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE ATIVADORES ALCALINOS COM CINZA DO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Ilha Solteira
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANIEL OLIVEIRA DE AZEVEDO SAMPAIO

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE ATIVADORES ALCALINOS COM CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Área de conhecimento: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

Coorientadora: Dra. Paula Sofia Gil Neto Quinteiro (Universidade de Aveiro – Portugal)

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S192a Sampaio, Daniel Oliveira de Azevedo.
Avaliação ambiental de ativadores alcalinos com cinza do bagaço de cana-de-açúcar / Daniel Oliveira de Azevedo Sampaio. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
72 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2024

Orientador: Jorge Luís Akasaki

Co-orientador: Paula Sofia Gil Neto Quinteiro

Inclui bibliografia

1. Sustentabilidade. 2. Resíduos agroindustriais. 3. Construção civil. 4. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 5. Escória de alto forno.



Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presente pesquisa deve servir para embasar futuros estudos e tomadas de decisão para inovações que buscam contribuir para o desenvolvimento sustentável através da incorporação de resíduos em produtos da construção civil, relacionando-se aos ODS 8 e 11.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research should serve as a basis for future studies and decision-making for innovations that seek to contribute to sustainable development through the incorporation of waste into construction products, in relation to SDGs 8 and 11.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE ATIVADORES ALCALINOS COM CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: DANIEL OLIVEIRA DE AZEVEDO SAMPAIO

ORIENTADOR: JORGE LUIS AKASAKI

COORIENTADORA: PAULA SOFIA GIL NETO QUINTEIRO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JORGE LUIS AKASAKI**
Data: 30/08/2024 11:28:08-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. CRISTIANE BUENO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

Documento assinado digitalmente
 **CRISTIANE BUENO**
Data: 27/08/2024 18:14:38-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. GABRIELA PITOLLI LYRA (Participação Virtual)
Universidade de São Paulo - USP

Documento assinado digitalmente
 **GABRIELA PITOLLI LYRA**
Data: 29/08/2024 17:44:19-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Ilha Solteira, 27 de agosto de 2024

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ana Carmen e Romero, por terem me apoiado em todas as decisões durante a minha trajetória, garantindo que eu tivesse condições de estudar e me desenvolver como pesquisador e profissional.

Aos meus irmãos, Luca e Filippo, e minhas irmãs, Ana Paula e Ana Clara, por todas as risadas e aprendizados. Desejo realizações a todos, e que eu possa auxiliar na caminhada de cada um da melhor forma.

A minha noiva, Grazielle, por todas as aventuras, momentos especiais e apoio durante essa jornada. Obrigado por ser minha parceira nessa trajetória.

Aos meus colegas Enzo, Pedro, Philipe e Renata, por me acompanharem desde o colégio, e serem aqueles amigos verdadeiros que podemos contar nos dedos das mãos.

A Liga de Mercado Financeiro da UNESP de Ilha Solteira, por ter acendido mais uma vez o ânimo com o ambiente universitário, pelas amizades, e pelo desenvolvimento técnico, pessoal e profissional.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki, pela parceria desde o início da graduação, por toda a sua dedicação, e por me apresentar e guiar pela vida acadêmica e pela temática de Avaliação do Ciclo de Vida.

A Profa. Dra. Paula Sofia Gil Neto Quinteiro, por ter aceitado a missão de colaborar com esse trabalho, mesmo sem me conhecer pessoalmente. Agradeço também a Profa. Dra. Ana Cláudia Relvas Vieira Dias e a Profa. Dra. Daniele Mesquita Bordalo da Costa pelas orientações e conselhos desde minha Iniciação Científica, essenciais no meu desenvolvimento como pesquisador.

Ao Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima, pela paciência, conselhos, dedicação e amizade. Seu incentivo foi essencial para meu ingresso no Mestrado.

Ao time de ACV, Camila e Thássia, pelas experiências compartilhadas e por termos iniciado os estudos na área de ACV na UNESP de Ilha Solteira. Foi uma aventura e tanto!

A todos os funcionários do DEC e da FEIS UNESP, que sempre mantiveram o ambiente propício para o estudo e pesquisa.

A UNIVESP pelo apoio financeiro para desenvolver esse trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“We do have a lot in common. The same earth, the same air, the same sky. Maybe if we started looking at what’s the same, instead of looking at what’s different, well, who knows?”

RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por significativos impactos ao ambiente, causados pelo uso intensivo de materiais, energia e mão-de-obra em todas as etapas do processo construtivo. Os aglomerantes ativados alcalinamente tem se mostrado como uma alternativa promissora ao cimento, com menores emissões de CO₂ e desempenho funcional adequado. Neste trabalho foi realizada uma revisão sistemática da literatura e aplicação da ACV para avaliar os impactos ambientais de aglomerantes ativados alcalinamente (AAA) por soluções convencionais e alternativas, com incorporação parcial de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC), e compará-los com aglomerantes de cimento Portland. Foram utilizados para a obtenção de dados e realizar as análises o software SimaPro e os banco de dados Ecoinvent e CM.chemicals. Na análise de impacto por material, se destacaram os ativadores alcalinos (NaOH e silicato de sódio) e o cimento para a maioria das categorias de impacto avaliadas, no entanto a CBC e a areia se destacaram na categoria de uso do solo. Na análise comparativa, a argamassa convencional foi a mais impactante em seis das dez categorias avaliadas, com as argamassas ativadas alcalinamente apresentaram reduções de 40 a 95% dos impactos. Para as categorias FE, FET e MET, a argamassa com ativadores comerciais teve os impactos mais significativos, enquanto a argamassa com incorporação de CBC no ativador alcalino teve os maiores impactos na categoria de uso do solo. Com isso, foi comprovado o potencial desses materiais alternativos do ponto de vista ambiental, preenchendo uma lacuna na literatura científica e gerando valor aos resíduos.

Palavras-chave: sustentabilidade; resíduos agroindustriais; construção civil; cinza do bagaço de cana-de-açúcar; escória de alto forno.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for significant environmental impacts, caused by the intensive use of materials, energy and labor in all stages of the construction process. Alkali-activated binders have been shown to be a promising alternative to cement, with lower CO₂ emissions and adequate functional performance. This study carried out a systematic review of the literature and applied LCA to assess the environmental impacts of alkali-activated binders (AAB) using conventional and alternative solutions, with partial incorporation of sugarcane bagasse ash (SCBA), and compared them with Portland cement binders. SimaPro software and the Ecoinvent and CM.chemicals databases were used to obtain the data and carry out the analysis. In the impact analysis by material, alkaline activators (NaOH and sodium silicate) and cement stood out for most of the impact categories evaluated, but SCBA and sand stood out in the land use category. In the comparative analysis, conventional mortar was the most impactful in six of ten categories evaluated, with alkali-activated mortars showing reductions of between 40 and 95% of the impacts. For the FE, FET and MET categories, the mortar with commercial activators had the most significant impacts, while the mortar with SCBA incorporated into the alkaline activator had the greatest impacts in the land use category. This proved the potential of these alternative materials from an environmental point of view, filling a gap in the scientific literature and generating value for waste.

Keywords: sustainability; agroindustrial wastes; civil construction; sugarcane bagasse ash; blast furnace slag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	16
Figura 2 – Fronteira do sistema para: a) argamassa convencional; b) argamassa ativada alcalinamente com ativadores alcalinos comerciais; c) argamassa ativada alcalinamente com ativador alcalino alternativo.....	41
Figura 3 - Mudanças Climáticas por kg de material.....	47
Figura 4 - Formação de partículas finas por kg de material.....	48
Figura 5 - Formação de ozônio por kg de material.....	48
Figura 6 - Acidificação terrestre por kg de material.....	48
Figura 7 - Eutrofização da água doce por kg de material.....	49
Figura 8 - Ecotoxicidade da água doce por kg de material.....	49
Figura 9 - Ecotoxicidade da água do mar por kg de material.....	49
Figura 10 - Uso do solo por kg de material.....	50
Figura 11 - Escassez de recursos minerais por kg de material.....	50
Figura 12 - Escassez de recursos fósseis por kg de material.....	50
Figura 13 - Impactos potenciais das alternativas para Mudanças Climáticas.....	52
Figura 14 - Impactos potenciais das alternativas para Formação de partículas finas.....	52
Figura 15 - Impactos potenciais das alternativas para Formação de Ozônio, ecossistemas terrestres.....	53
Figura 16 - Impactos potenciais das alternativas para Acidificação Terrestre.....	53
Figura 17 - Impactos potenciais das alternativas para eutrofização da água doce.....	53
Figura 18 - Impactos potenciais das alternativas para ecotoxicidade da água doce.....	54
Figura 19 - Impactos potenciais das alternativas para ecotoxicidade da água do mar.....	54
Figura 20 - Impactos potenciais das alternativas para o uso do solo.....	54
Figura 21 - Impactos potenciais das alternativas para escassez de recursos minerais.....	55
Figura 22 - Impactos potenciais das alternativas para Escassez de recursos fósseis.....	55
Figura 23 – Contribuição de cada material para argamassa ARGC1.....	55
Figura 24 – Contribuição de cada material para argamassa ARGG2.....	56
Figura 25 – Contribuição de cada material para argamassa ARGG3.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência das argamassas aos 28 dias de cura (MPa).....	44
Tabela 2 - Distâncias de transporte adotadas.....	45
Tabela 3 - Quantidade de materiais por m ³ de argamassa.	46
Tabela 4 - Impactos potenciais para cada argamassa analisada.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Palavras-Chave para Busca.....	34
Quadro 2 - Artigos incluídos na revisão sistematizada.....	35
Quadro 3 - Unidades Funcionais e Resíduos Estudados.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
ACV	Avaliação do ciclo de vida
CBC	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
AAA	Aglomerantes ativados alcalinamente
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Concreto
RCD	Resíduo de construção e demolição
EAF	Escória de alto-forno
CV	Cinzas Volantes
MK	Metacaulim
ICV	Inventário do ciclo de vida
AICV	Avaliação de impacto de ciclo de vida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações gerais	16
1.2	Objetivos	19
1.3	Estrutura do trabalho	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Concreto e Argamassa na Construção	21
2.2	Utilização de Resíduos em Concretos e Argamassas	22
2.2.1	Cinza do Bagaço de Cana de Açúcar.....	23
2.2.2	Escória de Alto Forno.....	24
2.3	Aglomerantes Ativados Alcalinamente	25
2.3.1	Precursores Sólidos.....	26
2.3.2	Ativadores Alcalinos.....	27
2.4	Avaliação do Ciclo de Vida	30
2.5	Revisão Sistemática da Literatura	31
2.5.1	Delimitação e Busca na Literatura.....	32
2.5.2	Resultados da Revisão.....	34
3	METODOLOGIA	40
3.1	Definição de Objetivo e Escopo	40
3.2	Inventário do Ciclo de Vida	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5	CONCLUSÕES	59
5.1	Sugestões para futuros estudos	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Em janeiro de 2016, passaram a vigorar a Agenda 2030 e os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), como apresentado na Figura 1. Essas iniciativas têm a finalidade de guiar a humanidade por um caminho sustentável, melhorando a qualidade de vida da atual e de futuras gerações, através de ações e parcerias a serem cumpridas até 2030 (ONU, 2018).

Figura 1 - Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: ONU (2020).

A indústria da construção civil é extremamente significativa para uma nação, impactando em aspectos ambientais, sociais e econômicos (Marcelino-Sadaba *et al.*, 2017), sendo esta indústria protagonista na agenda da ONU. Através de seus diversos atores (profissionais, construtores, incorporadores, entre outros), influencia diretamente em 3 ODS (Água Potável e Saneamento; Indústria, Inovação e Infraestrutura; Cidades e Comunidades Sustentáveis) e afeta vários outros indiretamente (Trabalho Decente e Crescimento Econômico; Redução das Desigualdades; Consumo e Produção Responsáveis; Ação contra a Mudança Global do Clima). Em 2016, a indústria mundial de concreto e cimento produziu cerca de 33 bilhões de toneladas, com uma taxa de crescimento esperada de 2,5% ao ano (ISO, 2016), representando um aumento anual de mais de 800 milhões de toneladas (GCCA, 2020). O setor de construção foi responsável por 30% do consumo global de

energia em 2021, contribuindo com aproximadamente 37% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas a energia e processos (UNEP, 2022). No Brasil, além dos impactos no meio ambiente, a indústria da construção tem um impacto relevante na economia e na sociedade, representando 3,0% do Produto Interno Bruto (IBGE, 2022), além de empregar mais de 2,3 milhões de trabalhadores (PDET, 2022) no ano de 2021. O setor é composto quase exclusivamente de pequenas empresas, que empregam mão-de-obra intensiva, geralmente de baixa qualificação (Schuh *et al.*, 2017). De acordo com Medeiros, Durante e Callejas (2018), esse cenário demonstra que o ramo da construção civil tem um potencial latente para buscar soluções mais sustentáveis.

Com o propósito de reduzir as particularidades negativas da construção civil, pode-se incentivar o uso de materiais ou métodos construtivos que gerem menos resíduos e sejam mais eficientes (Liu *et al.*, 2022; Nakic, 2018). Além disso, a incorporação de resíduos em construções como pavimentos, pontes e edificações, através do desenvolvimento de novos compósitos, pode diminuir a quantidade de matéria-prima despendida, ampliar a oferta de alternativas no mercado, assim como propiciar um valor agregado aos resíduos, que seriam descartados (Azevedo, 2015; Isaia, 2007). De acordo com a Associação Global de Cimento e Concreto (*Global Cement and Concrete Association - GCCA*), que representa cerca de 80% da indústria mundial de concreto, a redução da quantidade de matérias-primas virgens utilizadas por meio de processos de design aprimorados e o uso de materiais reprocessados e reciclados são prioridades de seu plano para alcançar emissões líquidas zero de CO₂ de produtos em todo o ciclo de vida. Essa meta inclui a captura de carbono de plantas industriais, mas exclui medidas compensatórias como o plantio de árvores (GCCA, 2021).

Uma das alternativas promissoras para esse papel são os AAA, ligantes produzidos pela mistura de materiais aluminossilicosos e ativadores fortemente alcalinos (Zakka; Lim; Khun, 2020). Esses materiais têm menores emissões de CO₂ se comparados com o concreto convencional, e tem grande potencial de incorporar resíduos de indústrias e da agricultura, como escórias e cinzas (entre elas a CBC) (Huang *et al.*, 2020). Entretanto, os AAA apresentam outras dificuldades como o custo das matérias-primas dos ativadores, que geralmente são soluções químicas industriais, e os demais impactos desses insumos (Passuello *et al.*, 2017). É importante ressaltar que uma análise ambiental é mais ampla que apenas as

emissões de CO₂, já que os impactos podem atingir o solo, a água, o ar, os ecossistemas e a sociedade, sendo necessário uma avaliação abrangente dos impactos ambientais de novos materiais.

Ao valorizar o resíduo CBC, e fortalecer a indústria canavieira, o impacto na sociedade será sentido nas classes menos favorecidas. A indústria do cimento no Brasil emprega cerca de 14 mil pessoas, sendo a maioria trabalhadores com ensino médio completo (50,7%) e remuneração média de R\$3.447,25. A indústria de cloros e álcalis, por sua vez, emprega aproximadamente 1,2 mil pessoas formalmente, com prevalência de empregados com ensino médio completo (40%) e salário médio de R\$6.475,29. Já o cultivo de cana-de-açúcar emprega cerca de 109 mil trabalhadores, sendo que grande parte não concluiu o ensino fundamental (43,9%), e tem rendimentos médios de R\$2.074,48 (PDET, 2022).

Para suportar a implementação dessas novas soluções do ponto de vista ambiental, a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser utilizada, por ser normatizada e abrangente, avaliando aspectos ambientais e impactos potenciais de um produto ou serviço ao longo de seu ciclo de vida (ABNT, 2009a). Essa metodologia é capaz de analisar diversas categorias de impacto ambiental, além de facilitar a identificação de processos ou fases operacionais em que os impactos sejam mais severos, servindo como uma excelente ferramenta para auxiliar tomadas de decisões de empresas, organizações e partes interessadas (IBICT, 2020).

Um trabalho recente do grupo Materiais Alternativos de Construção (MAC), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS UNESP), realizado por Pereira (2019) analisou a viabilidade técnica e mecânica do uso de cinza de bagaço de cana de açúcar (CBC), resíduo da indústria sucroalcooleira, em argamassas convencionais e ativadas alcalinamente. Uma análise dos potenciais impactos ambientais, caso sejam vantajosos em comparação com materiais convencionais, poderia atrair atenção para os compósitos desenvolvidos. Assim, o presente estudo pretende verificar o potencial ambiental dos produtos elaborados por Pereira (2019), evidenciando, do ponto de vista ambiental, novos materiais substitutos ao cimento Portland na construção civil, além de valorizar os resíduos, que seriam descartados.

1.2 Objetivos

Pretende-se verificar a viabilidade ambiental de argamassas ativadas alcalinamente com ativadores alcalinos alternativos, ampliando o leque de opções no mercado da construção, gerando valor para os resíduos, que seriam descartados, além de contribuir para uma indústria mais alinhada com os ODS da ONU e acordos internacionais para redução dos impactos ambientais. Para atingir o objetivo será realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida “do berço ao portão” comparativa, embasada por uma revisão sistemática da literatura.

1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação é dividida em sete capítulos que tratam os seguintes assuntos:

Capítulo 1: Consiste no texto introdutório do trabalho. É apresentada uma visão geral do conteúdo da dissertação, bem como a justificativa da escolha do tema e objetivos.

Capítulo 2: Apresenta uma revisão da literatura dos assuntos base para o desenvolvimento da pesquisa, como a situação atual das construções com concreto no Brasil, uma visão geral da utilização de resíduos e desenvolvimento de novos compósitos, como os AAAs, as características e limitações da ACV e produções bibliográficas contextualizadas com a construção civil e a temática do presente estudo. Apresenta também uma revisão sistemática da literatura, com foco em trabalhos recentes envolvendo a utilização de resíduos em substituição do ativador alcalino em AAAs.

Capítulo 3: Apresenta um melhor detalhamento da estrutura metodológica que será utilizada na pesquisa.

Capítulo 4: Consiste nos resultados da ACV, com o cálculo dos potenciais impactos de cada uma das argamassas estudadas e as análises sobre esses resultados.

Capítulo 5: Consiste nas conclusões do estudo e nas sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Concreto e Argamassa na Construção

Um dos insumos mais utilizados no setor da construção é o concreto, por conta de sua durabilidade, baixo custo e versatilidade, sendo a segunda substância mais consumida no planeta, atrás apenas da água (Flower; Sanjayan, 2007; WBCSD, 2009). O concreto geralmente é utilizado em elementos estruturais, onde é necessário suportar cargas, como pilares e vigas de edificações, pontes, túneis, entre outros (Lee; Choi; Kim, 2023). Outro material utilizado amplamente na construção é a argamassa, que pode ser utilizada como revestimento e como assentamento de alvenarias (com ou sem função estrutural), sendo normatizada pela NBR 13281 (ABNT, 2023).

O principal componente do concreto e da argamassa é o cimento Portland, que, de acordo com a norma NBR 16697 (ABNT, 2018), é um ligante hidráulico, produzido através da moagem do clínquer, acrescentando uma ou mais fontes de sulfato de cálcio e adições minerais, em quantidades que variam de acordo com a designação normalizada do cimento. Somente no Brasil, as vendas de cimento Portland totalizaram cerca de 62 milhões de toneladas durante período de julho de 2022 a junho de 2023, conforme dados do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento – SNIC (2023).

Entretanto, este material necessita de grandes quantidades de insumos, consumindo entre 4 e 5 GJ de energia por tonelada de cimento (Madloul *et al.*, 2011; Söğüt; Oktay; Karakoç, 2010). Além disso, a produção de cimento gera consideráveis emissões de CO₂, podendo chegar a 8% das emissões globais, se forem considerados os dois aspectos da produção de cimento: a reação química envolvida na produção do clínquer e a combustão de combustíveis fósseis para gerar a energia necessária para aquecer as matérias-primas a uma temperatura acima dos 1400°C (Andrew, 2019; Mehta; Monteiro, 2014).

Além das grandes quantidades de matéria prima absorvidas pelo setor, grandes quantidades de resíduos são geradas no final da vida útil de edificações. Só no Brasil, 132 mil toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) são coletadas por dia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, 2022). Os impactos causados pela destinação inadequada de resíduos sólidos urbanos, depositados em lixões e aterros controlados,

influenciam diretamente nas condições ambientais, vez que são fontes contínuas de poluição da água, solo, flora, fauna e de emissões de CO₂.

Possíveis soluções para reduzir os impactos ambientais da produção do cimento e, conseqüentemente da construção civil, podem ser: a substituição do clínquer por misturas minerais, como pozolanas; uso de combustíveis alternativos, como biocombustíveis e resíduos; elaborar as misturas de concreto utilizando resíduos e outros materiais em substituição de matérias-primas; e a completa substituição do cimento por outros ligantes, como os AAA (Matheu; Ellis; Varela, 2015; McLellan *et al.*, 2011).

2.2 Utilização de Resíduos em Concretos e Argamassas

A elaboração de traços de concreto e argamassa com resíduos pode ser definida como a junção de insumos convencionais e resíduos de diferentes atividades econômicas. Estes resíduos podem ser incorporados de várias maneiras, tais como: adição, substituição parcial ou total de agregados (miúdos e graúdos), e/ou substituição parcial do cimento. Geralmente, a utilização de resíduos em concretos e argamassas visa o aproveitamento dos materiais descartados e o melhoramento de propriedades desses compósitos, como trabalhabilidade, resistência, módulo de elasticidade e porosidade (Raheem; Ikotun, 2020; Roychand *et al.*, 2020).

De acordo com Nunes Lopes *et al* (2023) existem algumas vantagens de se utilizar resíduos em concretos e argamassas, como a possibilidade de diminuição do uso de cimento Portland, já que subprodutos pozolânicos e cimentícios podem substituir parcialmente o cimento Portland, evitando que se aumente a produção de clínquer; e a maximização da durabilidade das estruturas de concreto. As pesquisas buscando aumentar a durabilidade tem focado em modificar a composição do concreto, sobretudo pela redução da relação água/cimento e pela utilização de materiais com propriedades pozolânicas ou hidráulicas. Esta é uma solução com um enorme impacto e um grande passo no sentido da melhoria da produção de recursos na indústria do concreto. Executar obras que não resistem à toda sua vida útil projetada é equivalente a desperdiçar recursos. Além disso, há o custo extra de se retirar a construção mal executada para que se comece uma nova obra.

Diversos resíduos já foram incorporados aos materiais cimentícios buscando esses benefícios, como cinzas de lodo de esgoto (Nakic, 2018), cinzas vulcânicas

(Robayo-Salazar *et al.*, 2018), resíduos cerâmicos (Robayo-Salazar; Mejía-Arcila; Mejía de Gutiérrez, 2017), escória de alto forno (EAF) (Moraes *et al.*, 2018), resíduos de borracha (Gravina; Xie, 2022), cinzas de casca de arroz (Ahsan; Hossain, 2018), CBC (Spósito *et al.*, 2023), entre outros.

A produção de resíduos agroindustriais é um problema para o meio ambiente devido a gestão inadequada, a produção massiva, a escassez de mão de obra, os custos de transporte ineficazes e o aumento da mecanização. Os resíduos agrícolas são inevitavelmente gerados e queimados após a colheita da plantação para limpar o campo. Os resíduos como cascas, bagaço, raízes e folhas representam um peso de 10 a 15 vezes maior que o próprio produto plantado (Sangmesh *et al.*, 2023).

Paralelamente, o setor da construção é responsável por uma extração significativa de recursos naturais e por emissões de gases com efeito de estufa (UNEP, 2022). De acordo com o Global Resources Outlook de 2019 (IRP, 2019), a extração de areia, cascalho e argila cresceu de 9 bilhões de toneladas em 1970 para 44 bilhões de toneladas em 2017, a nível mundial.

A indústria cimenteira brasileira tem tradição na utilização de resíduos industriais como materiais cimentícios suplementares, principalmente EAF e cinzas volantes (Fadini Natalli *et al.*, 2021). Outros resíduos, como o bagaço de cana-de-açúcar e as cinzas de casca de arroz, têm forte potencial para serem utilizados como materiais cimentícios suplementares (Andrade Neto *et al.*, 2021; Pereira, 2019), mas, atualmente, ainda são pouco aplicados.

Uma vez que a disponibilidade local de cada resíduo influencia fortemente a viabilidade de seu uso, juntamente com os custos e impactos ambientais de seu transporte, a logística do uso de resíduos na construção civil deve ser analisada em conjunto com os demais fatores como propriedades técnicas adequadas para que a utilização desses resíduos em larga escala seja viável (Nunes Lopes *et al.*, 2023).

2.2.1 Cinza do Bagaço de Cana de Açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é a maior cultura em quantidade de produção do mundo, e o Brasil um dos principais produtores mundiais, sendo responsável por 39,1% da produção global dessa commodity agrícola em 2018 (FAOSTAT, 2020; Payá *et al.*, 2018). O caldo da cana-de-açúcar é obtido através do processo de moagem, e então é encaminhado para o processo da indústria

sucroalcooleira, deixando como resíduo o bagaço, que é gerado numa quantidade que varia de 240 kg a 280 kg por tonelada de cana moída. O bagaço é então reaproveitado como combustível para as caldeiras a vapor utilizadas no próprio processo produtivo do açúcar e do etanol (NOVA CANA, 2020). Para cada tonelada de bagaço utilizada como combustível para produzir o vapor, são gerados cerca de 25 kg de cinza residual, a CBC, que possui grande quantidade de sílica em sua composição. A safra brasileira de 2022/2023 (abril de 2022 até março de 2023) foi de 607 milhões de toneladas (UNICA, 2023), portanto foram produzidas aproximadamente 151,7 milhões de toneladas de bagaço e 3,8 milhões de toneladas de CBC, sendo a maior parte dessas cinzas descartadas em aterros sanitários (Cordeiro; Andreão; Tavares, 2019).

Em virtude de possuir grande potencialidade pozolânica, caso seja devidamente preparada, e ser abundante em países produtores de açúcar, a CBC pode ser utilizada como material cimentante complementar em substituição parcial do cimento Portland (Fazzan, 2017; Jagadesh; Ramachandramurthy; Murugesan, 2018). No Brasil, esse resíduo pode ser encontrado facilmente nos estados de São Paulo, Minas Gerais, além das regiões Centro-Oeste e Nordeste (Nunes Lopes *et al.*, 2023).

As condições de queima e moagem da CBC são muito importantes para o desempenho dos produtos finais aos quais é aplicada, já que possibilitam a existência de inúmeras composições químicas e viabilizam a homogeneização e o controle de sua granulometria. Para obter a CBC com menores perdas ao fogo e maiores teores de sílica amorfa, deve-se realizar um rígido controle de qualidade do processo de queima, por meio de adequados tempos, temperaturas e taxas de aquecimento (Cordeiro; Andreão; Tavares, 2019; Cordeiro; Kurtis, 2017).

2.2.2 Escória de Alto Forno

A EAF é um subproduto da manufatura do ferro-gusa no alto-forno, em que as matérias-primas (minério de ferro, minério de manganês, carvão mineral e calcário) reagem quimicamente sob temperaturas próximas a 1500 °C, originando a escória em sua forma líquida. Posteriormente, tal material passa por um processo de resfriamento, o qual pode ocorrer lentamente, por meio do ar, ou rapidamente, por meio de jatos de água, em elevada pressão, no granulador (Cristelo *et al.*, 2019)

Segundo Koniorczyk *et al.* (2024), a taxa de resfriamento exerce forte influência na resistência mecânica de argamassas e concretos que contenham EAF em sua constituição, já que, o resfriamento ao ar promove a formação de várias fases cristalinas, prejudicando sua capacidade aglomerante, não ocorrendo o mesmo durante o rápido resfriamento, em que há vitrificação do material, com o desenvolvimento de suas propriedades hidráulicas, recebendo a denominação de escória granulada de alto-forno.

Dados da produção mundial de ferro-gusa do mês de junho de 2023 demonstram que os maiores produtores são China, Índia e Japão, com o Brasil na nona posição da lista (World Steel Association, 2023). A quantidade e a composição da escória gerada variam de acordo com o combustível utilizado, que pode ser carvão ou coque. De acordo com a qualidade das matérias-primas utilizadas no processo produtivo, pode-se obter de 210 a 310 kg de EAF por tonelada de ferro-gusa produzida (CGEE, 2010). Nas siderúrgicas que utilizam altos-fornos alimentados com carvão metalúrgico, são geradas aproximadamente 500 milhões de toneladas de escória por ano no mundo (Gholampour; Ozbakkaloglu, 2017). No Brasil, a geração anual de escória é de cerca de 7,8 milhões de toneladas (Instituto Aço Brasil, 2021).

Segundo Provis (2018), apesar da elevada quantidade de EAF gerada anualmente, sua disponibilidade para o uso em AAA varia consideravelmente, já que há regiões, como o Reino Unido, em que toda a EAF produzida é destinada ao cimento Portland, como adição mineral, enquanto em outras, como Índia e China, é considerada como resíduo, sendo descartada. No Brasil, a EAF pode ser encontrada em abundância na região Sudeste, além do Pará, Maranhão e Ceará (Nunes Lopes *et al.*, 2023).

2.3 Aglomerantes Ativados Alcalinamente

Os AAA são alternativas promissoras para substituir o cimento Portland. Esses ligantes são materiais cimentantes, frutos de um processo com o uso de substâncias fortemente alcalinas, como hidróxidos e silicatos de sódio e potássio, utilizados para ativar materiais aluminosilicosos (ou precursores sólidos), que podem ser materiais naturais, sintéticos ou resíduos industriais, como EAF ou cinzas volantes (CV) (Huang *et al.*, 2020; Zakka; Lim; Khun, 2020).

Os primeiros estudos referentes aos materiais ativados alcalinamente datam da década de 30, nos quais foi avaliada a EAF ativada com hidróxido de sódio (NaOH), constatando que hidróxidos alcalinos se comportam como catalisadores (Pacheco-Torgal; Castro-Gomes; Jalali, 2008a; Shi; Jiménez; Palomo, 2011). Porém, somente após os resultados encontrados por Davidovits (1979) que a quantidade de estudos relacionados a este assunto cresceu consideravelmente. Este pesquisador elaborou aglutinantes por meio da ativação alcalina do metacaulim (MK), denominando-os geopolímeros, os quais possuem características similares a polímeros devido sua capacidade de transformação, polimerização e endurecimento a baixas temperaturas, além de serem inorgânicos, duros e se apresentarem estáveis e não inflamáveis a altas temperaturas.

Os concretos elaborados com AAA tem como diferenciais elevadas resistências mecânicas, térmicas e em meio ácido, além de baixa retração, sinalizando serem mais duráveis que concreto à base de cimento Portland (Duxson *et al.*, 2007). A durabilidade, visto a recente descoberta desse material se comparado ao cimento Portland, é testada indiretamente, através de ensaios como ataques ácidos e resistências a sulfatos, retração, porosidade, absorção e resistência térmica, por exemplo (Chi, 2012; Hossain *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2015). A essas vantagens deve-se acrescentar o potencial que os geopolímeros tem de incorporar resíduos industriais, de minas e pedreiras e até mesmo resíduos agrícolas, como as cinzas de casca de arroz, as cinzas de madeira e a CBC (Payá *et al.*, 2017; Van Deventer *et al.*, 2010).

2.3.1 Precursores Sólidos

Segundo Provis (2018), precursores de aluminossilicatos são encontrados em abundância na crosta terrestre, porém, com diferentes disponibilidades, reatividades e custos, já que, segundo o autor, diferem em química, mineralogia e finura, conforme sua localidade. A condição para que uma adição mineral seja utilizada como material no processo de ativação alcalina, é que esse material seja inorgânico, rico em aluminossilicato, apresente alta solubilidade em meios básicos e que apresente uma estrutura predominantemente amorfa (Shi; Jiménez; Palomo, 2011; Tashima *et al.*, 2012).

Uma variedade de resíduos industriais pode ser utilizada como precursor sólido. Entretanto, seu uso demanda um rígido controle de qualidade para obtenção de AAA com maiores resistências mecânicas, já que as condições estruturais dos precursores influenciam na composição destes (Pacheco-Torgal; Castro-Gomes; Jalali, 2008b; Provis, 2018).

Uma grande parte dos estudos de AAA utiliza EAF como precursor sólido. Nas décadas de 80 e 90, por exemplo, representaram a fonte de aluminossilicato mais estudada (Pacheco-Torgal; Castro-Gomes; Jalali, 2008a). Quanto a composição da EAF, existe uma proximidade ao cimento Portland, já que apresenta altos teores de sílica e cal, além de alumina (Aïtcin; Mindess, 2017; Beltrame *et al.*, 2020). Dessa forma, o uso de EAF em AAA pode promover melhorias em várias propriedades, como na resistência mecânica, a qual pode até superar a do cimento tradicional, além de benefícios na permeabilidade e resistência a meios corrosivos e ao fogo sendo importante ressaltar que a obtenção de tais benefícios também depende da natureza e dosagem dos ativadores alcalinos aplicados (Shi; Jiménez; Palomo, 2011).

Outro precursor sólido passível de utilização é a CBC. Além de ser aplicada em substituição parcial do cimento Portland, como adição mineral (Cordeiro; Andreão; Tavares, 2019; Fazzan, 2017; Jagadesh; Ramachandramurthy; Murugesan, 2018), ela apresenta forte potencial para ser utilizada como precursor sólido na produção de AAA devido sua composição, principalmente se misturada a outros materiais, tais como EAF, CV e MK (Castaldelli *et al.*, 2013; Fernandes Filho, 2012; Pereira, 2014; Tippayasam *et al.*, 2014).

2.3.2 Ativadores Alcalinos

As soluções alcalinas aplicadas como ativadores em AAA são constituídas por metais alcalinos ou alcalino terrosos, cujas concentrações variam conforme os precursores sólidos utilizados, em virtude de suas diferentes características, como mineralogia e finura, demandando estudos específicos. Deste modo, os ativadores correspondem de 5 a 10% da massa total destes materiais (Pacheco-Torgal; Castro-Gomes; Jalali, 2008b; Provis, 2018).

Além disso, segundo Wang *et al.* (1994), a natureza do ativador exerce considerável influência sobre a resistência mecânica do produto final, com a contribuição de outros fatores, como o processo de cura. Os autores concluíram que

a melhor maneira de adicionar ativadores aos precursores ocorre por meio de soluções, já que apresentam baixas solubilidades na forma sólida, devido a sua difícil dissolução. Além disso, ainda destacaram que as dosagens também dependem de outras questões, como o custo, e não só da resistência mecânica, a qual, geralmente, sofre um acréscimo com o aumento da quantidade dos álcalis até um valor limite, que varia conforme os precursores, os ativadores e os processos de cura aplicados.

Livi (2013) menciona que os ativadores mais utilizados são os constituídos por sódio, principalmente devido ao maior entendimento e aprovação de seus efeitos durante as reações. Castaldelli (2013) também determinou, em seu estudo, que uma mistura contendo hidróxido e silicato de sódio promoveu um melhor desenvolvimento na resistência à compressão de argamassas constituídas por AAA.

O hidróxido de sódio, também conhecido como soda cáustica, é o ativador alcalino mais aplicado em AAA, em razão de seus baixos custos e viscosidades, além de sua abundância (Sani *et al.*, 2016). Trata-se de um material higroscópico e inorgânico que pode ser encontrado no mercado em diversas formas como em escamas, pó e pastilhas, sendo obtido por meio da eletrólise da salmoura (solução de cloreto de sódio), a qual, por sua vez, pode ser obtida da água do mar (Silva, 2012). Dessa forma, a energia elétrica aplicada promove movimentações dos íons, gerando cloro, hidróxido de sódio e hidrogênio (Livi, 2013). Assim, para cada tonelada produzida do primeiro, há a manufatura de 1,128 t de NaOH e 28,50 kg de H (Garcia-Herrero *et al.*, 2017).

O consumo de energia varia conforme as células eletrolíticas usadas, as quais podem ser de mercúrio, diafragma ou membrana, alterando também, o grau de pureza do NaOH obtido. A primeira tecnologia gera produtos mais puros e concentrados, mas com uma maior contaminação ambiental em decorrência das perdas de mercúrio. A presença de amianto na constituição da segunda também pode representar riscos, à saúde, podendo ser substituído por outros materiais como zircônio, por exemplo. Já a última, além de evitar contaminações, demanda menos energia. Entretanto, a tecnologia mais aplicada no Brasil ainda é a de diafragma (63%), sendo 9% referente à ausência de amianto e 54% à sua presença, seguida pelas células de membrana (23%) e de mercúrio (14%) (Abiclor, 2020; Silva, 2012).

Atualmente, segundo Provis (2018), cerca de 60 milhões de toneladas de NaOH são produzidas anualmente por meio dos processos supracitados. O autor avaliou que uma futura implantação em larga escala de AAA iria requerer uma

expansão na produção de tal material, devendo-se atentar às emissões de CO₂ que ocorrem durante a mesma, em razão de seu consumo de energia.

Outro ativador comum é o silicato de sódio, também denominado de vidro líquido ou “*waterglass*”, composto por uma combinação de dióxido de silício ou sílica (SiO₂) e óxido de sódio (Na₂O), cuja razão (SiO₂:Na₂O) é denominada módulo de sílica (Ferreira, 2013). A variação deste último é responsável por originar produtos com características distintas, além de ser diretamente relacionada à viscosidade, a qual limita sua concentração máxima em solução (Silva, 2011).

Tal silicato é encontrado no mercado em pó ou em solução aquosa, sendo largamente aplicado na indústria em razão de suas propriedades, dentre as quais se destacam a estabilidade química, a viscosidade e a capacidade de polimerização, a qual favorece a presença de sílica e a resistência mecânica em AAA, quando utilizado como ativador alcalino (Criado; Palomo; Fernández-Jiménez, 2005; Ferreira, 2013; Silva, 2011).

O método de produção do silicato de sódio mais utilizado no Brasil é o hidrotérmico (Lima Filho, 2009). Nele, uma mistura de carbonato de sódio e areia silicosa é dosada conforme o módulo de sílica desejado e fundida a temperaturas até 1600°C, resultando na emissão de uma elevada quantidade de CO₂ e no silicato de sódio sólido, o qual é aquecido novamente, com a adição de água ou NaOH para corrigir a densidade, sob altas pressões, obtendo a solução aquosa. Por fim, tal solução passa por um filtro-prensa, visando a remoção de impurezas (Conceição, 2019; Rabello, 2014).

A adição de silicato de sódio como solução ativadora proporciona maiores resistências, porém, considerando o quesito econômico, apresenta certa desvantagem ao ser comparado com outros produtos, como o NaOH (Pereira, 2019). Além disso, a considerável emissão de CO₂ durante sua produção, a qual ocorre não só devido às reações químicas, mas também no aquecimento dos fornos, contribui desfavoravelmente para seu uso, influenciando na energia incorporada de AAA. Porém, continua sendo o silicato solúvel mais utilizado (Conceição, 2019).

Existem também estudos que buscam desenvolver ativadores alcalinos alternativos com base na combinação de álcalis com fontes de sílica amorfa, provenientes de resíduos agroindustriais como cinza de casca de arroz, resíduos de vidro, CV e CBC (Bajpai *et al.*, 2020; Bernal *et al.*, 2012; Passuello *et al.*, 2017; Pereira, 2019; Puertas; Torres-Carrasco, 2014).

2.4 Avaliação do Ciclo de Vida

A utilização de materiais, sistemas ou tecnologias alternativas, para determinado contexto, também deve sustentada por evidências científicas no ponto de vista ambiental, não somente de atributos de performance. A ACV se apresenta como uma ótima metodologia para esse fim, já que permite a análise, a quantificação e a comparação, de um modo aprofundado, abrangente e holístico dos impactos ambientais potenciais de todo o ciclo de vida de bens ou serviços, incorporando os dados provenientes de um inventário com entradas e saídas de produtos, materiais ou recursos energéticos (ABNT, 2009a, 2009b).

A primeira fase da avaliação é a definição de objetivo e escopo, sendo que o objetivo delimita com precisão a aplicação pretendida, as razões para realização do estudo, o público-alvo, e se há intenção de divulgar os resultados obtidos. Esta fase é de suma importância, já que auxilia na definição das fontes de informações necessárias nas fases seguintes, na determinação do tempo de realização da ACV e, se bem realizada, permite a obtenção de resultados mais fidedignos (Hasheminezhad *et al.*, 2024).

Conforme especificado na NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), devem fazer parte do escopo a definição do sistema do produto, com suas funções e fronteiras; a definição da unidade funcional; indicação dos métodos de avaliação e interpretação de impactos que serão utilizados e as categorias de impacto analisadas; detalhamento da alocação, caso seja necessário, porém a própria norma recomenda evitar este processo devido à dificuldade e potencialidade de gerar incertezas; determinação dos requisitos dos dados e da qualidade dos mesmos; e, por fim, a indicação de todos os pressupostos, limitações, suposições e quaisquer outras hipóteses simplificadoras utilizadas, todas descritas e justificadas de forma clara.

A segunda etapa é a análise de inventário do ciclo de vida (ICV), que, de acordo com Guinée *et al.* (2001), compreende a coleta dos dados que serão utilizados e os cálculos para quantificar as entradas e saídas de cada processo individual do sistema estudado, como fluxo de poluentes, materiais e recursos. O inventário também pode ser dividido em subinventários, de acordo com os subsistemas escolhidos, visando a melhoria da coleta de dados. É nesta fase que se podem identificar os pontos do ciclo de vida passíveis a mudanças, comparar entradas e saídas de cenários alternativos

e iniciar a elaboração de produtos e processos inovadores (Dossche; Boel; De Corte, 2017).

A terceira fase é a de avaliação do impacto de ciclo de vida (AICV), que associa os dados do ICV a categorias de impacto e a indicadores de categoria, associando os produtos e sistemas aos seus impactos potenciais à saúde humana, ao ambiente natural e aos recursos naturais. Tal processo também pode requerer iterações para satisfazer o escopo, além de fornecer informações cruciais para as análises posteriores, justificando a importância de sua transparência (Xing *et al.*, 2022). Esta etapa pode agregar subjetividades ao estudo, devido ao grande número de métodos e escolhas características desta fase, por isso a transparência tem um papel bastante relevante, evitando omissões ou conclusões tendenciosas.

São elementos obrigatórios da AICV a seleção das categorias de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização, de acordo com o que foi definido no escopo e obtido na coleta de dados; a classificação, que relaciona os dados do ICV com as categorias de impacto; e a caracterização, que consiste na modelagem dos dados do inventário de ciclo de vida dentro de categorias de impacto, e o cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (ABNT, 2009a).

A interpretação é a etapa final, que fornecerá os resultados das fases anteriores, sendo que estes devem estar alinhados com o objetivo e escopo que foram definidos, com as limitações apresentadas, além de poder conter uma análise crítica do escopo e da qualidade dos dados da ACV. Esses resultados devem ser recomendações e conclusões, que serão úteis para os tomadores de decisão e para as demais partes interessadas no estudo (ABNT, 2009a). As conclusões desta etapa possibilitam a identificação de estágios críticos no ciclo de vida do produto ou serviço estudado, indicando pontos que necessitem de algum tipo de intervenção, como, por exemplo, a substituição ou eliminação de processos, mudança da matriz energética, ou a troca de matérias-primas.

2.5 Revisão Sistemática da Literatura

Esta revisão sistematizada tem o objetivo de identificar o que já foi produzido na literatura científica sobre análises ambientais relacionadas a utilização de aglomerantes ativados alcalinamente para produção de argamassas com a incorporação de resíduos agroindustriais nos ativadores alcalinos até o presente

momento, buscando abranger o máximo de informações sobre o assunto. Os objetivos específicos desta revisão são mapear o que já foi publicado sobre o assunto; verificar a oportunidade, ambiental e tecnológica, de valorização de resíduos como ativadores alcalinos nestes materiais; e demonstrar a novidade do tema proposto pelo presente estudo.

A presente revisão tem metodologia baseada nos trabalhos de Lima *et al.* (2021), que analisaram a literatura sobre sustentabilidade no contexto da construção civil, e Seuring e Müller (2008), que realizaram uma revisão sobre gestão sustentável da cadeia de suprimentos. Contudo, os métodos desenvolvidos por estes dois trabalhos podem contribuir com esta pesquisa, visto que também aborda o tema de sustentabilidade, além de estruturar uma análise quantitativa e qualitativa, característica inovadora para as revisões na área.

2.5.1 Delimitação e Busca na Literatura

Nesta fase serão identificados os fatores que irão delimitar a fronteira do estudo bem como o método de refinamento dos trabalhos encontrados. Assim, definem-se inicialmente as plataformas de banco de dados, palavras-chave e filtros a serem utilizados para refinamento dos resultados.

A base de dados da coleção principal do *Web of Science Core Collection*, disponível desde 1900 até o presente, será utilizada para a busca de trabalhos por ser frequentemente usada como recurso para revisões em todos os campos de pesquisa, através da inclusão de quatro conjuntos de palavras-chave. A seleção criteriosa das palavras-chave é fundamental para assegurar a abrangência da revisão, além de otimizar o tempo de análise ao encontrar resultados pertinentes ao tema. Para conduzir essa busca, foram seguidas as diretrizes de pesquisa da plataforma, empregando o uso de asteriscos (*) ao final de cada termo para ampliar os resultados, o uso de aspas (") em cada termo para garantir precisão, e o operador "ou" (OR) entre os termos para buscar alternativas.

Para tal busca, o primeiro grupo de palavras, obrigatório para todos os resultados, irá conter aquelas relacionadas ao desempenho ambiental, permitindo identificar os métodos, categorias de impacto e análises atualmente relevantes para a área de pesquisa, já que o objetivo é identificar a viabilidade ambiental (Grupo LCA).

O segundo grupo consiste nas palavras-chave relacionadas a matrizes AAs (Grupo ALK), principais compósitos da análise. O terceiro grupo busca garantir que resíduos foram utilizados na produção (Grupo RES) e um filtro relacionado à origem agrícola dos resíduos (Grupo AGR) será aplicado com a finalidade de direcionar ainda mais a revisão ao tema proposto pela dissertação.

As palavras-chaves relacionadas com cada grupo estão demonstradas no Quadro 1. Todos os critérios foram combinados com o conector “AND”, ou seja, para ser encontrada, a referência precisa atender a pelo menos uma das palavras de cada grupo. Ademais, para refinar a pesquisa, critérios de exclusão também foram aplicados aos resultados, como o período de publicação de 1900 a 2024, artigos publicados em periódicos e escritos na língua inglesa.

Quadro 1 - Palavras-Chave para Busca.

Grupo	Palavras-chave
LCA	<i>"Life cycle assessment" OR "LCA" OR "environmental impact*" OR "environmental life cycle" OR "environmental impact assessment" OR "environmental impact assessment method*" OR "environmental product* declaration" OR "life cycle impact assessment" OR "LCIA" OR "life cycle inventor*" OR "LCI" OR "product* environmental footprint*" OR "climate change*"</i>
ALK	<i>"alkali* activat*" OR "alkali* soluti*" OR "geopolymer*"</i>
RES	<i>"residu*" OR "waste*" OR "end of life material*" OR "EOL" OR "end of life waste*" OR "recycled" OR "recycl* waste*" OR "by-product*" OR "byproduct*" OR "secondar* product*" OR "blast furnace slag*"</i>
AGR	<i>"agricultural" OR "agricultural waste*" OR "agro-waste* ash*" OR "agro-industria*" OR "biochar*" OR "residua* rice husk" OR "rice husk ash*" OR "sugar cane bagasse ash*" OR "sugarcane straw ash*" OR "corn husk wast*" OR "corn cob ash*" OR "wheat straw ash*" OR "palm oil fuel ash*" OR "biomass ash*" OR "wood ash*" OR "coconut shell ash*" OR "bamboo leaf ash*"</i>

Fonte: Próprio autor.

Após a pesquisa na plataforma de dados, os artigos irão passar por análise de conteúdo, a partir da leitura cuidadosa do título e resumo, excluindo aqueles que ainda não se enquadraram no tema. Artigos cujo acesso não é aberto, ou não disponível com o acesso institucional pela UNESP, também foram excluídos nesta etapa de triagem.

2.5.2 Resultados da Revisão

Com o primeiro filtro, utilizando todas as palavras-chave listadas, foram encontrados 41 artigos, que compreendiam a união dos grupos LCA, ALK, RES e AGR. Destes 41 artigos, 34 foram eliminados com a triagem descrita anteriormente.

Os 7 artigos avaliados e as respectivas revistas científicas utilizadas para publicação, bem como o fator de impacto destas e os autores estão representados no Quadro 2:

Quadro 2 - Artigos incluídos na revisão sistematizada.

No.	Título	Autores	Revista	Fator de impacto
1	Environmental and economic perspective of waste-derived activators on alkali-activated mortars	(Abdulkareem <i>et al.</i> , 2021)	Journal of Cleaner Production	9.7
2	Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders	(Tong; Vinai; Soutsos, 2018)	Materials	3.1
3	Environmentally-Friendly Dense and Porous Geopolymers Using Fly Ash and Rice Husk Ash as Raw Materials	(Ziegler <i>et al.</i> , 2016)	Materials	3.1
4	Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators	(Passuello <i>et al.</i> , 2017)	Journal of Cleaner Production	9.7
5	Evaluation of eco-efficient geopolymer using chamotte and waste glass-based alkaline solutions	(Mendes <i>et al.</i> , 2022)	Case Studies in Construction Materials	6.5
6	Eco-efficient alkaline activated binders for manufacturing blocks and pedestrian pavers with low carbon footprint: Mechanical properties and LCA assessment	(Mejía-Arcila; Valencia-Saavedra; Mejía de Gutiérrez, 2020)	Materiales de Construcción	2.0
7	New eco-cellular concretes: sustainable and energy-efficient materials	(Font <i>et al.</i> , 2018a)	Green Chemistry	9.3

Fonte: Próprio autor.

Durante a busca, foram identificados estudos com diferentes materiais e resíduos utilizados em substituição parcial dos ativadores alcalinos, como cinzas de folha de bambu (Vinai *et al.*, 2022), dregs (resíduo da indústria de papel e celulose) (Eleutério *et al.*, 2023) e terra diatomácea (Font *et al.*, 2018b). No entanto, grande parte dos artigos avaliou apenas as características físicas e mecânicas dos materiais.

Os artigos selecionados, além de terem como foco inovações na elaboração de ativadores alcalinos, também realizaram algum tipo de avaliação ambiental dos materiais. Com o propósito de investigar quais resíduos foram avaliados por cada um dos sete artigos selecionados na busca, o Quadro 3 foi elaborado. Neste Quadro também serão destacadas quais as unidades funcionais analisadas e o método utilizado.

Quadro 3 - Unidades Funcionais e Resíduos Estudados.

No.	Autores	Unidade Funcional	Resíduo	Método
1	(Abdulkareem <i>et al.</i> , 2021)	1 m ³ de argamassa	Resíduo de vidro e cinza de casca de arroz (CCA)	ReCiPe
2	(Tong; Vinai; Soutsos, 2018)	1 kg de ativador*	Cinzas volantes e CCA	Sub-Raw
3	(Ziegler <i>et al.</i> , 2016)	1 kg de pasta	Cinzas volantes e CCA	CML
4	(Passuello <i>et al.</i> , 2017)	1 kg de pasta	Resíduo de mineração e CCA	CML
5	(Mendes <i>et al.</i> , 2022)	1 kg de ativador*	Chamote e resíduo de vidro	Sub-Raw
6	(Mejía-Arcila; Valencia-Saavedra; Mejía de Gutiérrez, 2020)	1 tonelada de ligante	CCA	CML
7	(Font <i>et al.</i> , 2018a)	1 m ³ de concreto*	CCA	Pegada de Carbono

Fonte: Próprio autor.

Os artigos 2, 5 e 7 utilizaram métodos simplificados para avaliação ambiental, a pegada de carbono e energia incorporada.

Tong, Vinai e Soutsos (2018) investigaram a produção de uma solução de silicato de sódio a partir da CCA do Vietnã. Foi desenvolvido um processo hidrotérmico para a dissolução de CCA em solução de hidróxido de sódio. Foram estudadas a concentração da solução de hidróxido de sódio, a temperatura e a duração do processo. Os parâmetros com melhores resultados foram: concentração de NaOH em 3M, temperatura de aquecimento de 80 °C e duração do aquecimento de 3 horas. A solução obtida foi usada para a produção de argamassa ativada alcalinamente feita com uma mistura de cinzas volantes e escória de alto-forno granulada moída. A resistência à compressão obtida da argamassa ficou na faixa de 60 MPa aos 28 dias, correspondendo à resistência obtida das amostras de controle produzidas com ativadores disponíveis comercialmente. A análise de custos indicou que o método proposto pode chegar a 55% do custo para a ativação do ligante se comparado com o método convencional. Os resultados de uma análise ambiental preliminar simplificada utilizando o método Sub-Raw (que avalia a energia embutida e a pegada de carbono) sugeriram maior sustentabilidade da solução ativadora derivada de CCA quando comparada com o hidróxido de sódio disponível comercialmente.

Mendes *et al.* (2022) estudaram o desempenho de pastas ativadas por álcalis produzidas a partir de chamote como precursor e resíduos de vidro como componente da solução ativadora. Os efeitos da concentração molar e do conteúdo de resíduo nas soluções alcalinas foram investigados, além dos impactos ambientais da substituição. Os resultados mostraram que o teor de resíduo de vidro afeta fortemente a resistência mecânica dos geopolímeros e a qualidade das matrizes, promovendo uma maior formação de produtos de geopolimerização. O uso de um ativador alternativo pode reduzir 69,8% da energia embutida e 78,0% da pegada de CO₂ em comparação com os ativadores comerciais.

Por fim, Font *et al.* (2018a) avaliaram um concreto celular ecológico, em que o hidróxido de sódio comercial foi substituído por CCA na solução ativadora. O desenvolvimento de concreto celular de geopolímero com diferentes precursores e soluções ativadoras provou que a produção desse tipo de concreto é possível dependendo da disponibilidade de subprodutos e resíduos. Os resultados mostram que os concretos celulares alternativos atingiram densidade, resistência a compressão e condutividade térmica compatíveis com a referência convencional. Avaliando do ponto de vista da emissão de CO₂, o concreto com solução ativadora contendo CCA apresentou uma redução na pegada de carbono de 78%.

Mesmo com resultados promissores, é importante ressaltar que todos os autores trouxeram a ressalva de que, para indicar uma real melhora no contexto ambiental, um estudo completo, utilizando metodologias como a ACV, seria necessário.

Abdulkareem *et al.* (2021) analisaram argamassas ativadas alcalinamente produzidas a partir de ativadores com resíduos de vidro e CCA em comparação com argamassas com ativadores convencionais. Os resultados mostraram que a argamassa com ativador alternativo teve uma redução de até 62%, 61%, 76% e 56% nas emissões, respectivamente, de mudanças climáticas, esgotamento de fósseis, acidificação terrestre e formação de ozônio fotoquímico quando comparada à argamassa ativada com ativador comercial. A análise de sensibilidade indicou que os resíduos de vidro e as cinzas de casca de arroz não são tão sensíveis à alocação de massa, com um aumento máximo de 5% nas categorias de impacto mencionadas acima. Além disso, os resultados da análise de custos indicaram uma economia de até 19% na argamassa ativada por álcalis derivada de resíduos.

Ziegler *et al.* (2016) verificaram a viabilidade de dois resíduos, cinzas volantes e CCA, como matérias-primas para a produção de pastas geopoliméricas. Assim, foram

produzidas três tipologias de amostras: (i) haloisita ativada com hidróxido de potássio e nanosílica, usada como amostra de referência; (ii) haloisita ativada com cinza de casca de arroz dissolvida em solução de KOH (HL-R); (iii) cinza volante ativada com a solução alcalina produzida com a cinza de casca de arroz (FA-R). A adição de RHA à composição geopolimérica demonstrou ser eficaz para produzir amostras densas ou porosas. Na avaliação preliminar do potencial de aquecimento global (GWP) para as três formulações investigadas, a mistura contendo cinzas volantes FA e ativador com CCA obteve uma redução de cerca de 90% do GWP em relação aos valores obtidos para a formulação de referência.

Passuelo *et al.* (2017) aplicaram a ACV para avaliar os impactos relacionados à produção de geopolímeros, considerando diferentes ativadores, para o estudo de caso específico de materiais desenvolvidos a partir de um resíduo de mineração de caulim brasileiro. As amostras de geopolímeros com ativadores convencionais e alternativos (utilizando cinza de casca de arroz junto com NaOH) foram comparadas a ligantes à base de cimento Portland de escória com 75% de clínquer. Os aglomerantes produzidos com silicato de sódio convencional apresentaram os maiores impactos ambientais entre as formulações estudadas, com exceção do potencial de aquecimento global, na qual os ligantes à base de cimento Portland tiveram impactos maiores. Outro ponto levantado pelos autores foi a relevância da produção dos ativadores nos impactos gerais dos geopolímeros, sendo relevante encontrar alternativas para reduzir esses impactos, seja reduzindo a necessidade ou substituindo parte dos ativadores por outros materiais, como resíduos agroindustriais.

Mejía-Arcila, Valencia-Saveedra e Mejía de Gutiérrez (2020) investigaram ligantes utilizando cinzas volantes, escória de alto forno e cimento Portland para produção de pré-fabricados. Uma mistura de silicato de sódio comercial e hidróxido de sódio foi usada como ativador tradicional, e a mistura de cinza de casca de arroz e NaOH como ativador alternativo. Os resultados mostram a possibilidade de obter um cimento binário com resistência à compressão de até 38 MPa após a cura por 28 dias e 65 MPa após a cura por 360 dias. Além disso, cimento com cinzas volantes, EAF e CCA como ativador registrou reduções nos potenciais impactos ambientais de até 75%, considerando as categorias de acidificação, potencial de aquecimento global, eutrofização, oxidação fotoquímica e efeitos respiratórios. A exceção ficou com a depleção de ozônio, na qual o material com ativador alternativo apresentou impactos

20% maiores em comparação com os sistemas feitos com silicato de sódio e hidróxido de sódio.

Com base nos artigos, pode-se concluir que os AAA têm sido considerados uma alternativa de baixo carbono ao cimento e são produzidos pela reação do precursor de aluminossilicato com um ativador alcalino. No entanto, os ativadores alcalinos são os principais contribuintes para o ônus ambiental dos materiais ativados com álcalis em relação a várias categorias de impacto ambiental, o que motiva a investigação de alternativas para os materiais utilizados convencionalmente (hidróxido e silicato de sódio).

Além disso, não foram encontrados trabalhos que avaliem os impactos ambientais de AAA com incorporação de CBC como fonte de silicato solúvel no ativador alcalino. Caso a aplicação do resíduo como insumo da solução ativadora se mostre benéfica do ponto de vista ambiental, pode significar mais um passo na direção da substituição, mesmo que parcial, de materiais cimentícios com alto impacto e dependentes de extração constante de matérias-primas não renováveis.

Pereira (2019) analisou a viabilidade do uso de CBC na produção de AAA. Uma das análises foi a utilização das cinzas como fonte de silicato solúvel na produção dos ativadores alcalinos, comparando os resultados de resistência mecânica com misturas ativadas por ativadores comerciais (hidróxido e silicato de sódio) e argamassas convencionais de cimento Portland. Entretanto, caso fosse realizado uma análise dos impactos ambientais, esses produtos desenvolvidos poderiam se diferenciar no mercado caso apresentem redução nas emissões, aumentando as chances de ser alvo de interesse para produção, e contribuindo para uma melhor utilização dos recursos não renováveis, reaproveitando materiais que seriam descartados. Além disso, o estudo de ACV sobre ativadores alcalinos com incorporação de CBC preencherá uma lacuna da literatura e poderá contribuir para a valorização do resíduo, que seria descartado.

3 METODOLOGIA

A análise comparativa entre os produtos propostos será realizada com auxílio da ACV. Conforme a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), essa metodologia é subdividida em quatro fases. Porém, antes de se aprofundar nas mesmas e nos materiais a serem avaliados, foi necessário efetuar uma revisão sistemática da literatura (Item 2.5 Revisão Sistemática) para embasar a relevância do tema e algumas premissas do estudo.

3.1 Definição de Objetivo e Escopo

O objetivo desse estudo será realizar uma ACV, do berço ao portão, entre argamassas ativadas alcalinamente (AAA) com ativadores alcalinos comerciais; argamassas com ativador alcalino com incorporação de CBC na solução ativadora; e argamassas convencionais de cimento Portland, todas com tempo de cura de 28 dias. Pretende-se verificar a viabilidade ambiental dos novos materiais, ampliando o leque de opções no mercado da construção, gerar valor para os resíduos, que seriam descartados, além de contribuir para uma indústria mais alinhada com os ODS da ONU e acordos internacionais para redução dos impactos ambientais.

O estudo se direciona principalmente à comunidade acadêmica, mas também aos setores da indústria envolvidos direta ou indiretamente com a produção e transporte dos materiais utilizados, sendo divulgado através do relatório científico e possíveis artigos derivados deste, buscando ampliar cada vez mais os horizontes de aplicação da ACV.

O escopo tecnológico do estudo será considerado estático, pois serão levadas em consideração processos atualmente utilizados, sem previsão de desenvolvimento de novas tecnologias.

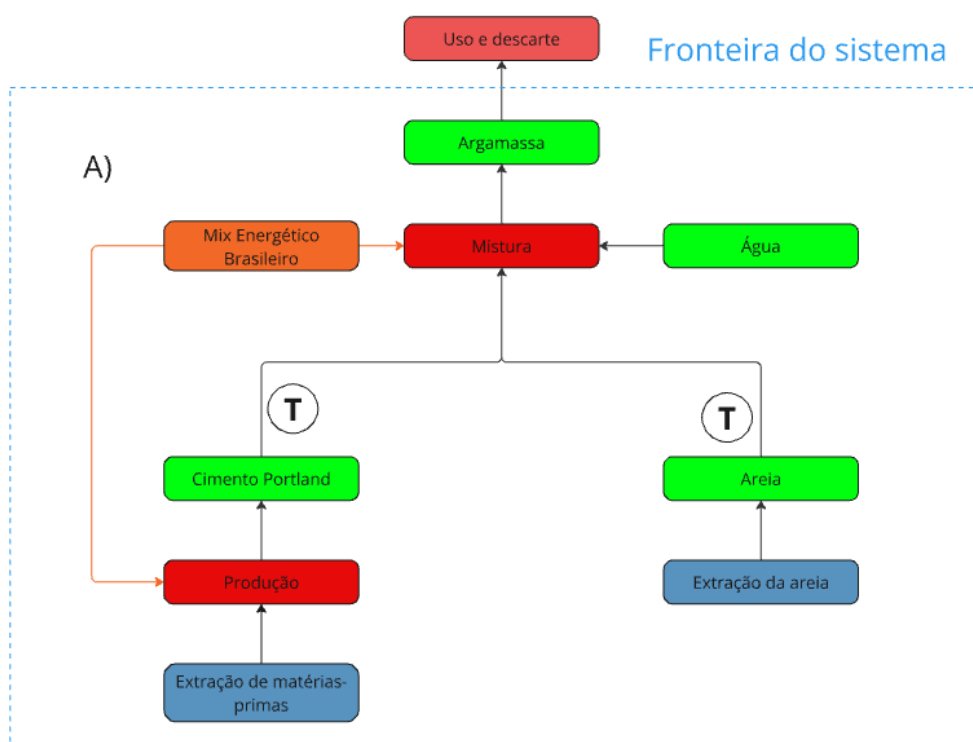
O escopo geográfico do estudo considera a utilização de dados e processos da realidade brasileira, através do banco de dados Ecoinvent (Frischknecht *et al.*, 2007). Nos casos em que não forem encontrados processos específicos para o Brasil, serão utilizados dados internacionais que se comparem aos métodos produtivos brasileiros.

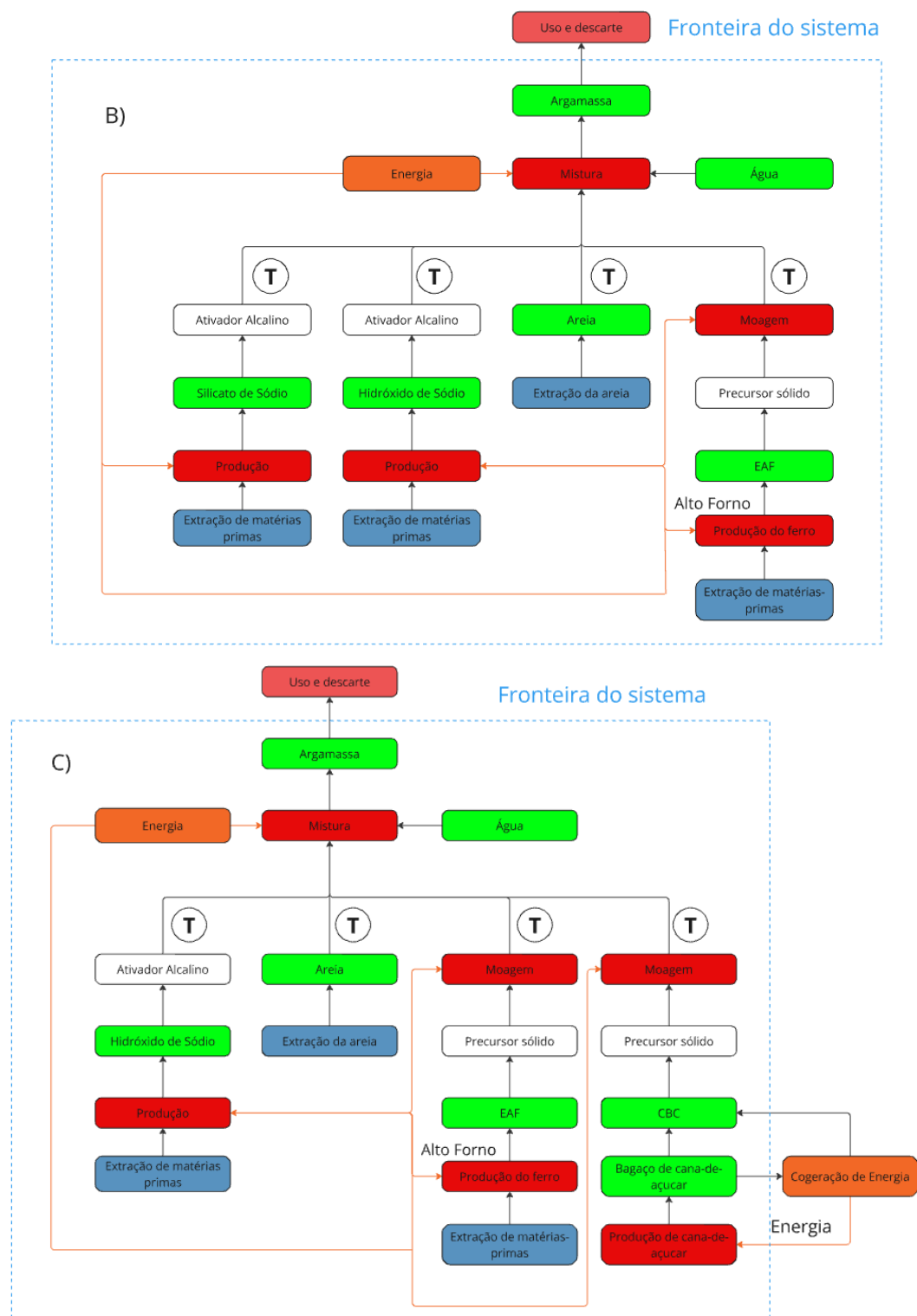
Já o escopo temporal será de 50 anos, já que é a vida útil mínima, determinada pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013), para elementos estruturais não manuteníveis, como

é o caso considerando que essas argamassas sejam empregadas com função estrutural.

Os sistemas estudados foram a produção de argamassa convencional, argamassa ativada alcalinamente com ativadores convencionais e argamassa ativada alcalinamente com ativador alternativo com CBC, levando em conta a obtenção e processamento das matérias-primas, o transporte e o processo de mistura dos componentes. Os sistemas e as fronteiras destes estão representados na Figura 2.

Figura 2 – Fronteira do sistema para: a) argamassa convencional; b) argamassa ativada alcalinamente com ativadores alcalinos comerciais; c) argamassa ativada alcalinamente com ativador alcalino alternativo.





Fonte: Próprio autor.

A EAF é um material amplamente aplicado como adição mineral ao cimento Portland, possuindo valor de mercado, conforme Passuello *et al.* (2017). Dessa forma, a mesma será considerada como um subproduto da manufatura do ferro-gusa, e não como um resíduo. Assim, será aplicada a alocação por massa para a EAF,

considerando uma taxa de sua manufatura de 300 kg para cada tonelada de ferrogusa obtida (CGEE, 2010).

A CBC, apesar de não apresentar uma demanda por posteriores usos como a EAF, também será tratada como subproduto, visando atender aos objetivos, os quais abrangem sua valorização. Dessa forma, serão atribuídos à CBC todos os impactos referentes ao bagaço da cana-de-açúcar. Como no estudo atual a queima é realizada sem o aproveitamento de energia, foi desconsiderado o processo de cogeração de energia, o qual ocorre por meio da queima do bagaço de cana-de-açúcar nas usinas. Além disso, mesmo se esse processo fosse considerado na fronteira, as emissões de CO₂ da queima são contrabalanceadas por sua absorção durante o cultivo da cana-de-açúcar por meio da fotossíntese, de acordo com Jagadesh, Ramachandramurthy e Murugesan (2018). Foram considerados também os processamentos fundamentais realizados na CBC para obtenção do desempenho necessário para ser utilizado nas argamassas, sendo esses o transporte até a central de mistura, a moagem do resíduo e o peneiramento.

As fases de uso e descarte foram desconsideradas do estudo. As etapas de uso e manutenção foram consideradas similares, visto a gama de aplicações para argamassas no contexto da construção civil (Passuello *et al.*, 2017). Já para o descarte, os materiais não inertes (ativadores comerciais) que são os principais diferenciais dos geopolímeros representam menos de 5% da massa dos produtos, e os impactos nessa etapa são bastante sensíveis a esse parâmetro (Sampaio *et al.*, 2022).

A argamassa convencional (ArgC1, daqui em diante) foi elaborada utilizando cimento, areia e água. A argamassa ativada alcalinamente com ativadores alcalinos comerciais (ArgG2, daqui em diante) foi elaborada utilizando EAF, NaOH, Na₂SiO₃, areia e água, e a argamassa ativada alcalinamente com ativador alcalino alternativo (ArgG3, daqui em diante) foi produzida com EAF, NaOH, CBC, areia e água, ambas considerando o processo laboratorial empregado por Pereira (2019).

A unidade funcional para este estudo será a produção de 1 m³ de argamassa, que pode ter diversas aplicações estruturais e não estruturais na construção civil. Segundo Cordeiro (2006), os ligantes desenvolvidos com aditivos minerais devem possuir desempenho mecânico suficiente para atender a mesma aplicabilidade técnica em projetos de engenharia. Na Tabela 1, estão listadas as resistências mecânicas das argamassas avaliadas.

Tabela 1 - Resistência das argamassas aos 28 dias de cura (MPa).

ArgC1	ArgG2	ArgG3
45 ± 2	63,2 ± 0,3	54,4 ± 0,4

Fonte: Adaptado de Pereira (2019)

Importante ressaltar que, mesmo para aplicações estruturais, de acordo com a NBR 6118 (2014), o valor mínimo de resistência seria de 20 MPa, bem abaixo de todas as argamassas analisadas.

O ReCiPe, método desenvolvido na Holanda, se apresenta como um dos métodos de maior representatividade de utilização atualmente, sendo um aperfeiçoamento dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2000 (Duan *et al.*, 2024). Portanto, a fase de avaliação do impacto do ciclo de vida utilizará o método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 (Huijbregts *et al.*, 2017). A avaliação será realizada para 10 categorias de impacto, de acordo com a revisão e estudos similares: alterações climáticas (CC); formação de partículas finas (PMF); formação de ozônio, ecossistemas terrestres (OF); acidificação terrestre (TA); eutrofização da água doce (FE); ecotoxicidade da água doce (FET); ecotoxicidade da água do mar (MET); uso do solo (LU); escassez de recursos fósseis (FRS); e escassez de recursos minerais (MRS). O software de ACV SimaPro v. 9.5.0.2 será utilizado para efetuar os cálculos de impacto (Pré Consultants, 2019). As bases de dados utilizadas foram CM.chemicals Essentials database e Ecoinvent versão 3.9.1.

3.2 Inventário do Ciclo de Vida

A fase de ICV é elaborada com a coleta dos dados que serão utilizados e os cálculos para quantificar as entradas e saídas de cada processo individual do sistema estudado, como fluxo de poluentes, materiais e recursos (ABNT, 2009a).

No Brasil, o sistema rodoviário é o mais utilizado para o transporte de produtos. Para os produtos industrializados (cimento, ativadores alcalinos e EAF) foi considerada uma distância de 300 km para cálculo dos impactos potenciais devido ao transporte. Para o agregado miúdo, foi considerada a distância de 70 km (distância aproximada dos municípios de Ilha Solteira-SP e Castilho-SP). Por fim, para a CBC

foi considerada a distância até a usina sucroalcooleira mais próxima, 150 km. O resumo está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Distâncias de transporte adotadas.

Material	Distância
Cimento	300
Areia	70
EAF	300
NaOH	300
Na ₂ O	300
SiO ₂	300
CBC	150

Fonte: Próprio autor

No trabalho de Pereira (2019), as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar foram produzidas para utilizá-las como adições minerais em matrizes a base de cimento Portland e matrizes ativadas alcalinamente. O bagaço de cana-de-açúcar passou por um processo de beneficiamento, de modo a tornar apto a ser utilizado na produção de pastas e argamassas, na forma de cinza, com um rendimento de 2,2% do total do bagaço de cana-de-açúcar, temperatura máxima de 570°C na queima e gasto energético de 0,415 kWh para produção de 5 kg de CBC (0,083 kWh/kg).

Para a produção das argamassas a autora utilizou uma argamassadeira e cura úmida, totalizam um consumo energético de 0,33 kWh por m³ de argamassa.

Considerando todos os processos citados, foi possível obter as quantidades para produzir 1 m³ de argamassa para cada opção avaliada, apresentados na Tabela 3. Importante ressaltar que todas as argamassas têm o parâmetro igual de agregado/aglomerante de 2,5, e que o silicato de sódio é incorporado numa solução, composta de 29,7% de SiO₂, 8,9% de Na₂O e 61,4% de H₂O em massa (PEREIRA, 2019).

Tabela 3 - Quantidade de materiais por m³ de argamassa.

Material	Unidade	ArgC1	ArgG2	ArgG3
Cimento	kg	693,33	-	-
Areia	kg	1733,33	1733,33	1733,33
Água	kg	346,66	312	312
EAF	kg	-	693,33	693,33
NaOH	kg	-	15,12	15,12
Na ₂ O	kg	-	26,96	-
SiO ₂	kg	-	89,98	-
CBC	kg	-	-	513,96

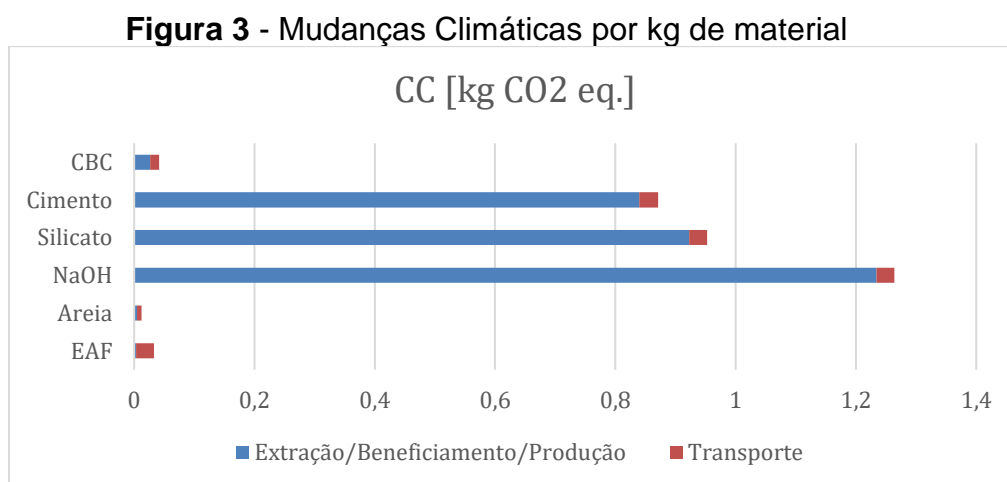
Fonte: Adaptado de Pereira (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

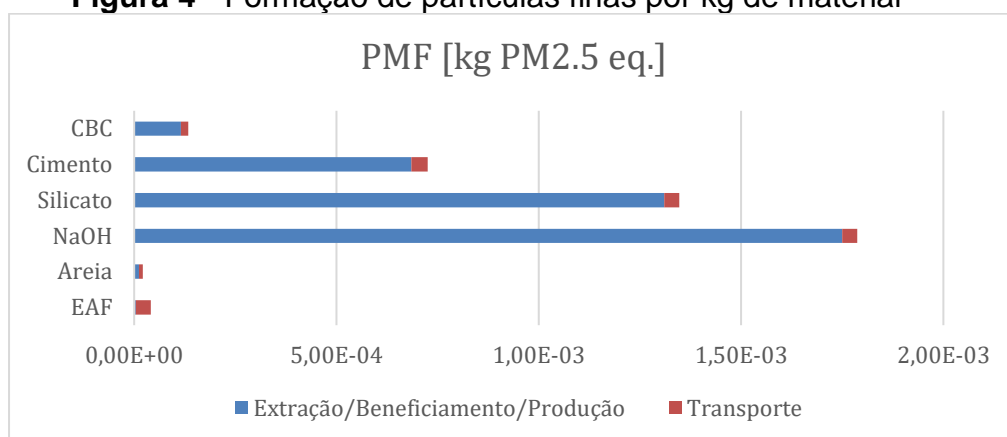
A AICV será realizada em duas etapas, utilizando o método ReCiPe. Primeiramente, serão avaliados os impactos ambientais de um quilograma de cada material utilizado para produzir as argamassas, verificando também a influência do transporte em cada um deles.

Em seguida, serão apresentados os impactos relativos à produção de 1m³ de cada argamassa, verificando a alternativa com maior contribuição e o processo com maior relevância dentro desta alternativa, para cada categoria de impacto.

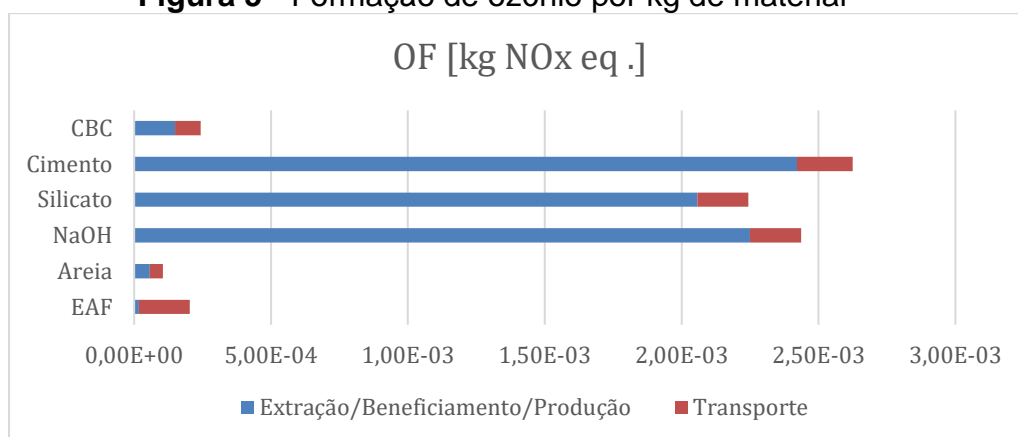
As Figuras 3 a 12 expressam graficamente os potenciais impactos para a produção de um quilograma de cada material utilizado na produção dos traços de concreto, incluindo os processos produtivos descritos no inventário e o transporte até a central de mistura para cada categoria de impacto analisada, permitindo comparar a magnitude dos impactos associados a produção e o transporte de um quilograma de cada material.



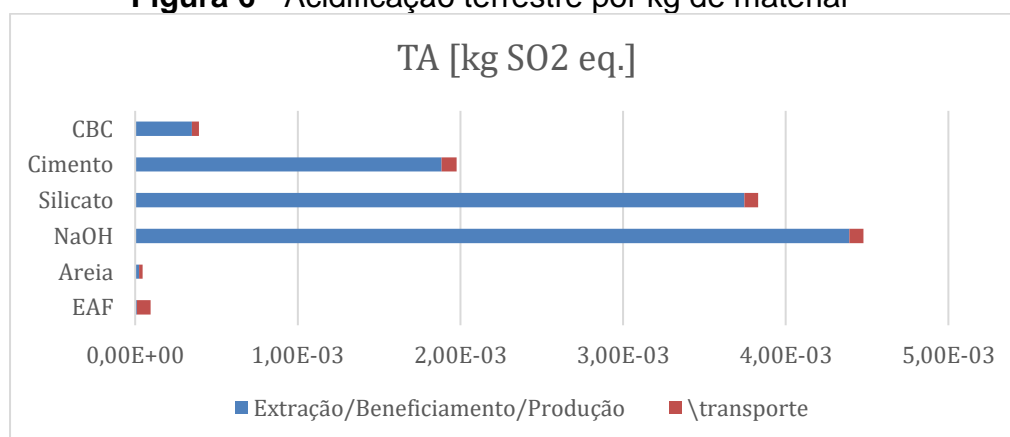
Fonte: Próprio autor.

Figura 4 - Formação de partículas finas por kg de material

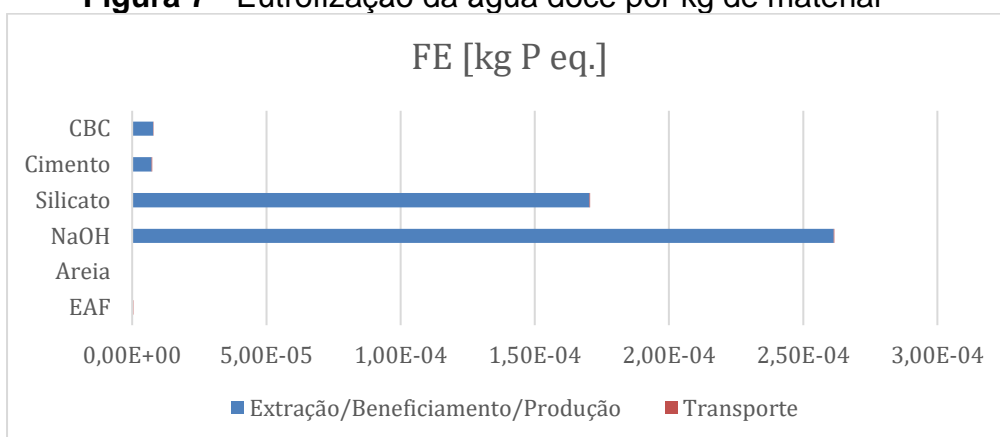
Fonte: Próprio autor.

Figura 5 - Formação de ozônio por kg de material

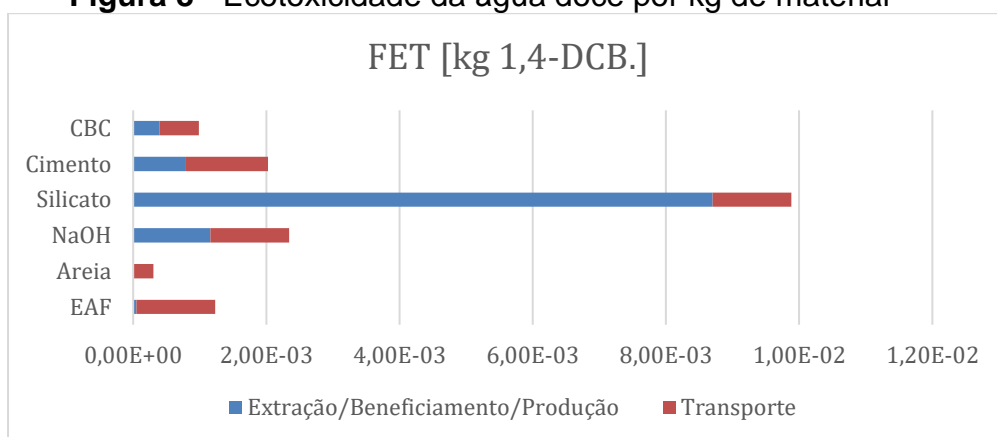
Fonte: Próprio autor.

Figura 6 - Acidificação terrestre por kg de material

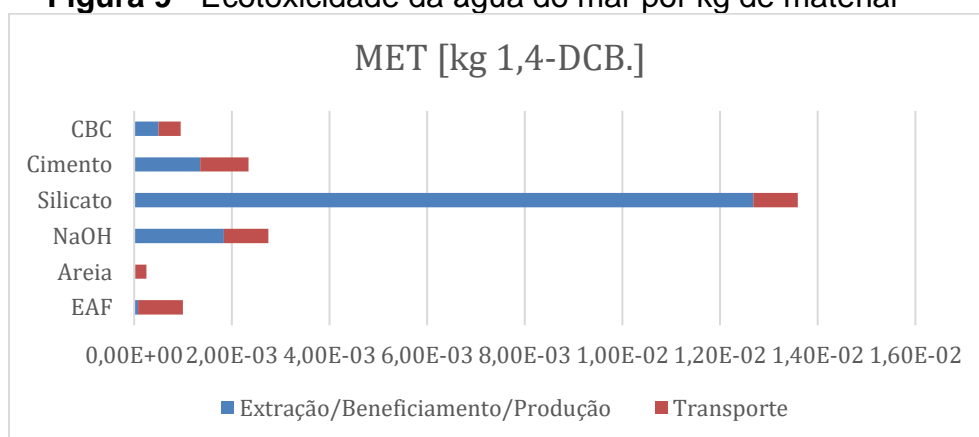
Fonte: Próprio autor.

Figura 7 - Eutrofização da água doce por kg de material

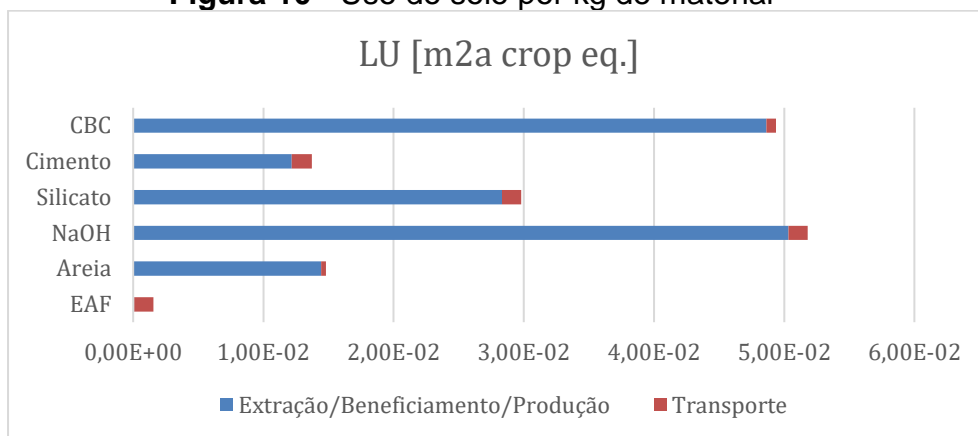
Fonte: Próprio autor.

Figura 8 - Ecotoxicidade da água doce por kg de material

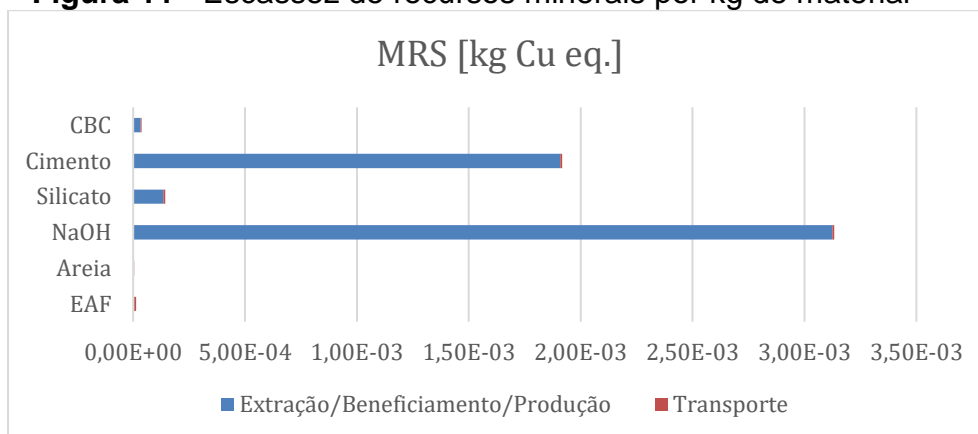
Fonte: Próprio autor.

Figura 9 - Ecotoxicidade da água do mar por kg de material

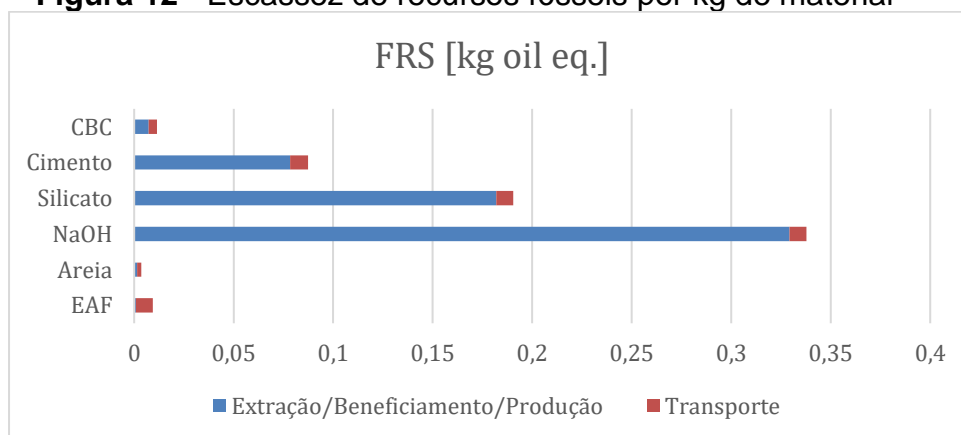
Fonte: Próprio autor.

Figura 10 - Uso do solo por kg de material

Fonte: Próprio autor.

Figura 11 - Escassez de recursos minerais por kg de material

Fonte: Próprio autor.

Figura 12 - Escassez de recursos fósseis por kg de material

Fonte: Próprio autor.

É possível observar que os dois ativadores alcalinos têm os maiores impactos em grande parte das categorias, seguidos de perto pelo cimento. O ligante convencional

tem impacto maior apenas na categoria de formação de ozônio. Esses materiais chegam a ter, em algumas categorias, impactos de até três ordens de grandeza acima dos demais materiais. Esse cenário era o esperado, já observado em outros estudos, nos quais o cimento seria o material com maiores impactos em compósitos convencionais, e os ativadores quando se utiliza aglomerantes ativados alcalinamente (Bajpai *et al.*, 2020; Habert; Lacaille; Roussel, 2011).

Outra observação relativa ao cimento e aos ativadores é que, mesmo adotando-se uma longa distância de transporte (300 km), a etapa de produção destes materiais é mais relevante, sendo responsável por mais de 80% dos impactos em quase todas as categorias analisadas. A exceção fica para as categorias de Ecotoxicidade da água do mar e da água doce, em que os impactos relativos ao transporte são os mais significativos. Isso se deve às substâncias emitidas pela queima dos combustíveis fósseis (Goedkoop *et al.*, 2009), já que o modal mais utilizado no Brasil é o rodoviário.

A areia e a EAF apresentaram os menores impactos em todas as categorias considerando apenas 1 kg de material, principalmente se for desconsiderado o transporte, que apresentou valores bem maiores que os impactos de produção desses insumos.

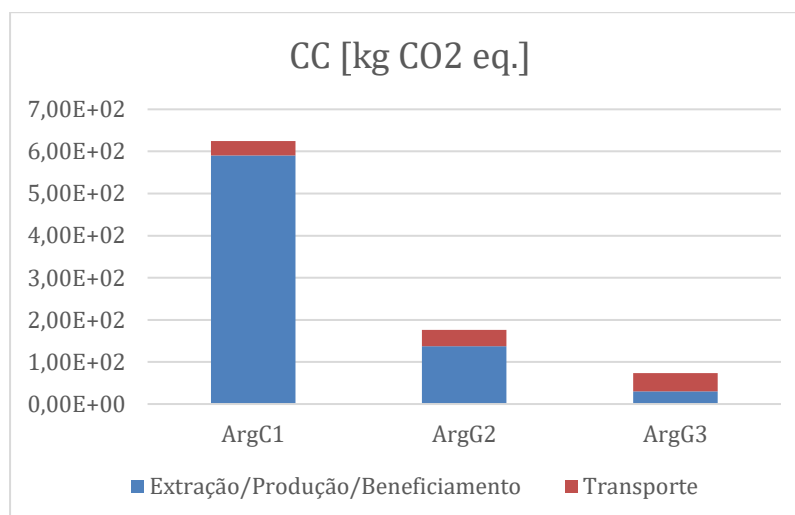
Por fim, a CBC teve um comportamento similar à EAF e a areia para 9 das 10 categorias analisadas. A exceção foi o Uso do solo, em que a CBC apresentou impactos praticamente iguais ao NaOH. Isso se deve ao uso intensivo do solo para plantar a matéria prima da CBC (Assunção, 2020).

Em seguida, na Tabela 4 e nas Figuras 13 a 22 é apresentada a comparação dos impactos gerados pela confecção de um metro cúbico de argamassa, verificando a alternativa que possui os maiores impactos em cada categoria analisada. Além disso, estão apresentados da Figura 23 a Figura 25 os impactos relativos a cada processo para cada categoria, possibilitando a identificação das etapas mais relevantes para os resultados da AICV.

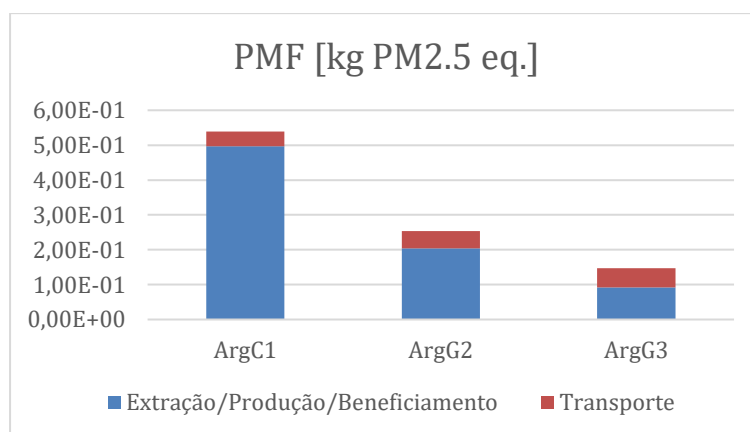
Tabela 4 - Impactos potenciais para cada argamassa analisada

Categoria	Unidade	ArgC1	ArgG2	ArgG3
Global warming	kg CO2 eq	6,25E+02	1,76E+02	7,35E+01
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	5,40E-01	2,53E-01	1,47E-01
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	2,00E+00	6,35E-01	4,80E-01
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	1,45E+00	6,66E-01	3,84E-01
Freshwater eutrophication	kg P eq	5,47E-03	2,45E-02	5,73E-03
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,93E+00	2,64E+00	1,92E+00
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,06E+00	2,85E+00	1,65E+00
Land use	m2a crop eq	3,52E+01	3,11E+01	5,26E+01
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	1,34E+00	8,35E-02	8,50E-02
Fossil resource scarcity	kg oil eq	6,65E+01	4,03E+01	2,14E+01

Fonte: Próprio autor.

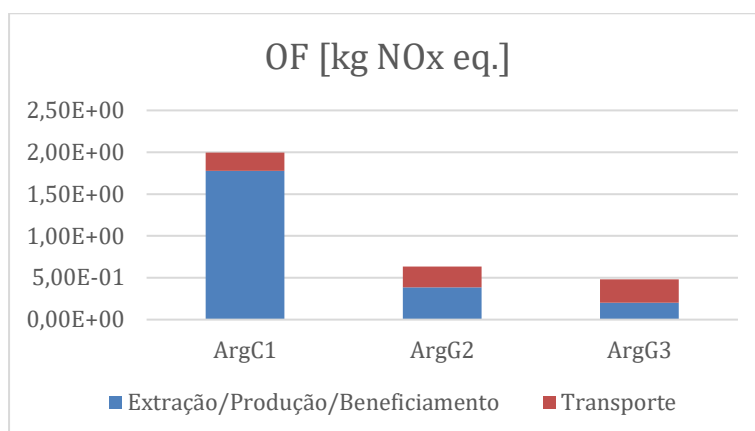
Figura 13 - Impactos potenciais das alternativas para Mudanças Climáticas

Fonte: Próprio autor.

Figura 14 - Impactos potenciais das alternativas para Formação de partículas finas

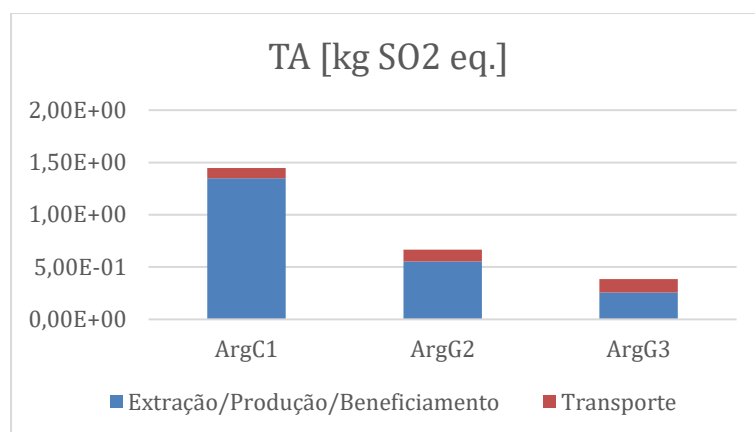
Fonte: Próprio autor.

Figura 15 - Impactos potenciais das alternativas para Formação de Ozônio, ecossistemas terrestres



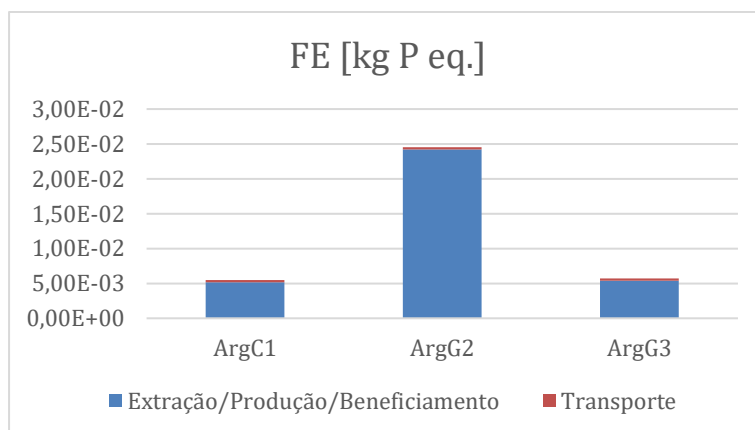
Fonte: Próprio autor.

Figura 16 - Impactos potenciais das alternativas para Acidificação Terrestre



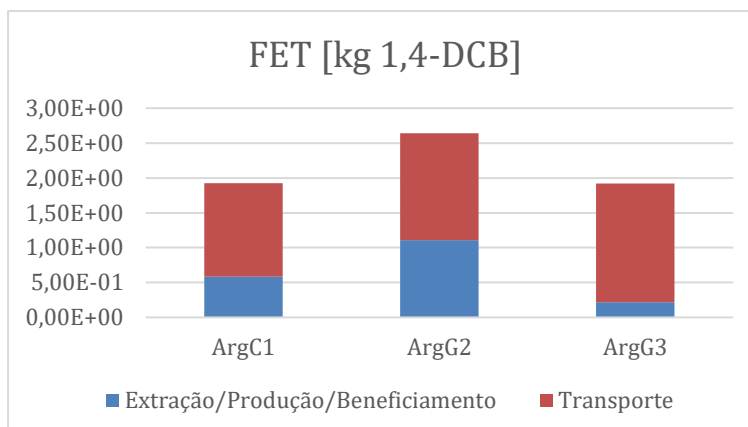
Fonte: Próprio autor.

Figura 17 - Impactos potenciais das alternativas para eutrofização da água doce



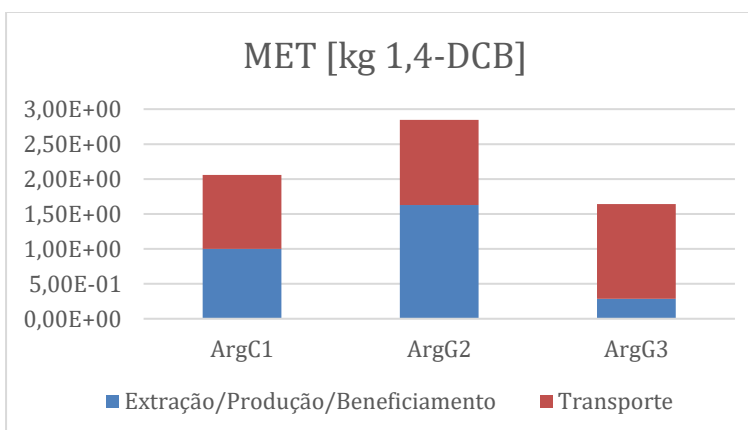
Fonte: Próprio autor.

Figura 18 - Impactos potenciais das alternativas para ecotoxicidade da água doce



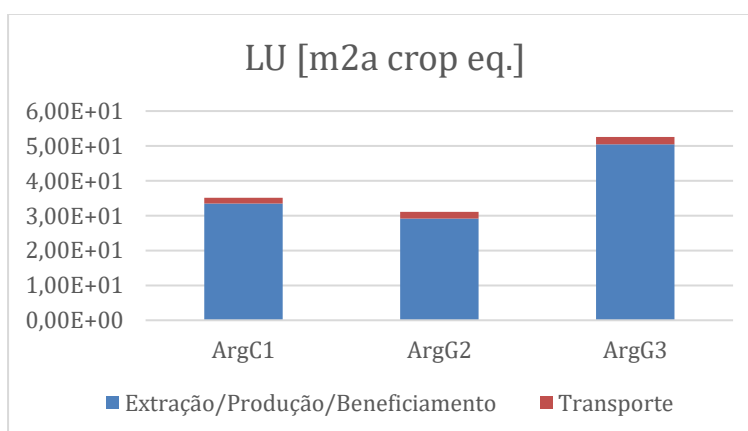
Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Impactos potenciais das alternativas para ecotoxicidade da água do mar

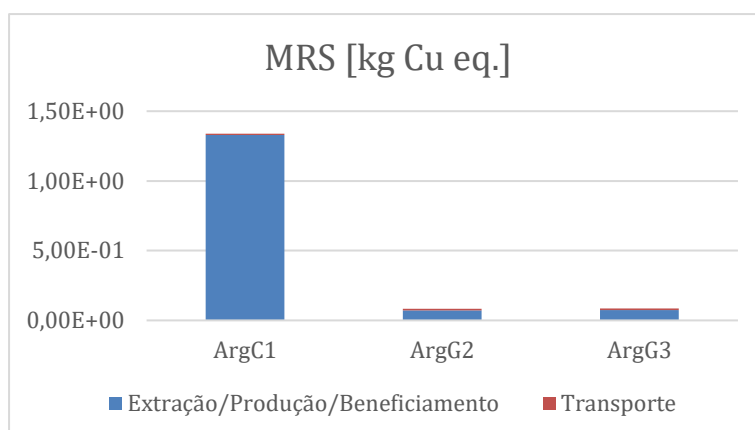


Fonte: Próprio autor.

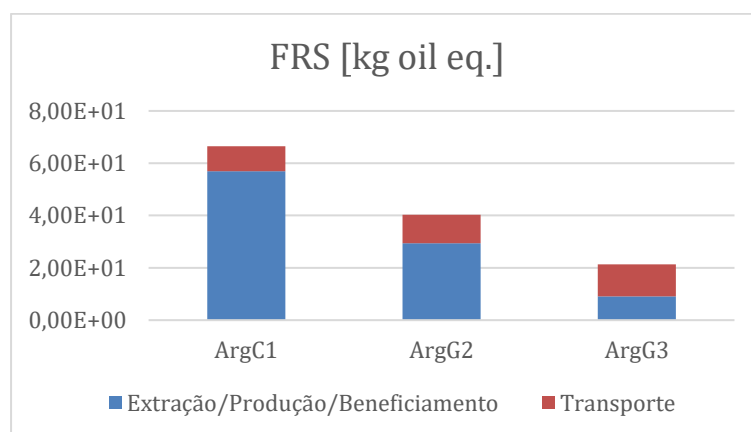
Figura 20 - Impactos potenciais das alternativas para o uso do solo



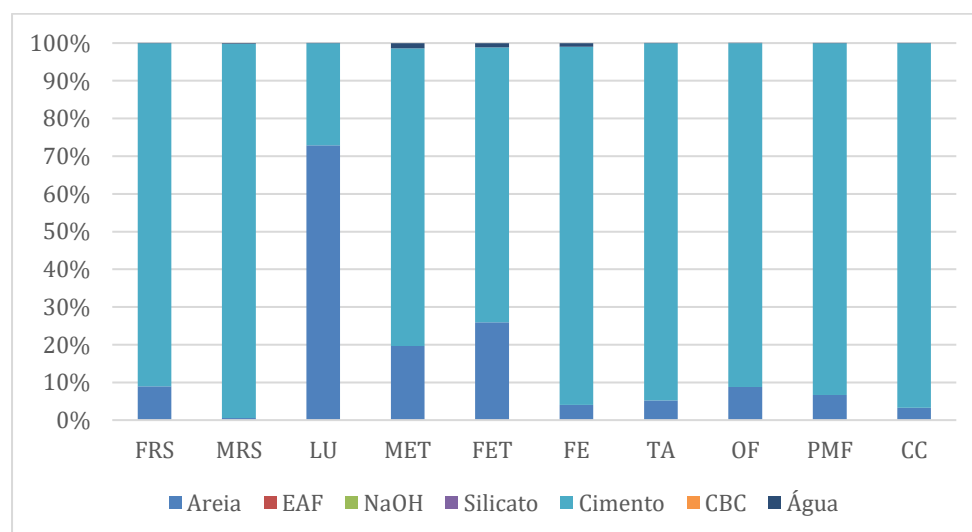
Fonte: Próprio autor.

Figura 21 - Impactos potenciais das alternativas para escassez de recursos minerais

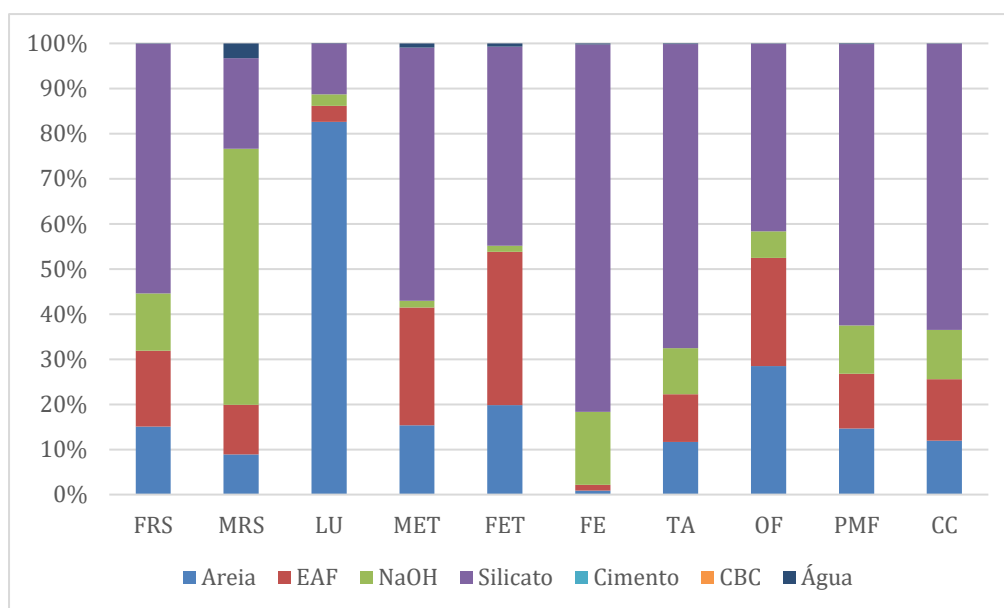
Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Impactos potenciais das alternativas para Escassez de recursos fósseis

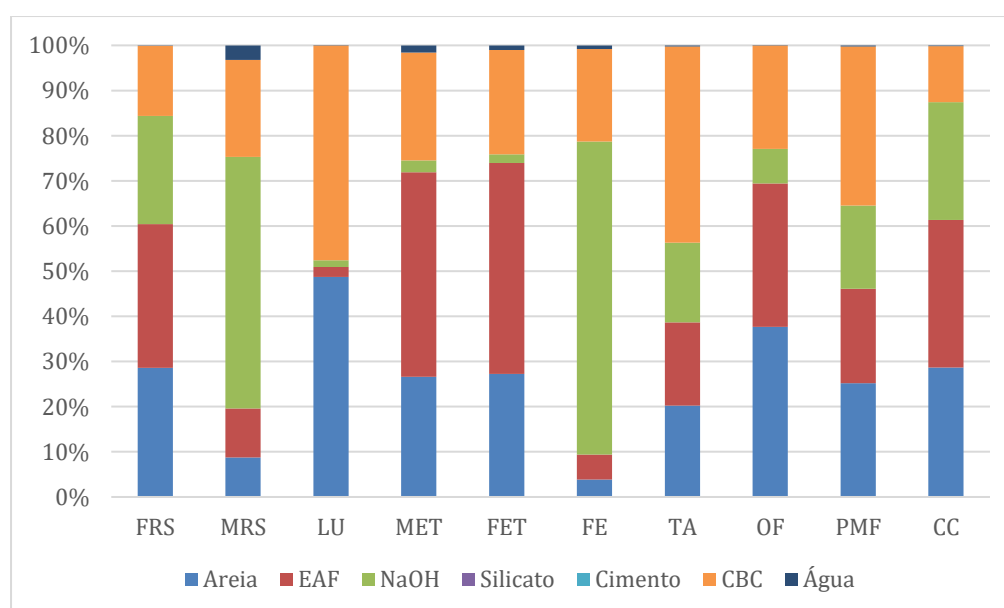
Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Contribuição de cada material para argamassa ARGC1

Fonte: Próprio autor.

Figura 24 – Contribuição de cada material para argamassa ARGG2

Fonte: Próprio autor.

Figura 25 – Contribuição de cada material para argamassa ARGG3

Fonte: Próprio autor.

É possível observar que, para 6 das 10 categorias analisadas, a argamassa convencional de cimento Portland apresentou os maiores impactos. A categoria mais frequente nos estudos é a Mudança Climática (ou Potencial de Aquecimento Global), medido em CO₂ equivalente. No resultado encontrado, as argamassas ArgG2 e ArgG3 tiveram impactos reduzidos em 72 e 88%, respectivamente. Em diversos estudos, é

constatado que a utilização de geopolímeros tem o potencial de reduzir as emissões de CO₂ dos ligantes (Mellado *et al.*, 2014; Passuello *et al.*, 2017; Robayo-Salazar; Mejía-Arcila; Mejía de Gutiérrez, 2017). Adicionalmente, comparando as AAA podemos observar uma queda maior no produto que utiliza CBC em substituição do silicato de sódio. Para essa categoria, como observado pelos impactos por kg, qualquer redução na quantidade de ativadores suplantada por algum tipo de resíduo tem grande potencial de redução dos impactos (Abdulkareem *et al.*, 2021; Ziegler *et al.*, 2016).

Esse cenário se repete nas categorias em que o cimento é o material mais impactante, ou fica pouco atrás dos ativadores (PMF, OF, TA, MRS e FRS), já que sua maior quantidade na mistura acaba elevando os impactos potenciais. Resultados similares foram identificados nos estudos de Bajpai (2020) e Caldas e Toledo Filho (2019).

Para as categorias FE, FET e MET, o cenário se altera, com a argamassa ArgG2 sendo a mais impactante. Essas categorias são afetadas pela emissão de nutrientes como fósforo e nitrogênio, além de substâncias tóxicas, relacionadas com a produção dos ativadores. Nesse ponto também encontramos similaridades com a literatura, já que diversos estudos que avaliam os impactos de forma mais ampla (além do CO₂) observam impactos maiores nas misturas geopoliméricas (Habert; Ouellet-Plamondon, 2016; Passuello *et al.*, 2017). Interessante observar também a relevância do transporte para as categorias FET e MET, chegando a ultrapassar os 50% de representatividade.

A argamassa ArgG3 foi a mais impactante na categoria de Uso do solo, pelos motivos já citados no tópico anterior, e pela contribuição da areia, que tem uma grande quantidade em massa nas misturas, sendo representativa.

Avaliando as Figuras 24 a 26, é possível verificar um comportamento bastante comum na literatura. As argamassas ArgC1 e ArgG2 tem predominância clara do cimento e ativadores, respectivamente. No entanto, ao substituir parcialmente o ativador comercial pela CBC, tem-se um perfil mais equilibrado entre os materiais (Abdulkareem *et al.*, 2021; Mejía-Arcila; Valencia-Saavedra; Mejía de Gutiérrez, 2020; Passuello *et al.*, 2017). A areia se destaca nas categorias LU e OF, a EAF aparece com relevância nas categorias FRS, MET, FET e CC (bastante relacionado ao transporte), o hidróxido de sódio tem predominância para FE e MRS, e a CBC fica em

evidência nas categorias LU, TA e PMF. Com isso, a ArgG3 apresenta redução em praticamente todas as categorias de impacto.

5 CONCLUSÕES

Com base nas informações coletadas na literatura, utilizando também a revisão sistemática, foi possível evidenciar a relevância e novidade do tema proposto, que concatena diversos tópicos em um único estudo: substituição de matérias primas convencionais em argamassas e concretos; utilização de AAA para produção de argamassas; e incorporação de resíduos agroindustriais em produtos da construção civil (com foco na substituição do ativador alcalino). Além disso, não foram encontrados trabalhos que avaliem os impactos ambientais de AAA com incorporação de CBC como fonte de silicato solúvel no ativador alcalino.

Diante do escopo proposto, das limitações, das suposições, e dos resultados obtidos, conclui-se que, para a situação analisada, a utilização da técnica de geopolimerização se apresentou viável do ponto de vista ambiental. O emprego de CBC em substituição de ativadores convencionais em argamassas geopoliméricas trouxe benefícios adicionais, além de atender de forma satisfatória os requisitos mecânicos e funcionais previstos nas normas brasileiras relacionadas à construção civil.

Assim como reportado na literatura, os principais responsáveis pelos potenciais de impacto foram o cimento (argamassa convencional) e os ativadores alcalinos (argamassas ativadas alcalinamente). Esse comportamento pode ser observado tanto na comparação dos impactos por quilograma de material, quanto pela análise dos impactos relativos de cada material para cada alternativa avaliada.

Na análise comparativa, a argamassa convencional se mostrou a mais impactante para 6 das 10 categorias de impacto avaliadas (CC, PMF, OF, TA, MRS e FRS). A argamassa ArgG2, produzida utilizando apenas ativadores comerciais teve os maiores impactos para as categorias FE, FET e MET, enquanto a argamassa ArgG3 se destacou na categoria LU. Esses resultados confirmam o potencial dos AAA no que tange o potencial ambiental, porém o estudo conseguiu demonstrar o que diversos estudos deixam como ressalva: a utilização de geopolímeros não traz somente benefícios, visto que para certas categorias são os principais responsáveis pelo impacto. A análise ambiental de produtos para a construção civil não pode se limitar a emissão de CO₂, com o risco de se negligenciar impactos relevantes.

Por fim, o transporte se mostrou pouco impactante no geral (tendo representatividade significativa apenas nas categorias FET e MET), mesmo

considerando o modal rodoviário e distâncias elevadas (de acordo com as características de nosso país).

5.1 Sugestões para futuros estudos

A presente pesquisa deve servir para apoiar futuros estudos que buscam contribuir para o desenvolvimento sustentável através da incorporação de resíduos em produtos da construção civil. Para isto, mostra-se necessário a utilização da ACV para a quantificação dos impactos potenciais dos novos produtos.

Para futuros estudos relacionados ao tema proposto, sugere-se um estudo mais aprofundado sobre os impactos de uso e descarte dos materiais, considerando também parâmetros de desempenho (MPa) e vida útil. Essa análise tem potencial de evidenciar benefícios não compreendidos no presente estudo, podendo até mudar a alternativa mais impactante em alguma categoria de impacto.

Importante destacar que a ampla utilização de AAA no cenário de construção civil no país teria amplas mudanças no âmbito industrial, já que somos bastante dependentes dos métodos convencionais de construção (estruturas de concreto armado com alvenaria de tijolos cerâmicos). Assim, poderia ser realizada uma análise consequencial, considerando um cenário no qual os AAA se tornam a prática corrente e modelando todas as consequências dessa alteração.

Outra possibilidade seria a realização de análise de sensibilidade com diversos parâmetros, como o método AICV utilizado, as distâncias adotadas e alterar procedimentos de alocação.

REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, M.; HAVUKAINEN, J.; NUORTILA-JOKINEN, J.; HORTTANAINEN, M. Environmental and economic perspective of waste-derived activators on alkali-activated mortars. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 280, p. 124651, 2021. Disponível em: Acesso em: 9 ago. 2024.
- ABICLOR. **A indústria de cloro-álcalis**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <http://www.abiclor.com.br/a-industria-de-cloro-alcalis>. Acesso em: 7 ago. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13281-2: 2023** - Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR 14040:2009** - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR 14044:2009** - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118:2014** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575-1:2013** 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16697:2018** - Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AHSAN, M. B.; HOSSAIN, Z. Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 178, p. 1–9, 2018. Disponível em: Acesso em: 20 ago. 2020.
- AÏTCIN, P.-C.; MINDESS, S. **Sustainability of Concrete**. 1. ed. Abingdon: [s. n.], 2017. 2017.
- ANDRADE NETO, J. da S.; DE FRANÇA, M. J. S.; AMORIM JÚNIOR, N. S. de; RIBEIRO, D. V. Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 266, p. 120959, 2021. Disponível em: Acesso em: 6 ago. 2023.
- ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 1675–1710, 2019. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/11/1675/2019/>. Acesso em: 11 out. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama 2022 – Abrelpe**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

ASSUNÇÃO, C. C. **Avaliação do ciclo de vida de argamassas com substituição parcial de cimento portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 2020. 99 f. - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/192169>. Acesso em: 15 out. 2020.

AZEVEDO, J. L. A Economia Circular Aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 2015, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2015.

BAJPAI, R.; CHOUDHARY, K.; SRIVASTAVA, A.; SANGWAN, K. S.; SINGH, M. Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 254, p. 120147, 2020. Disponível em: Acesso em: 15 out. 2020.

BELTRAME, N. A. M.; ANGULSKI DA LUZ, C.; PERARDT, M.; HOOTON, R. D. Alkali activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal: Resistance to attack by sodium and magnesium sulfates. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 238, p. 117710, 2020. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

BERNAL, S. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; MEJIA DE GUTIÉRREZ, R.; PROVIS, J. L.; DELVASTO, S. Activation of metakaolin/slag blends using alkaline solutions based on chemically modified silica fume and rice husk ash. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 99–108, 2012. Disponível em: <https://link-springer-com.ez87.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s12649-011-9093-3>. Acesso em: 27 out. 2020.

CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para o bloco de concreto e diferentes argamassas. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 34–61, 2019. Disponível em: <http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/4143>. Acesso em: 10 fev. 2021.

CASTALDELLI, V. N.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials. **Materials**, [s. l.], v. 6, n. 8, p. 3108–3127, 2013. Disponível em: </pmc/articles/PMC5521237/?report=abstract>. Acesso em: 15 out. 2020.

CGEE. **Siderurgia no Brasil 2010-2025**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Siderurgia_no_Brasil__9567.pdf/893da7ee-8608-4251-adc1-10c2bf95b009?version=1.0. Acesso em: 6 ago. 2023.

CHI, M. Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. **Construction and**

Building Materials, [s. l.], v. 35, p. 240–245, 2012. Disponível em: Acesso em: 7 nov. 2020.

CONCEIÇÃO, L. C. S. **Avaliação de parâmetros físico-químicos na produção de geopolímeros constituídos por vidro vulcânico e silicato de sódio alternativo**. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo 2019.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2006.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. **Heliyon**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. e02566, 2019. Disponível em: Acesso em: 14 out. 2020.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 97, p. 41–49, 2017. Disponível em: Acesso em: 6 ago. 2023.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, [s. l.], v. 84, n. 16, p. 2048–2054, 2005. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

CRISTELO, N.; COELHO, J.; MIRANDA, T.; PALOMO, Á.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali activated composites – An innovative concept using iron and steel slag as both precursor and aggregate. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 103, p. 11–21, 2019. Disponível em: Acesso em: 6 ago. 2023.

DAVIDOVITS, J. Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. *In*: PACTEC '79 SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS, 1979, Costa Mesa. **Anais** [...]. Costa Mesa: [s. n.], 1979. p. 151–154.

DOSSCHE, C.; BOEL, V.; DE CORTE, W. Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 171, p. 302–311, 2017.

DUAN, Y.; GUO, F.; GARDY, J.; XU, G.; LI, X.; JIANG, X. The life cycle assessment of polysilicon photovoltaic modules with green recycling based on ReCiPe method. **Renewable Energy**, [s. l.], p. 121407, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148124014757>. Acesso em: 20 set. 2024.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete”. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 12, p. 1590–1597, 2007. Disponível em: Acesso em: 12 out. 2020.

ELEUTÉRIO, R. V.; SIMÃO, L.; LEMES, P.; HOTZA, D. Evaluation of As-Received Green Liquor Dregs and Biomass Ash Residues from a Pulp and Paper Industry as Raw Materials for Geopolymers. **Minerals** 2023, Vol. 13, Page 1158, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 1158, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/13/9/1158/htm>. Acesso em: 9 ago. 2024.

FADINI NATALLI, J.; CHRISTO SILVEIRA THOMAZ, E.; CASTRO MENDES, J.; ANDRÉ FIOROTTI PEIXOTO, R.; NATALLI, J. F.; S THOMAZ, E. C.; MENDES, J. C.; F PEIXOTO, R. A. A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. e14603, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/JRSsh8ySggyJXQHh7Zb9Gwz/>. Acesso em: 6 ago. 2023.

FAOSTAT. **Data**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 3 maio 2020.

FAZZAN, J. V. **Avaliação da reatividade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concretos por meio do fator k de eficácia cimentante**. 2017. 306 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/151394>. Acesso em: 15 out. 2020.

FERNANDES FILHO, P. **Utilização da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar na produção de materiais cimentícios alcalinamente ativados**. 2012. 217 f. - Universidade Federal da Paraíba, [s. l.], 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13980>. Acesso em: 15 out. 2020.

FERREIRA, M. J. **Obtenção de silicato de sódio por lixívia alcalina a partir da cinza da casca de arroz (cinza da casca de arroz) para uso como defloculante**. 2013. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2013.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 282–288, 2007. Disponível em: Acesso em: 20 ago. 2020.

FONT, Alba; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; MELLADO, A.; PAYÁ, J. New eco-cellular concretes: sustainable and energy-efficient materials. **Green Chemistry**, [s. l.], v. 20, n. 20, p. 4684–4694, 2018. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/gc/c8gc02066c>. Acesso em: 9 ago. 2024.

FONT, A.; SORIANO, L.; REIG, L.; TASHIMA, M. M.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Use of residual diatomaceous earth as a silica source in geopolymer production. **Materials Letters**, [s. l.], v. 223, p. 10–13, 2018. Disponível em: Acesso em: 9 ago. 2024.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.-J.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; HISCHIER, R.; HELLWEG, S.; HUMBERT, S.; KÖLLNER, T.;

LOERINCIK, Y.; MARGNI, M.; NEMECEK, T. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.** [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em:

https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf. Acesso em: 3 jul. 2019.

GARCIA-HERRERO, I.; MARGALLO, M.; ONANDÍA, R.; ALDACO, R.; IRABIEN, A. Life Cycle Assessment model for the chlor-alkali process: A comprehensive review of resources and available technologies. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 12, p. 44–58, 2017. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

GCCA. **Concrete Future.** [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em:

<https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2022/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW-2022.pdf>. Acesso em: 9 maio 2023.

GCCA. **GNR 2020.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em:

<https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>. Acesso em: 31 dez. 2022.

GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 162, p. 1407–1417, 2017. Disponível em: Acesso em: 6 ago. 2023.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2008 Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM).** [S. l.: s. n.], 2009.

GRAVINA, R. J.; XIE, T. Toward the development of sustainable concrete with Crumb Rubber: Design-oriented Models, Life-Cycle-Assessment and a site application. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 315, p. 125565, 2022. Disponível em: Acesso em: 20 ago. 2022.

GUINÉE, J. Handbook on life cycle assessment - Operational guide to the ISO standards. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 255, 2001.

HABERT, G.; LACAILLERIE, J. B. D. De; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 19, n. 11, p. 1229–1238, 2011. Disponível em: Acesso em: 15 out. 2020.

HABERT, G.; OUELLET-PLAMONDON, C. Recent update on the environmental impact of geopolymers. **RILEM Technical Letters**, [s. l.], v. 1, p. 17, 2016. Disponível em: <http://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/6>.

HASHEMINEZHAD, A.; KING, D.; CEYLAN, H.; KIM, S. Comparative life cycle assessment of natural and recycled aggregate concrete: A review. **Science of The**

Total Environment, [s. l.], v. 950, p. 175310, 2024. Disponível em: Acesso em: 20 set. 2024.

HOSSAIN, M. M.; KARIM, M. R.; HOSSAIN, M. K.; ISLAM, M. N.; ZAIN, M. F. M. **Durability of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: a review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2015. Disponível em: Acesso em: 6 out. 2020.

HUANG, W.; HUANG, X.; XING, Q.; ZHOU, Z. Strength reduction factor of crumb rubber as fine aggregate replacement in concrete. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], p. 101346, 2020. Disponível em: Acesso em: 20 ago. 2020.

HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; VAN ZELM, R. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 138–147, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1246-y>. Acesso em: 23 nov. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Contas Nacionais Trimestrais**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1846>. Acesso em: 21 mar. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA - IBICT. **Avaliação do Ciclo de Vida**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <http://acv.ibict.br/>. Acesso em: 29 mar. 2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2023.

IRP. **Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook>. Acesso em: 6 ago. 2023.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. [S. l.]: Ibracon, 2007. 2007.

ISO. **TC 71 Strategic Business Plan**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.iso.org/committee/49898.html>. Acesso em: 16 jan. 2021.

JAGADESH, P.; RAMACHANDRAMURTHY, A.; MURUGESAN, R. Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 176, p. 608–617, 2018. Disponível em: Acesso em: 15 out. 2020.

KONIORCZYK, M.; BEDNARSKA, D.; OMRANI, I. A. N.; WIECZOREK, A.; GONG, F. On water freezing in slag-blended cementitious materials at early ages. **Journal of**

Building Engineering, [s. l.], v. 92, p. 109778, 2024. Disponível em: Acesso em: 9 ago. 2024.

LEE, H.; CHOI, M. K.; KIM, B. J. Structural and functional properties of fiber reinforced concrete composites for construction applications. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s. l.], v. 125, p. 38–49, 2023. Disponível em: Acesso em: 9 jul. 2023.

LIMA FILHO, O. F. de. **História e uso do silicato de sódio na agricultura**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2009. 2009.v. 1.

LIMA, L.; TRINDADE, E.; ALENCAR, L.; ALENCAR, M.; SILVA, L. Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 289, p. 125730, 2021. Disponível em: Acesso em: 6 jul. 2024.

LIU, J.; FAN, X.; LI, Z.; ZHANG, W.; JIN, H.; XING, F.; TANG, L. Novel recycling application of high volume municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA) into sustainable concrete. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 838, p. 156124, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722032211>. Acesso em: 28 maio 2022.

LIVI, C. N. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio**. 2013. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2013.

MADLOOL, N. A.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S.; RAHIM, N. A. **A critical review on energy use and savings in the cement industries**. [S. l.]: Pergamon, 2011. Disponível em: Acesso em: 11 out. 2020.

MARCELINO-SADABA, S.; KINUTHIA, J.; OTI, J.; SECO MENESES, A. Challenges in Life Cycle Assessment (LCA) of stabilised clay-based construction materials. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 144, p. 121–130, 2017. Disponível em: Acesso em: 21 ago. 2020.

MATHEU, P. S.; ELLIS, K.; VARELA, B. Comparing the Environmental Impacts of Alkali Activated Mortar and Traditional Portland Cement Mortar using Life Cycle Assessment. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 96, p. 012080, 2015. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/96/1/012080>.

MCLELLAN, B. C.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G. D. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 19, n. 9–10, p. 1080–1090, 2011. Disponível em: Acesso em: 11 out. 2020.

MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 365–385, 2018. Disponível em: Acesso em: 21 ago. 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Propriedades e materiais. **IBRACON**, [s. l.], p. 782, 2014.

MEJÍA-ARCILA, J.; VALENCIA-SAAVEDRA, W.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Eco-efficient alkaline activated binders for manufacturing blocks and pedestrian pavers with low carbon footprint: Mechanical properties and LCA assessment. **Materiales de Construcción**, [s. l.], v. 70, n. 340, p. e232–e232, 2020. Disponível em: <https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/2304/3084>. Acesso em: 9 ago. 2024.

MELLADO, A.; CATALÁN, C.; BOUZÓN, N.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J. M.; PAYÁ, J. Carbon footprint of geopolymic mortar: Study of the contribution of the alkaline activating solution and assessment of an alternative route. **RSC Advances**, [s. l.], v. 4, n. 45, p. 23846–23852, 2014. Disponível em: www.rsc.org/advances. Acesso em: 15 out. 2020.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; VIEIRA, C. M. F.; CARVALHO, J. M. F.; RIBEIRO, J. C. L.; ALBUINI-OLIVEIRA, N. M.; ANDRADE, I. K. R. Evaluation of eco-efficient geopolymer using chamotte and waste glass-based alkaline solutions. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 16, p. e00847, 2022. Disponível em: Acesso em: 9 ago. 2024.

MORAES, J. C. B. de; TASHIMA, M. M.; MELGES, J. L. P.; AKASAKI, J. L.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J. Optimum Use of Sugar Cane Straw Ash in Alkali-Activated Binders Based on Blast Furnace Slag. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 04018084, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002261>. Acesso em: 8 nov. 2020.

NAKIC, D. Environmental evaluation of concrete with sewage sludge ash based on LCA. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 16, p. 193–201, 2018.

NOVA CANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso em: 14 out. 2020.

NUNES LOPES, C. de M.; MENDES, V. F.; GARCIA, D. R.; MENDES, J. C. Residues in cement-based composites: Occurrence mapping in Brazil. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 18, p. e01763, 2023. Disponível em: Acesso em: 17 jul. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 10 out. 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **The 17 Goals**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 3 jan. 2023.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 22, n. 7, p. 1305–1314, 2008a. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 22, n. 7, p. 1315–1322, 2008b. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

PASSUELLO, A.; RODRÍGUEZ, E. D.; HIRT, E.; LONGHI, M.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; KIRCHHEIM, A. P. Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 166, p. 680–689, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617317225>. Acesso em: 9 maio 2023.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; AKASAKI, J. L.; TASHIMA, M. M. New inorganic binders containing ashes from agricultural wastes. *In: SUSTAINABLE AND NONCONVENTIONAL CONSTRUCTION MATERIALS USING INORGANIC BONDED FIBER COMPOSITES*, 2017, [S. l.]. **Anais [...]**. [S. l.]: Elsevier Inc., 2017. p. 127-164. Disponível em: Acesso em: 14 out. 2020.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L. Bagasse ash. *In: WASTE AND SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS IN CONCRETE: CHARACTERISATION, PROPERTIES AND APPLICATIONS*, 2018, [S. l.]. **Anais**. [S. l.]: Elsevier, 2018. p. 559–598. Disponível em: Acesso em: 14 out. 2020.

PDET. **Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) 2021**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <http://pdet.mte.gov.br/>. Acesso em: 21 mar. 2020.

PEREIRA, A. M. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. 2014. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

PEREIRA, A. M. **Avaliação do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de aglomerantes ativados alcalinamente**. 2019. 170 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

PEREIRA, A.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceramics International**, [s. l.], v. 41, n. 10, p. 13012–13024, 2015. Disponível em: Acesso em: 8 nov. 2020.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro 8.5.0.0**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://pre-sustainability.com/>. Acesso em: 23 nov. 2020.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 114, p. 40–48, 2018. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

PUERTAS, F.; TORRES-CARRASCO, M. Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 57, p. 95–104, 2014. Disponível em: Acesso em: 27 out. 2020.

RABELLO, M. B. **Proposta de um plano de gerenciamento de resíduos químicos para o laboratório de controle de qualidade de uma indústria produtora de silicato de sódio**. 2014. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma 2014.

RAHEEM, A. A.; IKOTUN, B. D. **Incorporation of agricultural residues as partial substitution for cement in concrete and mortar – A review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020. Disponível em: Acesso em: 21 ago. 2020.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; MEJÍA-ARCILA, J. M.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Eco-efficient alkali-activated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 166, p. 242–252, 2017. Disponível em: Acesso em: 8 nov. 2020.

ROBAYO-SALAZAR, R.; MEJÍA-ARCILA, J.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; MARTÍNEZ, E. Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 176, p. 103–111, 2018. Disponível em: Acesso em: 21 ago. 2020.

ROYCHAND, R.; GRAVINA, R. J.; ZHUGE, Y.; MA, X.; YOUSSEF, O.; MILLS, J. E. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 237, p. 117651, 2020. Disponível em: Acesso em: 20 ago. 2020.

SAMPAIO, D. O. A.; TASHIMA, M. M.; COSTA, D.; QUINTEIRO, P.; DIAS, A. C.; AKASAKI, J. L. Evaluation of the environmental performance of rice husk ash and tire rubber residues incorporated in concrete slabs. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 357, p. 129332, 2022. Disponível em: Acesso em: 3 abr. 2023.

SANGMESH, B.; PATIL, N.; JAISWAL, K. K.; GOWRISHANKAR, T. P.; SELVAKUMAR, K. K.; JYOTHI, M. S.; JYOTHILAKSHMI, R.; KUMAR, S. Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 368, p. 130457, 2023. Disponível em: Acesso em: 6 ago. 2023.

SANI, N. A. M.; MAN, Z.; SHAMSUDDIN, R. M.; AZIZLI, K. A.; SHAARI, K. Z. K. Determination of Excess Sodium Hydroxide in Geopolymer by Volumetric Analysis. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 148, p. 298–301, 2016. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

SCHUH, A. B.; SILVA, M. L. da; VIEIRA, K. M.; CORONEL, D. A. Estrutura de Capital do Setor de Construção Civil Brasileiro e sua Relação com a Atividade Econômica Agregada. **Gestão & Planejamento**, [s. l.], v. 18, n. 109, p. 273–290, 2017.

SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 16, n. 15, p. 1699–1710, 2008. Disponível em: Acesso em: 6 jul. 2024.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

SILVA, I. M. C. B. da. Hidróxido de Sódio (CAS No. 1310-73-2). **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 73–82, 2012.

SILVA, J. P. P. **Mecanismo de ação do silicato de sódio como depressor em flotação**. 2011. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife 2011.

SNIC. **Resultados Preliminares de Junho 2023**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=86>. Acesso em: 15 jul. 2023.

SÖĞÜT, Z.; OKTAY, Z.; KARAKOÇ, H. Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 8–9, p. 817–825, 2010. Disponível em: Acesso em: 11 out. 2020.

SPÓSITO, C. C. A.; FAZZAN, J. V.; ROSSIGNOLO, J. A.; BUENO, C.; SPÓSITO, F. A.; AKASAKI, J. L.; TASHIMA, M. M. Ecodesign: Approaches for sugarcane bagasse ash mortars a Brazilian context. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 385, p. 135667, 2023. Disponível em: Acesso em: 3 abr. 2023.

TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; BERNABEU, J. P.; SOUSA, L. C.; MELGES, J. L. P. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 151–163, 2012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212012000200010&lng=pt&tlng=pt.

TIPPAYASAM, C.; KEAWPAPASSON, P.; THAVORNITI, P.; PANYATHANMAPORN, T.; LEONELLI, C.; CHAYSUWAN, D. Effect of Thai Kaolin on properties of agricultural ash blended geopolymers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 53, p. 455–459, 2014. Disponível em: Acesso em: 8 nov. 2020.

TONG, K. T.; VINAI, R.; SOUTSOS, M. N. Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 201, p. 272–286, 2018. Disponível em: Acesso em: 9 ago. 2024.

UNEP. **2022 Global Status Report for Buildings and Construction**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 6 ago. 2023.

UNICA. **UNICA Data**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=4>. Acesso em: 6 ago. 2023.

VAN DEVENTER, J.; PROVIS, J.; DUXSON, P.; BRICE, D. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 145–155, 2010.

VINAI, R.; NTIMUGURA, F.; CUTBILL, W.; EVANS, R.; ZHAO, Y. Bio-derived sodium silicate for the manufacture of alkali-activated binders: Use of bamboo leaf ash as silicate source. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 1235–1248, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ijac.14004>. Acesso em: 9 ago. 2024.

WANG, S. D.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 1033–1043, 1994. Disponível em: Acesso em: 7 ago. 2023.

WBCSD, I. E. A. Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. **World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency**, [s. l.], 2009.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **June 2023 crude steel production**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/june-2023-crude-steel-production/>. Acesso em: 6 ago. 2023.

XING, W.; TAM, V. W.; LE, K. N.; HAO, J. L.; WANG, J. Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 317, p. 125950, 2022. Disponível em: Acesso em: 20 set. 2024.

ZAKKA, W. P.; LIM, N. H. A. S.; KHUN, M. C. A scientometric review of geopolymer concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 280, p. 124353, 2020. Disponível em: Acesso em: 15 out. 2020.

ZIEGLER, D.; FORMIA, A.; TULLIANI, J. M.; PALMERO, P. Environmentally-Friendly Dense and Porous Geopolymers Using Fly Ash and Rice Husk Ash as Raw Materials. **Materials**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 466, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/6/466/htm>. Acesso em: 9 ago. 2024.