

Valorização de resíduos como matéria prima na síntese de geopolímeros aplicáveis à construção civil

Valorization of waste as raw material in geopolymers synthesis for applications in civil construction

Izabelly Thaynara Miranda Lage 
Juliana Petermann Moretti 

Resumo

O cimento é largamente utilizado na construção civil. No entanto, a crescente produção desse material traz impactos ambientais significativos, como o alto consumo de energia e, principalmente, as elevadas emissões de CO₂. Nos últimos anos, pesquisas vêm sendo realizadas para encontrar materiais mais ecoeficientes, e uma das alternativas promissoras à substituição do cimento é o uso de geopolímeros. Esses materiais são aluminossilicatos ativados por soluções alcalinas, que podem apresentar propriedades mecânicas e durabilidade adequadas para a aplicação na construção civil. Na síntese de geopolímeros, podem ser utilizados subprodutos e resíduos industriais/agrícolas que sejam ricos em aluminossilicatos como matéria-prima. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo principal identificar os tipos de resíduos utilizados como precursores na síntese de geopolímeros aplicáveis à construção civil. Para tanto, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, na qual foram levantadas as seguintes informações: atividade de origem do resíduo (industrial, urbana e agrícola), composição química e granulometria. Também foram discutidos os principais fatores de síntese (tipos de ativadores, concentração da solução de NaOH, relação Na₂SiO₃/NaOH, tipo de cura, método de síntese) e suas influências nas propriedades mecânicas, na microestrutura e na durabilidade dos geopolímeros feitos a partir de material residual.

Palavras-Chave: Geopolímeros. Materiais residuais. Construção Civil.

Abstract

Cement is widely used in civil construction. However, the increasing production of this material brings significant environmental impacts, such as high energy consumption and, most notably, elevated CO₂ emissions. In recent years, research has been conducted to find more eco-efficient materials, and one of the promising alternatives to replacing cement is the use of geopolymers. These materials are aluminosilicates activated by alkaline solutions, which can exhibit suitable mechanical properties and durability for application in civil construction. In the synthesis of geopolymers, by-products and industrial/agricultural waste rich in aluminosilicates can be used as raw materials. In this context, the main objective of this study was to identify the types of waste used as precursors in the synthesis of geopolymers applicable to civil construction. For this purpose, a systematic literature review was conducted, in which the following information was gathered: the waste's origin activity (industrial, urban, and agricultural), chemical composition, and granulometry. The main synthesis factors (types of activators, NaOH solution concentration, Na₂SiO₃/NaOH ratio, curing type, synthesis method) and their influences on the mechanical properties, microstructure, and durability of geopolymers made from residual materials were also discussed.

Keywords: Geopolymers. Residual materials. Construction.

¹Izabelly Thaynara Miranda Lage

¹Universidade Federal de São Paulo
Santos - SP - Brasil

²Juliana Petermann Moretti

²Universidade Federal de São Paulo
Santos - SP - Brasil

Recebido em 19/08/24

Aceito em 19/10/24

Introdução

O cimento Portland é o principal material de construção utilizado mundialmente. Em 2020, o Brasil vendeu 60,8 milhões de toneladas desse cimento, representando um aumento de 10,9% em relação ao ano anterior, mesmo diante de um cenário de aumento significativo nos custos de produção (ABCP, 2021). Entretanto, a crescente produção do cimento demanda um amplo consumo de energia, utilização de recursos não renováveis, altas temperaturas e a queima de combustíveis fósseis (Mohamad *et al.*, 2021), resultando em altas emissões de poluentes atmosféricos. Estudos indicam que a produção de cimento é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), além de emitir óxidos de nitrogênio (Nox), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO) e pequenas quantidades de metais pesados (Blois; Lay-Ekuakille, 2021; Madirisha; Dada; Ikotun, 2024). Essa realidade coloca a indústria sob intensa pressão para reduzir seu impacto ambiental, uma vez que as emissões acumuladas contribuem para o aumento das temperaturas, o derretimento das calotas polares e a intensificação de eventos climáticos extremos. Em resposta, a comunidade internacional tem se mobilizado por meio de tratados e acordos, como o Acordo de Paris e o Protocolo de Kyoto, com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas.

Diante deste panorama, a busca por alternativas ao cimento tradicional tornou-se urgente. Com o objetivo de minimizar impactos ambientais e reduzir os custos de produção, diversas pesquisas estão sendo realizadas para encontrar materiais que sejam mais ecoeficientes (Abrão; Cardoso; John, 2020). Uma dessas alternativas são os materiais aluminossilicatos ativados por álcali, conhecidos como geopolímeros (Okoye, 2017), que podem apresentar propriedades mecânicas e durabilidade superiores às do cimento convencional, tornando-se promissores como ligantes na construção civil (Almutairi *et al.*, 2021). Descobertos pelo cientista de materiais Joseph Davidovits em 1979, os geopolímeros são materiais poliméricos inorgânicos que se policondensam e ganham forma rapidamente em baixas temperaturas, além de serem resistentes a altas temperaturas e intempéries (Davidovits, 1991). Sua produção não envolve o processo de calcinação, resultando em uma liberação reduzida de gases poluentes e menor demanda energética, além de permitir a utilização de subprodutos e resíduos industriais e agrícolas, contribuindo para a diminuição do descarte em aterros (Álvarez *et al.*, 2021).

Ren *et al.* (2021) classificaram os resíduos sólidos utilizados atualmente na produção de geopolímeros em três categorias: resíduos agrícolas, industriais e urbanos. Os resíduos industriais são gerados por processos produtivos e podem conter metais pesados, apresentando riscos ambientais e à saúde se descartados inadequadamente (Krishna *et al.*, 2020). Os resíduos agrícolas, provenientes da queima de biomassa, como cinzas de casca de arroz e de óleo de palma, são abundantes e caracterizam-se por altas concentrações de sílica e propriedades pozolânicas quando tratados adequadamente, sendo viáveis para a produção de geopolímeros (Thomas *et al.*, 2021). Por fim, os resíduos urbanos, gerados pelas atividades cotidianas, representam um desafio significativo para a gestão ambiental, especialmente devido ao aumento populacional. A incineração, embora eficiente na redução do volume de resíduos, gera cinzas volantes que contêm metais pesados e substâncias tóxicas, sendo consideradas perigosas (Lan *et al.*, 2021). A imobilização de metais pesados em geopolímeros a partir de cinzas de incineração se destaca como uma solução promissora para mitigar esses riscos.

Diversos resíduos têm sido explorados como matérias-primas na formulação de geopolímeros, entre os quais se destacam as cinzas volantes, escória de alto-forno e lama vermelha (Oliveira *et al.*, 2021; Das *et al.*, 2021). No estudo de Brito *et al.* (2018), geopolímeros produzidos com cinzas volantes e metacaulim apresentaram uma morfologia densa e uniforme, resultando em expressivos valores de resistência à compressão: 24,31 MPa após 24 horas, 36,53 MPa após 7 dias e 40,80 MPa após 28 dias de cura. Outros precursores como o resíduo de vidro, cinzas de cascas de arroz e resíduo catalítico de refino de petróleo (Vafaei; Allahverdi, 2017; Hossain; Roy; Bae, 2021; Tashima *et al.*, 2012) também podem alcançar excelentes propriedades mecânicas. Estudos mostram que as propriedades dos geopolímeros podem ser influenciadas por diferentes fatores como as características do material precursor, proporções de aluminossilicatos, concentração do ativador, temperatura, processo de cura, entre outros (Azad; Samarakoon, 2021; Oliveira *et al.*, 2021). Segundo Singh e Middendorf (2020), a variabilidade das matérias-primas utilizadas na fabricação dos geopolímeros torna difícil prever o mecanismo de geopolimerização, que é único para cada combinação de materiais. Considerando a atual demanda por materiais de construção sustentáveis, são necessários estudos aprofundados para um melhor entendimento do processo de geopolimerização com diferentes matérias primas.

Este estudo teve como objetivo central identificar os principais resíduos utilizados como matéria prima na síntese geopolímeros com baixa emissão de CO₂ aplicáveis à construção civil. Para tanto, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o propósito de levantar as características dos resíduos utilizados e sua

influência nas propriedades dos geopolímeros, buscando compreender quais variáveis interferem no mecanismo de síntese de geopolímeros produzidos a partir de materiais residuais.

Método

O Quadro 1 resume os parâmetros adotados para a realização desta revisão sistemática da literatura. Nas plataformas de busca, foi utilizado a aba avançada de busca, onde filtrou-se as palavras-chaves e idiomas.

Ao total as buscas retornaram 705 artigos nas plataformas e após a filtragem com os critérios de inclusão/exclusão 111 artigos foram incluídos no presente trabalho. A Figura 1 resume o processo de seleção dos artigos e mostra os principais motivos de exclusão.

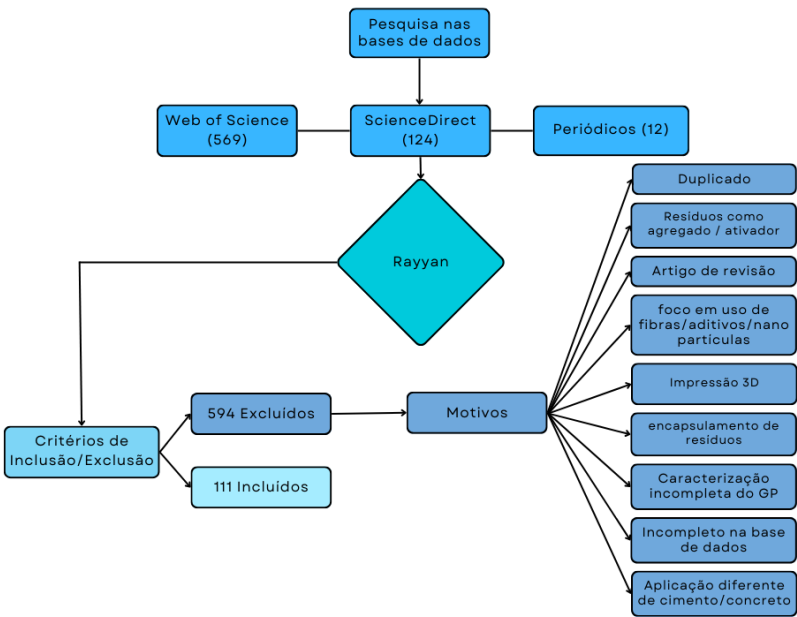
O software Ryaan foi utilizado como ferramenta de seleção de estudos. Os seguintes critérios de inclusão/exclusão foram usados para a filtragem dos artigos (Quadro 2).

Para cada estudo selecionado, foram extraídos dados, tais como tipo de resíduo utilizado, caracterização química/mineralógica/física dos resíduos, materiais ativadores utilizados, proporções utilizadas na mistura dos geopolímeros, métodos utilizados para síntese dos geopolímeros, características morfológicas/mineralógicas/mecânicas adquiridas pelos geopolímeros, fatores de influência na geopolimerização e conclusões dos autores acerca de seus estudos.

Quadro 1 - Parâmetros de busca

Fontes de Informação	Idioma	Palavras-chaves
Web of Science	Inglês	“Geopolímeros” AND “Resíduos”
Periódico CAPES	Inglês	((geopolymer) AND (residue OR waste OR sub-product) AND (cement OR concrete) AND (construction))
Science Direct	Português	

Figura 1 - Síntese do processo de seleção



Quadro 2 - Critérios de Inclusão e Exclusão

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
Uso de materiais residuais como precursor	Trabalhos não disponíveis integralmente nas plataformas
Pesquisa experimental com caracterização dos resíduos e seção de teste e avaliação dos geopolímeros sintetizados	Estudos com caráter de revisão ou que não avaliem experimentalmente os resíduos e geopolímeros
Produção de geopolímeros aplicáveis a como cimento/concreto	Aplicação distinta de cimento/concreto

Resultados e discussões

Classificação dos resíduos

Seguindo a classificação proposta por Ren *et al.* (2021), os resíduos foram classificados de acordo com a sua atividade de origem em Industrial, Agrícola e Urbano (Figura 2). Os resíduos de fontes industriais foram os mais utilizados nos estudos selecionados, 40% usaram este tipo de resíduo em combinação com resíduos urbano ou agrícolas. Os resíduos urbanos foram empregados como fonte primária ou secundária em 44% dos artigos e, por fim, os resíduos agrícolas foram aproveitados em 13%.

Resíduos industriais

Os resíduos industriais foram subclassificados de acordo com o setor de atividade em siderúrgico, mineração, energia, metalúrgico e outros. A Tabela 1 resume em cada setor a quantidade de observações dos 31 resíduos nos 111 artigos selecionados.

A Figura 3 ilustra os principais resíduos industriais utilizados como matéria-prima na síntese de geopolímeros. Os setores siderúrgico e de energia se destacam, principalmente pelos resíduos de escória de alto-forno (GBFS) e cinzas volantes (FA), conforme indicado na Tabela 3, indicando uma maior adequação para a produção de geopolímeros.

Setor siderúrgico

No setor siderúrgico, a GBFS é o principal resíduo analisado em estudos. Originada no processo de fabricação de ferro e aço, o resíduo contém predominantemente SiO_2 , Al_2O_3 e CaO em sua composição química, o que lhe confere propriedades pozolânicas e de cimentação. Essas características tornam o resíduo uma escolha popular para a produção de materiais de construção sustentáveis. Seu uso na produção de geopolímeros é amplamente adotado devido à sua composição química adequada e à sua abundante disponibilidade, além de proporcionar melhorias na resistência e microestrutura como apontado por Huseien e Shah (2020). Tais melhorias são atribuídas, principalmente, à formação de géis de silicato de cálcio hidratado (CSH) e silicoaluminato de cálcio hidratado (CASH).

Outros resíduos do setor siderúrgico mencionados nos estudos incluem escórias de aciaria de conversor, escórias de forno, escória de aço, escória de forno elétrico e arco, escória de fósforo, entre outras, conforme listado na Tabela 1.

Figura 2 - Classificação dos resíduos

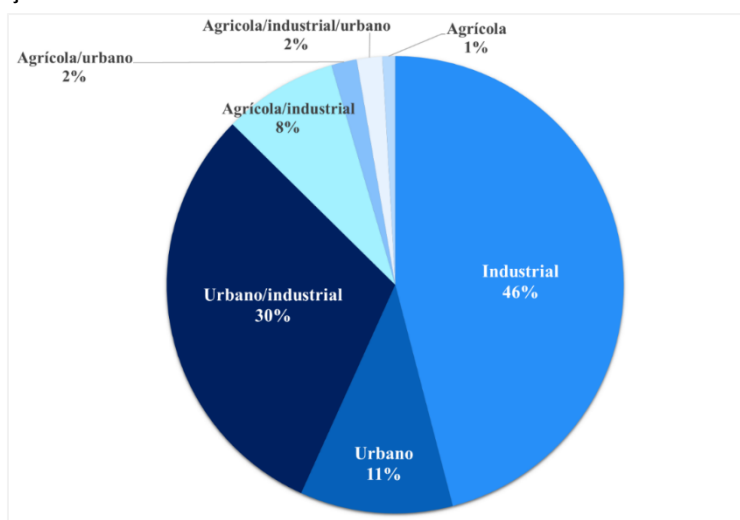
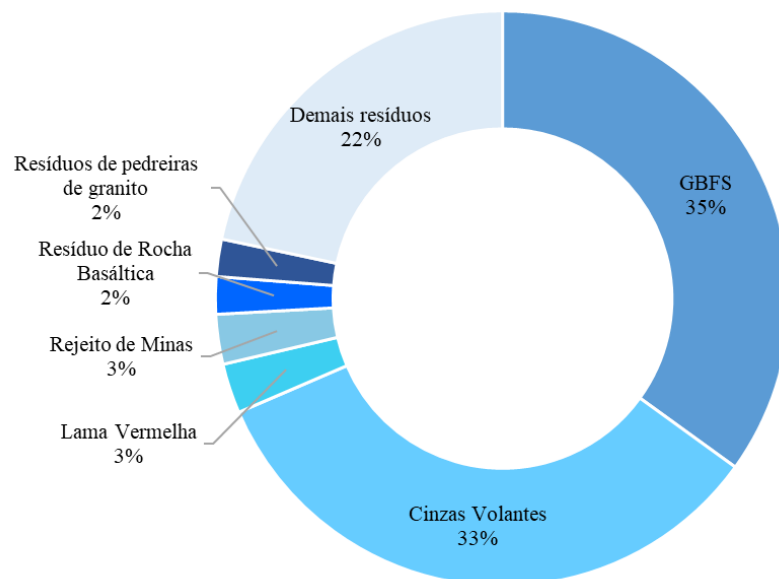


Tabela 1 - Resíduos industriais

Setor	Resíduos	Quantidade
Siderúrgico	Escória de aciaria de convertedor (EAC)	1
	Escórias aciaria de forno (LD)	2
	Escória granulada de alto forno (GBFS)	50
	Escória de fósforo (PHS)	1
	Escória de forno elétrico a arco (EAFS)	1
	Escória de cobre (CS)	1
	Escória de aço (SS)	2
Energia	Cinzas Volantes (FA)	48
	Cinza combustível de óleo de palma (PFOA)	2
	Cinzas residuais de carvão (BA)	2
Mineração	Lama Vermelha (RM)	4
	Rejeito de Bauxita	1
	Resíduo de sulfato de alumínio (TMASR)	1
	Rejeito de Minas (MT)	4
	Pó de ganga de carvão ultrafino (UCGP)	2
	Resíduos de Mineração Sulfídica (RMS)	1
	Resíduo de Boro (B)	1
	Rejeitos de Chumbo-Zinco (RCZ)	1
Metalúrgico	Cinza de ferrocromo (FCA)	1
	Escória de fundições de chumbo-zinco (ECZ)	1
	Escória de faialita rica em Fe (FS)	1
Outros	Resíduo de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP)	2
	Pó de Corindo Reciclado (PCR)	1
	Resíduo de pedra de Bethamcharla (BWSP)	1
	Resíduo de Rocha Basáltica (RB)	3
	Caulim Desaluminado (DAK)	1
	Lama de Anodização (LA)	1
	Resíduos de pedreiras de granito (RG)	3
	Resíduos de placas de circuito impresso (RE)	1
	Cinzas de lodo de petróleo (LP)	1
	Fosfogesso (FG)	1

Figura 3 - Principais resíduos industriais



Setor de energia

No setor de energia as cinzas volantes (Fly Ash - FA), ricas em teores de Si e Al amorfos, são geradas pela queima de carvão em usinas termoeletricas. FA é uma fonte crucial para a fonte de SiO_2 e de Al_2O_3 , no entanto, para equilibrar a proporção de óxidos o resíduo pode ser misturado com outra fonte de silicato ou alumina de 10% a 50% ou mais para atingir a proporção desejada e melhorar o desempenho dos geopolímeros (Raut *et al.*, 2023). As cinzas residuais de carvão (Bottom Ash - BA) e cinza combustível de óleo de palma são outros resíduos do setor de energia.

Embora BA e FA resultem do mesmo processo industrial e possuam composições químicas semelhante, a BA geralmente apresenta menor conteúdo amorfo e partículas de maior tamanho, o que reduz sua reatividade. Tambara Júnior *et al.* (2022) propõem uma forma de valorização deste resíduo em matrizes geopoliméricas, aumentando sua reatividade através da moagem e correção da razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ao combinar o resíduo com metacaulim.

Setor de mineração

A lama vermelha (Red Mud - RM) e os rejeitos de minas (Mine Tailings - MTs) são os resíduos mais utilizados no setor de mineração. RM é resultante do processo Bayer e normalmente é descartada em aterros sanitários ou lançada no mar. No entanto, esse resíduo tem sido explorado como precursor devido a sua composição química conter principalmente alumina (Al_2O_3), hematita (Fe_2O_3), silicatos (SiO_2) (Zakira *et al.*, 2023; Abadel *et al.*, 2023; Brito; Racanelli; Souza, 2020).

Os MTs são gerados durante a extração de ouro pelas atividades de mineração e processamento mineral. Embora apresentem uma composição adequada para a geopolimerização, os resíduos possuem baixa reatividade, o que exige a adição de materiais suplementares para formar uma matriz forte por meio da ativação alcalina (Zhang *et al.*, 2022; Mercado *et al.*, 2022).

Setor metalúrgico

No setor metalúrgico, a cinza de ferrocromo é utilizada como substituta da GBFS para a produção de concreto geopolimérico curado à temperatura ambiente (Mishra *et al.*, 2022). Corrales *et al.* (2018) exploraram a viabilidade da ativação alcalina da escória de fundições de chumbo-zinco para desenvolver um ligante alternativo. Além disso, a escória de faialita rica em ferro foi usada em conjunto com resíduos ricos em cálcio e alumínio, com o objetivo de alcançar melhores propriedades à temperatura ambiente.

Outros resíduos industriais

Na categoria “outros” (Tabela 3) encontram-se estudos sobre resíduos como o polímero reforçado com fibra de vidro (Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP), que foi utilizado em substituição à FA e à GBFS (Wang *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022). Outro exemplo é o resíduo de rocha basálticas (RB), gerado na extração de rochas em pedreiras, que apresentam alto teor de sílica e alumina, tornando-o promissor para aplicações geopoliméricas (Nawaz; Heitor; Sivakumar, 2023).

Resíduos urbanos

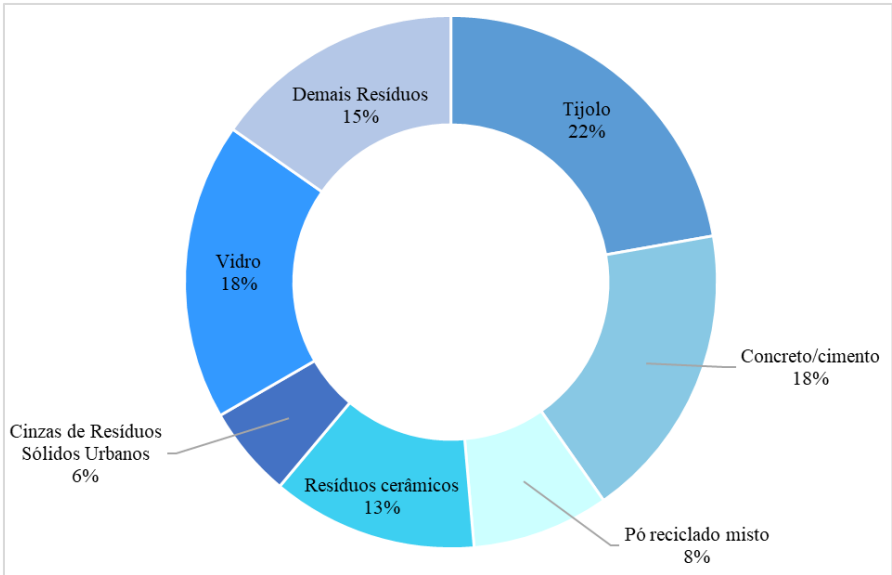
Os resíduos de origem urbana também foram agrupados conforme sua procedência, a Tabela 2 permite uma visualização detalhada das quantidades dos 13 resíduos identificados.

No gráfico apresentado na Figura 4, é possível observar os principais resíduos urbanos. O setor de construção civil teve destaque com o uso de resíduos de construção e demolição (RCDs) e o resíduo de vidro (RV) foi o mais usado na categoria “outros”.

Tabela 2 - Resíduos Urbanos

Setor	Tipo de Resíduo	Qtd.
Construção Civil	Tijolo (Tj)	16
	Concreto/cimento (C)	13
	Pó reciclado misto (PR)	6
	Telha (T)	4
	Agregado (Ag)	2
	Resíduos cerâmicos (RC)	9
	Pó de forno de cimento (CKD)	1
	Lama de Túnel (LT)	1
Resíduos sólidos municipais	Cinzas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	4
Outros	Vidro (RV)	13
	Casca de Ovo (CO)	1
	Lodo de tratamento de água (LTA)	1
	Lodo de Alumen (LAM)	1

Figura 4 - Principais resíduos urbanos



Resíduos de Construção Civil

Os RCDs são gerados durante processos de infraestrutura, como a construção de casas, pontes e estradas, tornando-se materiais amplamente disponíveis em todo o mundo (Cardoza; Colorado, 2023). Um estudo desenvolvido por Lu *et al.* (2024) estimou que, para cada gigatonelada de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados, um país, em média, produz 2 Gt de resíduos de construção, 600 Mt de resíduos agrícolas, 300 Mt de resíduos industriais, 100 Mt de resíduos perigosos, 10 Mt de resíduos eletrônicos e 8 Mt de resíduos médicos. Esses dados destacam a expressiva geração dos RCDs e a importância de encontrar soluções para a aplicação desse material. No Brasil, foram gerados cerca de 45 milhões de toneladas de RCDs em 2022 (ABREMA, 2023). Nesta categoria, foram identificados diferentes tipos de resíduos, incluindo tijolos, concretos, cimentos, materiais cerâmicos e telhas. Esses materiais são frequentemente utilizados em conjunto como precursores na síntese de geopolímeros, apresentando uma alternativa sustentável para a reutilização de recursos na construção civil.

O RCD foi investigado em 33 estudos, que abordam uma variedade de objetivos. Alguns estudos focam na produção de materiais geopoliméricos inteiramente baseados em RCD (Ozcelikci *et al.*, 2023; Maroto *et al.*, 2022; Tan; Cai; Li, 2022). Outros avaliam como esses resíduos afetam as propriedades micro e macroscópicas dos geopolímeros (Liu *et al.*, 2022; Cardoza; Colorado, 2023; Vafaei; Allahverdi, 2019). Além disso, alguns pesquisadores analisam a molaridade da solução de NaOH e a relação entre os componentes da mistura alcalina

(NaOH/Na₂SiO₃) (Kumar Das; Shrivastava, 2021), bem como o impacto de diferentes métodos de cura nos geopolímeros (Abdollahnejad *et al.*, 2019). Ozcelikci *et al.* (2023) ressaltam que a literatura apresenta lacunas significativas sobre a aplicação do RCD na geopolimerização, especialmente em relação aos efeitos das frações dos constituintes do resíduo e à seleção adequada de ativadores alcalinos. Essa escolha é crucial para garantir resistência à compressão satisfatória e para definir claramente as condições e durações de cura, levando em conta fatores ambientais. Complementando essa perspectiva, Ulugol *et al.* (2021) destacam que as características dos materiais baseados em RCD podem variar substancialmente, mesmo quando têm origens semelhantes. Isso evidencia a necessidade de uma investigação experimental detalhada para analisar os parâmetros ideais de material, mistura e cura dos geopolímeros elaborados com esse tipo de resíduo em cada região específica.

Resíduos Sólidos Urbanos

Os RSU também são investigados para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e seu reaproveitamento como material secundário na produção de geopolímeros (Almalkawi; Balchandra; Soroushian, 2019; Liu *et al.*, 2023; Avila; Silva; Brito, 2022). Liu *et al.* (2023), destacam que o RSU carece das fases de silício e alumínio necessárias para a síntese de geopolímeros. Por isso, é comum combiná-lo com outros resíduos que são ricos nesses elementos, visando aprimorar suas propriedades e viabilidade para aplicações geopoliméricas.

Outros resíduos urbanos

Na categoria outros, encontram-se o RV, casca de ovo (Ferreira *et al.*, 2023) e lodo de tratamento de água (Abdelmawla *et al.*, 2019). Apesar de ser 100% reciclável, o RV não é gerido de forma adequada portando é necessário um manejo adequado pois o resíduo não se decompõe naturalmente. O alto teor de sílica amorfa contribui para a reciclagem do resíduo em geopolímeros, reforçando o conceito de economia circular (Kumar Das; Shrivastava, 2022b).

Resíduos agrícolas

Os resíduos de origem agrícola estão resumidos na Tabela 3. As cinzas geradas pela incineração da casca de arroz (CCA) são utilizadas como fonte de sílica reativa para a geopolimerização, devido à sua natureza altamente amorfa e à alta área superficial específica. No entanto, para alcançar condições adequadas para a geopolimerização, é necessário utilizar fontes adicionais de alumina e cálcio junto com a CCA (Jayanthi *et al.*, 2023; Almalkawi *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2022; Nuernberg; Niero; Bernardi, 2021; Ferreira *et al.*, 2023; Raut *et al.*, 2023).

A cinza do bagaço de cana de açúcar (CBCA) é obtida da queima do bagaço na indústria açucareira e geralmente é descartada em aterros sanitários. O resíduo possui alta concentração de sílica e outros constituintes como AlO₃, CaO, Fe₂O₃ e K₂O que justificam seu uso como material pozolânico. Chuewangkam *et al.* (2022) avaliaram a adição de CBCA em pasta geopolimérica à base de FA e seus efeitos nas propriedades mecânicas, dielétricas e microestruturais. O uso das cinzas de sabugo de milho (CSM) e cinzas volantes de biomassa (BM) também foram avaliados como potenciais precursores para geopolímeros (Oyebisi *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2023).

Tabela 3 - Resíduos agrícolas

Setor	Tipo de Resíduo	Quantidade
Agrícola	Sabugo de Milho (CSM)	2
	Casca de Arroz (CCA)	6
	Bagaço de Cana de Açúcar (CBCA)	3
	Biomassa (BM)	1

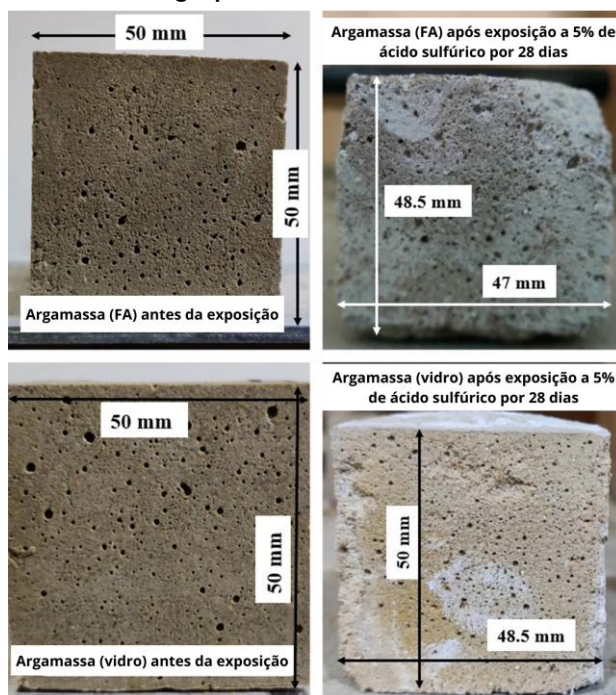
Composição química

A composição química dos resíduos possui influência direta nas propriedades dos geopolímeros, as espécies de sílica e alumina são ativadas pela solução alcalina para formar estruturas semicristalinas de sílico-aluminado, portanto, são os óxidos que mais influenciam na geopolimerização. O óxido de cálcio (CaO) influencia na cinética de reação e no tipo de estrutura de gel resultante, o baixo teor de cálcio pode levar à formação de géis NASH, enquanto o alto teor de cálcio pode levar à formação de géis CASH (Sevim *et al.*, 2023). Huseien *et al.* (2020) relataram que a adição de RCD em concretos geopoliméricos contendo GBFS reduziu o teor de CaO desacelerando a formação de géis do tipo CASH, resultando na perda de resistência mecânica. Por outro lado, em Raut *et al.* (2023) geopolímeros formados a partir de uma mistura de resíduos de vidro e FA apresentaram boa resistência atribuída à formação de géis adicionais CASH devido a presença de CaO no resíduo de vidro.

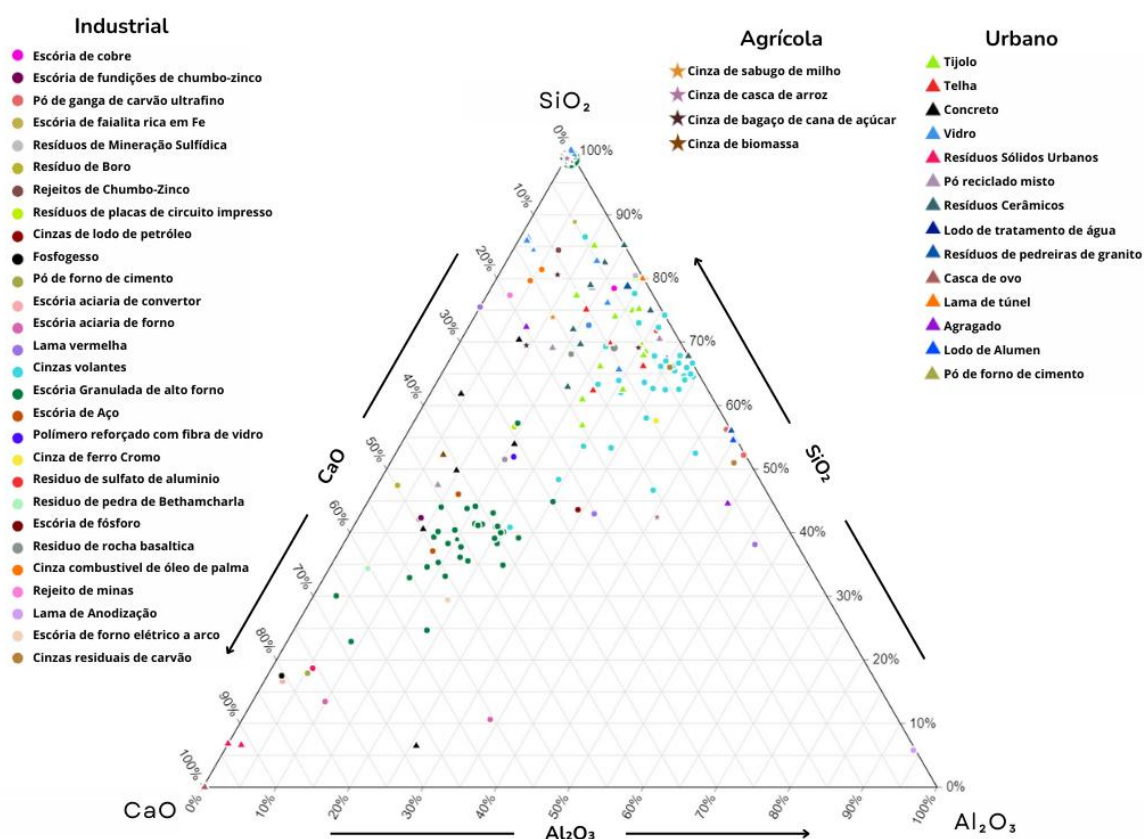
A durabilidade também é influenciada pela composição química do precursor. Kumar Das e Shrivastava (2022b) mostraram que amostras de argamassas geopoliméricas a base de vidro foram mais resistentes ao ataque ácido em comparação com argamassas de cinzas volantes. Concluiu-se que o teor adicional de 10% de CaO presente no vidro colaborou para a formação adicional de géis CASH reduzindo a permeabilidade da mistura e formando uma estrutura mais compacta e densa. Na Figura 5 captada pelos autores é possível visualizar que a argamassa de cinzas volantes sofreu perdas estruturais consideráveis em comparação com as amostras de argamassa à base de vidro.

A Figura 6 apresenta um diagrama ternário $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ dos materiais precursores utilizados, montado com base nos valores disponibilizados de Fluorescência de raios-x (FRX). No diagrama é possível observar resíduos com predominância de SiO_2 em sua composição, como FA, cinza de combustível de óleo de palma (PFOA), resíduos de tijolo (TJ) e resíduos cerâmicos (RC). O silício, juntamente com o alumínio desempenham papel crucial na estruturação da rede tridimensional que se forma durante a ativação do geopolímero. A depender da proporção $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ os materiais resultantes da geopolimerização podem ser aplicáveis em diferentes áreas (fabricação de tijolos, cerâmicas, cimentos e concretos com baixa emissão de CO_2 , encapsulamento de resíduos tóxicos, proteção antifogo, entre outros), quanto maior esta razão se obtém materiais com caráter mais poliméricos. Conforme discutido acima, o óxido de cálcio também possui influência na cinética de geopolimerização, no diagrama o resíduo GBFS, amplamente utilizado na síntese de geopolímeros, apresenta níveis mais elevados de CaO (na faixa de 40 a 50%).

Figura 5 - Avaliação da durabilidade de geopolímeros com diferentes resíduos



Fonte: Kumar Das e Shrivastava (2022b).

Figura 6 - Diagrama Ternário subescrever a base do triângulo, Al_2O_3 

Como os resíduos possuem composições químicas variadas, a estratégia comum é combiná-los para ajustar as razões molares dos óxidos essenciais, como $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Dessa forma, é possível utilizá-los como matéria-prima na produção de geopolímeros, promovendo o reaproveitamento desses materiais. Um exemplo disso é o estudo de Nuernberg, Niero e Bernardin (2021), que combinou cinzas de casca de arroz (CCA), ricas em SiO_2 , com lama de anodização de alumínio (LA), com alta concentração de Al_2O_3 .

Análise granulométrica

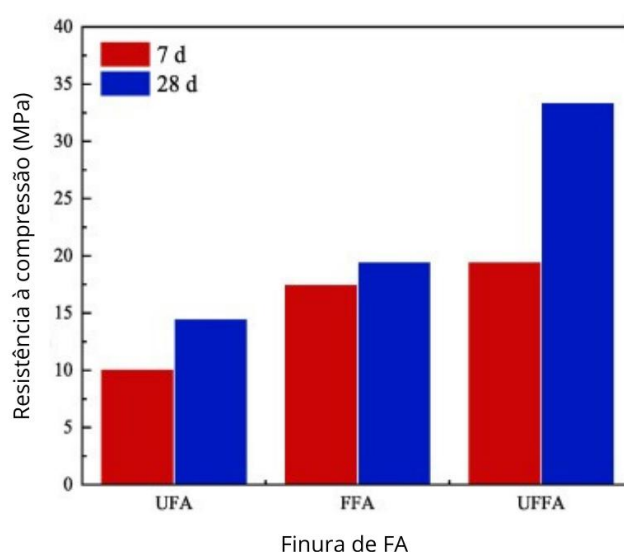
O tamanho das partículas também influencia as propriedades dos geopolímeros. Partículas menores possuem área superficial maior, ou seja, são mais reativas em comparação com as partículas maiores. Isso significa que as partículas menores reagem mais rapidamente com a solução alcalina, acelerando o processo de dissolução e resultando em taxas de reação mais rápidas (Figliela *et al.*, 2022). Além disso, partículas mais finas podem levar a uma microestrutura mais densa e menos porosa pois tendem a preencher vazios entre partículas mais grossas, o que pode resultar em maior resistência mecânica e durabilidade do material. Idrees *et al.* (2023) investigaram o efeito da finura de cinzas volantes bruta (UFA), cinzas volantes finas (FFA) peneiradas em peneira menor que 75 μm e cinzas volantes ultrafinas (UFFA) moídas por moagem de esferas e discos, houve um aumento de 71,3% na resistência à compressão aos 28 dias à medida que a finura do FA aumenta (Figura 7).

O histograma (Figura 8) representa no eixo x diferentes faixas de tamanhos médios de partículas (D50) com barras de intervalos de 15 μm . No eixo y, pode ser visualizado quantas partículas estão naquela faixa de tamanho específica. O diagrama foi feito com base no D50 de 110 resíduos extraídos de 56 artigos que citaram esta informação. Por exemplo, 51 resíduos analisados possuíam D50 na faixa de 0-15 μm . Cabe ressaltar que o D50 é um termo que representa o diâmetro de partícula no qual 50% das partículas da amostra estão acima deste valor e 50% abaixo deste valor, ou seja, trata-se do tamanho de partículas mediano. Komnitsas *et al.* (2015) sugere que quando frações mais finas que 150 μm ($\text{D}_{50} < 15 \mu\text{m}$) são utilizadas, os geopolímeros tendem a apresentar melhores propriedades mecânicas. O autor observou que resistência à compressão aumenta de 38 MPa para 58 MPa quando o tamanho da partícula é reduzido de 477 μm para 140 μm (D50

diminui de 76 μm para 14 μm). Em Ulugol *et al.* (2021) os geopolímeros à base de vidro apresentaram os resultados de resistência à compressão mais baixos em quase todas as condições, possivelmente devido ao tamanho de partícula mais grosso ($D_{50} = 81,3 \mu\text{m}$) o que fez com que as partículas fossem pouco dissolvidas, resultando também em uma microestrutura menos compacta.

Um resultado semelhante foi observado em um estudo realizado por Liu *et al.* (2022) pois a resistência mecânica da argamassa geopolimérica à base de GBFS ($D_{50} = 11,19 \mu\text{m}$) diminuiu à medida que a porcentagem de substituição de RCDs (pó de cimento (RPP), de argamassa (RMP) e de concreto (RCP)) aumentou (Figura 9). Segundo o autor, isso ocorre porque o RCD tem tamanho de partícula maior (cerca de 2.5x) e menor reatividade do que o GBFS, reduzindo a reação de polimerização, o que impacta negativamente o desenvolvimento da resistência mecânica da argamassa geopolimérica. Além disso, a microestrutura do geopolímero também é afetada com o alto teor de substituição do RCD pois aumenta o tamanho cumulativo dos poros, também atrelado a baixa reatividade do resíduo que prejudica a sua dissolução na reação de geopolimerização. Resíduos que não reagem com o ativador e não se dissolvem tendem a formar espaços não preenchidos pelo gel geopolimérico e podem se manifestar como poros na estrutura final.

Figura 7 - Efeito da finura na resistência dos geopolímeros



Fonte: Idrees *et al.* (2023).

Figura 8 - Histograma de tamanho médio de partículas

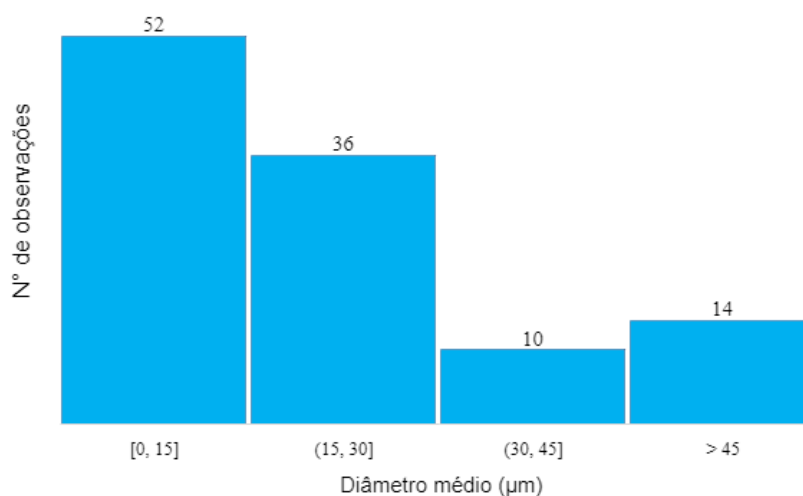
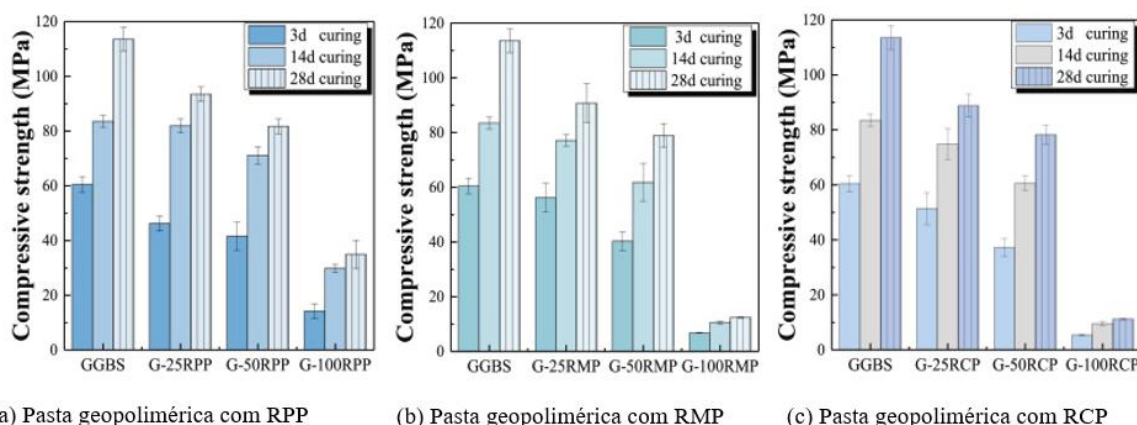


Figura 9 - Resistência mecânica da pasta geopolímero à base de GGBS incluindo RCD



(a) Pasta geopolimérica com RPP

(b) Pasta geopolimérica com RMP

(c) Pasta geopolimérica com RCP

Fatores de influência

Tipo de ativador alcalino

Os estudos analisados usaram ativadores de diferentes tipos (Figura 10) como hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), silicato de sódio (Na_2SiO_3), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que foram utilizados em conjunto ou individualmente. 76% dos estudos optaram por utilizar uma combinação de NaOH e Na_2SiO_3 para compor o ativador alcalino pois o NaOH atua como meio alcalino enquanto o Na_2SiO_3 é geralmente utilizado como fonte extra de sílica, permitindo o ajuste das proporções essenciais dos geopolímeros. Alguns estudos verificaram a influência do tipo do ativador nas características resultantes dos geopolímeros (Xu *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2023; Almalkawi; Balchandra; Soroushian, 2019; Özçelikci *et al.*, 2023). Em Xu *et al.* (2023) foi avaliado o efeito de três tipos de solução ativadora (KOH, NaOH e NaOH + Na_2SiO_3) na trabalhabilidade, resistência à compressão e eflorescência de geopolímeros sintetizados a base de resíduo ácido de sulfato de alumínio. Os autores constataram que o uso do ativador multicomposto (NaOH+ Na_2SiO_3) resultou em geopolímeros com maior trabalhabilidade pois provavelmente os ânions de silicato na solução ativadora foram adsorvidos na superfície das partículas precursoras para melhorar as forças repulsivas entre partículas, levando à redução da tensão de escoamento e ao aumento da fluidez. A resistência à compressão aumentou ao longo do tempo tornando-se mais pronunciada quando se utilizou os ativadores multicomposto atingindo 24,7 MPa, enquanto as amostras ativadas por NaOH ou KOH só endureceram aos 28 dias de idade. Além disso, a formação de eflorescência foi observada em geopolímeros multicomponentes e a base de NaOH, mas não nos ativados por KOH, devido a solubilidade de K_2CO_3 formado na superfície das amostras.

O efeito da fonte alcalina também foi investigado por Almalkawi, Balchandra e Soroushian (2019) em geopolímeros à base de CCA, RSU e FA. Os resultados indicam que KOH é um ativador altamente eficaz para produzir altas resistências à compressão (50 MPa) com 7 dias de cura. A eficácia do KOH pode estar associada à sua alta alcalinidade que tende a agir mais rapidamente quando a sílica solúvel está disponível e desempenha um papel crucial na dissolução dos constituintes de sílica e alumina dos precursores de aluminossilicatos, o que permite sua participação na etapa de policondensação do processo de geopolimerização. Por outro lado, Na_2CO_3 , apesar da presença de cálcio na formulação, não atende às expectativas em termos de resistência à compressão e microestrutura, onde são mais notáveis partículas não reagidas, indicando limitação na dissolução dos precursores.

Há um debate na literatura sobre os métodos de síntese: “one-part” (uma parte) e “two-part” (duas partes) para a produção de materiais geopoliméricos. O método convencional de duas partes consiste na ativação do material precursor sólido por meio da solução ativadora aquosa, enquanto o método de uma parte (monocomponente) trata-se de misturar os precursores com ativadores sólidos visando produzir ligantes sólidos secos e então misturá-los com água quando necessário para produzir geopolímeros. Dos 117 estudos selecionados, apenas 7 utilizaram o método de uma parte. Os ativadores alcalinos líquidos são altamente corrosivos, viscosos e perigosos de manusear e, portanto, configura-se como uma dificuldade para a aplicação em escala industrial. Por outro lado, o geopolímero monocomponente tem um bom potencial para ser uma alternativa operacionalmente semelhante ao cimento convencional (Migunthanna; Rajeev; Sanjayan, 2021). No entanto, os geopolímeros produzidos pelo método de uma parte possuem diferença na taxa de dissolução dos precursores quando comparado ao método tradicional uma vez que as fontes de sílica sólida se dissolvem

mais lentamente do que as soluções de silicato solúvel. Além disso, pastas monocomponentes frequentemente endurecem muito rapidamente devido ao calor gerado pela dissolução de ativadores sólidos, o que pode causar perda significativa de água, afetando a trabalhabilidade, perda de massa e tempo de presa da mistura (Segura *et al.*, 2022; Luukkonen *et al.*, 2018; Willson-Levy *et al.*, 2023). Questões relacionadas ao uso de ativadores sólidos, como o Na_2SiO_3 , apresenta desafios relacionados a sustentabilidade do método de produção e custos (Zareechian *et al.*, 2023).

Concentração molar de NaOH

É relatado que a maior alcalinidade dos cátions de Na^+ aumenta as taxas de dissolução dos elementos Si e Al do material precursor, porém a depender do excesso de NaOH, pode haver uma rápida precipitação dos aluminossilicatos dificultando sua disponibilidade, inibindo a reação de ativação e resultando em propriedades indesejáveis nos materiais (Kumar Das; Shrivastava, 2021). Ulugol *et al.* (2021) explica que “exceder uma concentração ótima de solução de NaOH também leva à blindagem eletrostática, que diminui a atividade dos íons e impede a dissolução de precursores causando redução na resistência à compressão”. A Figura 11 exibe as diferentes concentrações de NaOH observadas nos estudos, 26 artigos investigaram o efeito da concentração de NaOH nos geopolímeros. As concentrações na faixa de 8–12 Molar foram as mais utilizadas.

Figura 10 - Tipos de ativadores

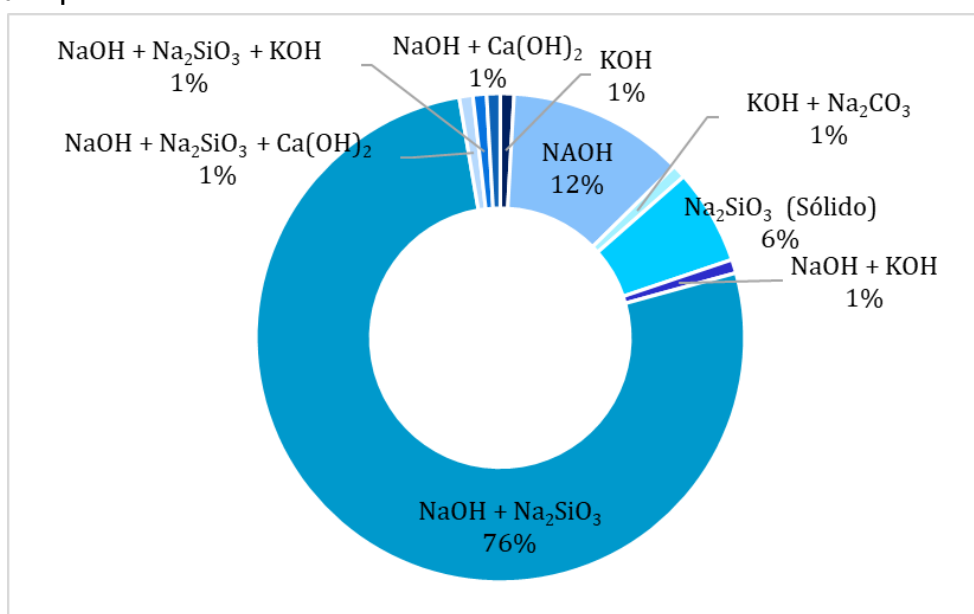
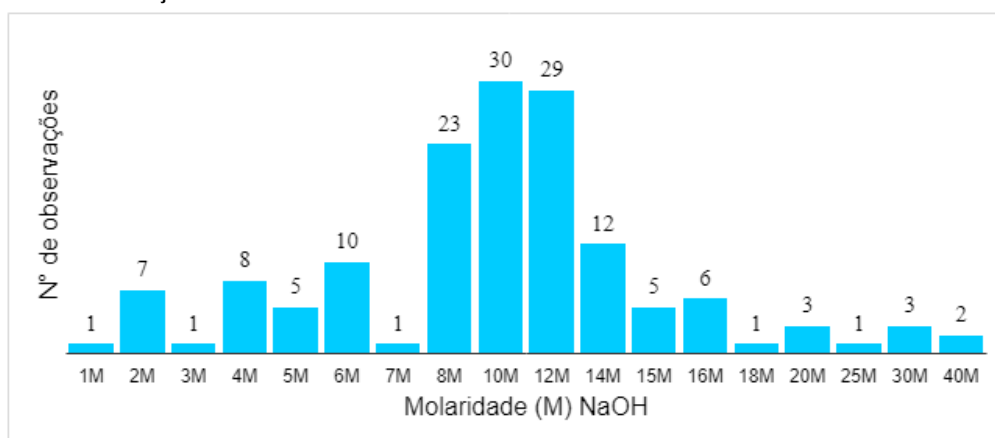


Figura 11- Concentração molar de NaOH



Em Brito *et al.* (2019) a molaridade do NaOH foi fator chave no desenvolvimento da resistência à compressão e microestrutura dos geopolímeros feito a partir de metacaulim e cinzas volantes (Figura 12). O autor relata que as soluções ativadoras com 5M e 15M apresentaram melhor desempenho, atingindo valores de 29,68 e 40,08 MPa respectivamente com 28 dias de cura a temperatura ambiente. No entanto o excesso de NaOH nas soluções de 30M e 40M fez com que os geopolímeros apresentassem resultados inferiores. Resultado semelhante é visto em Racanelli *et al.* (2020) onde o geopolímero feito a partir do rejeito de bauxita atingiu maior resistência a compressão (12MPa) com o ativador a 15M em comparação com as demais molaridades. Comportamento semelhante foi relatado em geopolímeros a base de pó de rocha basáltica (Nawaz; Heitor; Sivakumar, 2022).

Na₂SiO₃/NaOH

Quando a solução ativadora é formada pela combinação Na₂SiO₃ e NaOH geralmente é necessário definir a proporção em massa das soluções entre estes componentes pois a adição adequada de silicato de sódio está associada a um aumento na resistência à compressão em razão da doação de espécies de sílica solúvel do silicato de sódio que facilita a formação do gel geopolimérico (Maroto *et al.*, 2022). O histograma da Figura 13 apresenta a frequência de valores observados da proporção Na₂SiO₃/NaOH nos estudos.

Figura 12 - Influência da concentração de NaOH na resistência mecânica

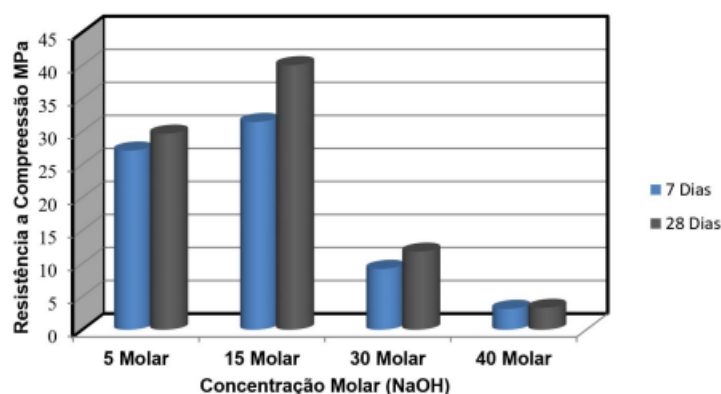
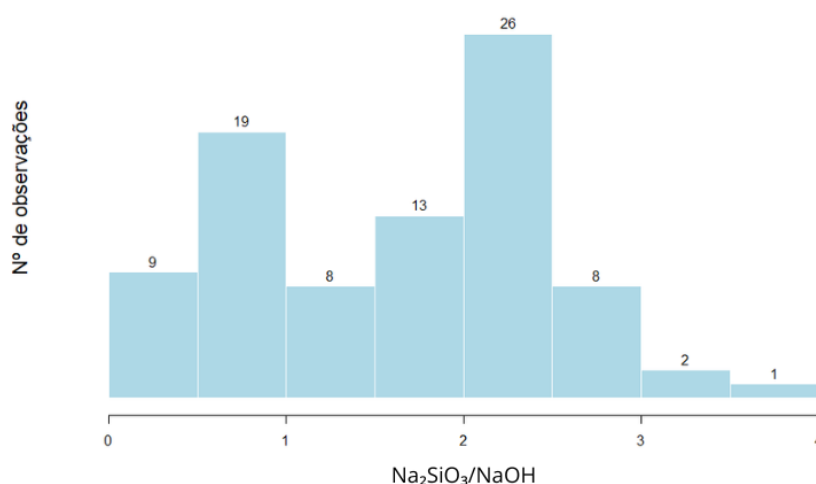


Figura 13 - Proporção Na₂SiO₃/NaOH



Foram relatados efeitos na fluidez, consistência, tempo de pega, resistência à compressão, retração por secagem e eflorescência de geopolímeros com diferentes resíduos (Kwek; Awang; Chee, 2021; Manjarrez *et al.*, 2019; Idrees *et al.*, 2023; Kumar Das; Shrivastava, 2021). Kwek, Awang e Chee (2021), Idrees *et al.* (2023) e Kumar Das e Shrivastava (2021) estudaram várias faixas de proporções de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ variando de 1-3.5 e chegaram a resultados semelhantes com geopolímeros a base de cinza de óleo de palma, cinzas volantes e pó de concreto residual. Os autores concluíram que a proporção alcalina ideal para seus geopolímeros é 2,5 (Figura 14). Quando é ultrapassado o teor ideal a resistência diminui provavelmente devido ao excesso de Na_2SiO_3 que inibe a reação de geopolimerização (Kwek; Awang; Chee, 2021).

Nawaz, Heitor e Sivakumar (2022) relata que apesar dos valores de resistência à compressão não confinada aumentarem proporcionalmente com $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, a trabalhabilidade para a compactação das amostras diminuiu (Figura 15) devido ao maior teor de silicato de sódio que acelerou a taxa de geopolimerização, causando pega mais precoce da mistura. A diminuição da fluidez à medida que ocorre o aumento da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, pode ser atribuída ao aumento da viscosidade da solução devido ao alto teor de silicato de sódio (Idrees *et al.*, 2023; Kumar Das; Shrivastava, 2021).

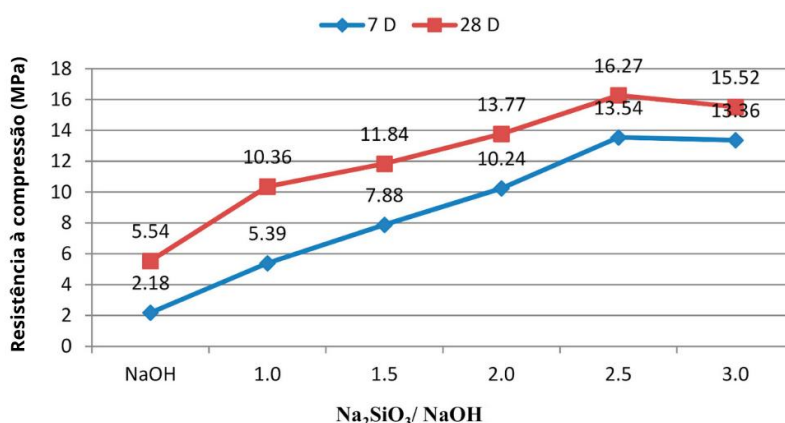
Kwek, Awang e Chee (2021) também relatam o efeito da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ na durabilidade. Segundo os autores, proporções mais baixas, com maior quantidade de NaOH aumentam o potencial para a formação de eflorescência em razão do excesso de íons de sódio que reagem com o dióxido de carbono atmosférico e causam o desenvolvimento de manchas brancas. Estes resultados estão em concordância com o estudo de Xu *et al.* (2023) em que os geopolímeros ativados com soluções a base de NaOH desenvolveram mais eflorescência (Figura 16).

Temperatura de cura

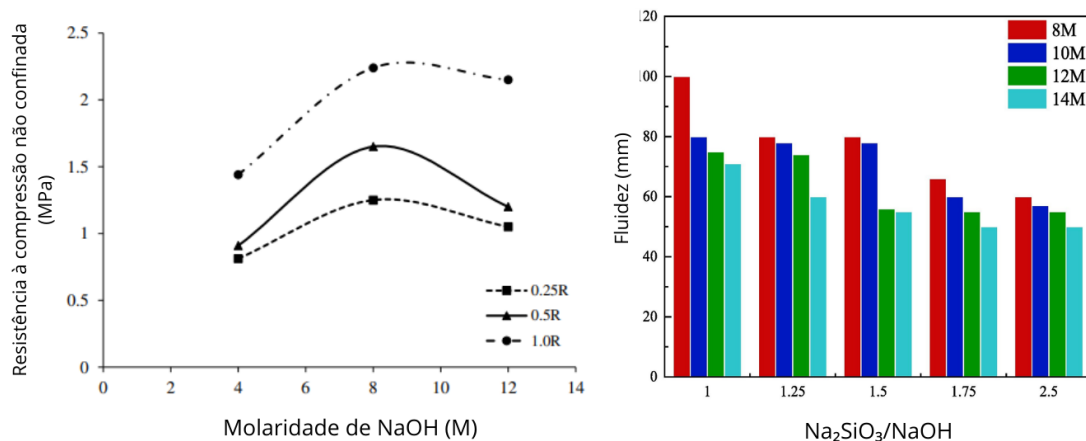
Nos estudos analisados, foram identificadas 3 variações (Figura 17) dos regimes de curas em geopolímeros: a cura à temperatura ambiente foi observada em 70 estudos, 22 estudos usaram cura à temperatura elevada nas primeiras horas (cura acelerada) e 8 estudos optaram pela cura somente em temperaturas elevadas.

O regime de cura em temperatura ambiente geralmente é adotado visando igualar as propriedades de cura de geopolímeros à dos cimentos tradicionais. Além disso, curar geopolímeros à temperatura ambiente oferece vantagens significativas em termos de eficiência energética, redução de emissões de carbono e facilidade de aplicação. Mishra *et al.* (2022) submeteram os geopolímeros a base de cinza de ferro cromo e GBFS à ventilação natural e à luz solar durante o período de cura de 28 dias, com uma variação de temperatura de 18 °C a 40 °C. Além disso, algumas amostras foram curadas à sombra em uma sala fechada sob temperatura ambiente controlada de 24 ± 3 °C. Pode-se observar que a resistência à compressão aumentou consideravelmente quando as amostras foram curadas ao ar livre recebendo periodicamente luz solar (Figura 18). Os autores consideraram que devido à ausência de luz solar e temperatura interna mais baixa a taxa de formação de géis NASH, CASH e CSH foram reduzidas. O contrário ocorreu com os corpos de provas que receberam luz solar periodicamente, onde houve uma aceleração na reação de geopolimerização.

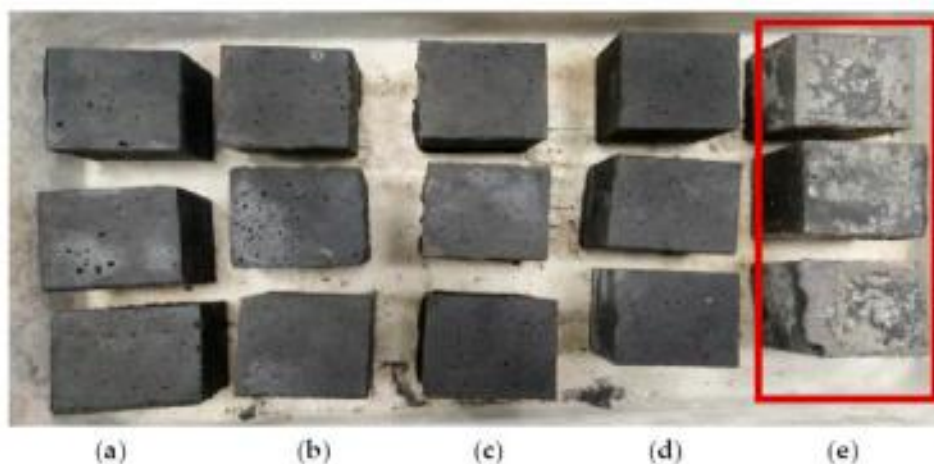
Figura 14 - Influência da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ na resistência à compressão



Fonte: Kwek, Awang e Chee (2021).

Figura 15 - Efeito de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 

Fonte: Nawaz, Heitor e Sivakumar (2022) e Idrees *et al.* (2023).

Figura 16 - Eflorescência de geopolímeros a base de cinza de óleo de palma com diferentes proporções de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ - (a) 3.0, (b) 2.5, (c) 2.0, (d) 1.5, e(e) 1.0

Fonte: Kwek, Awang e Chee (2021).

Figura 17 - Tipos de cura

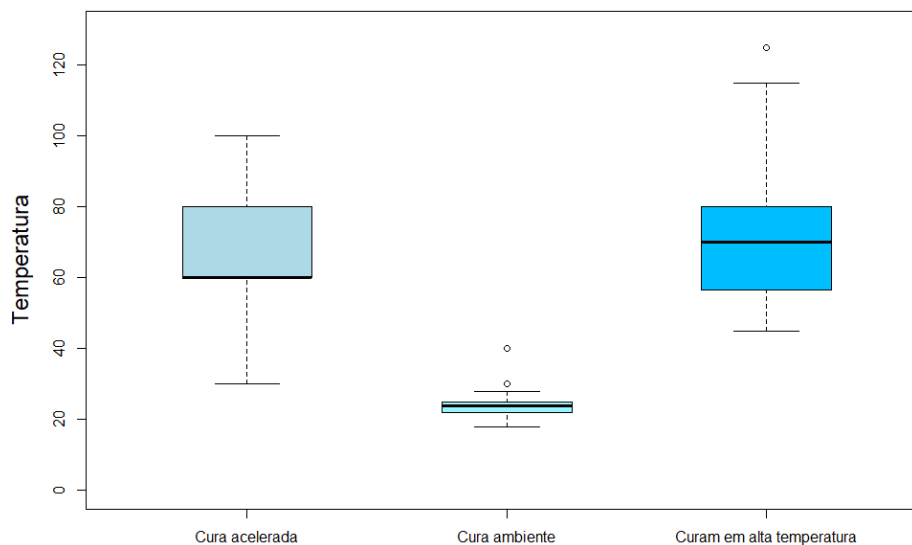
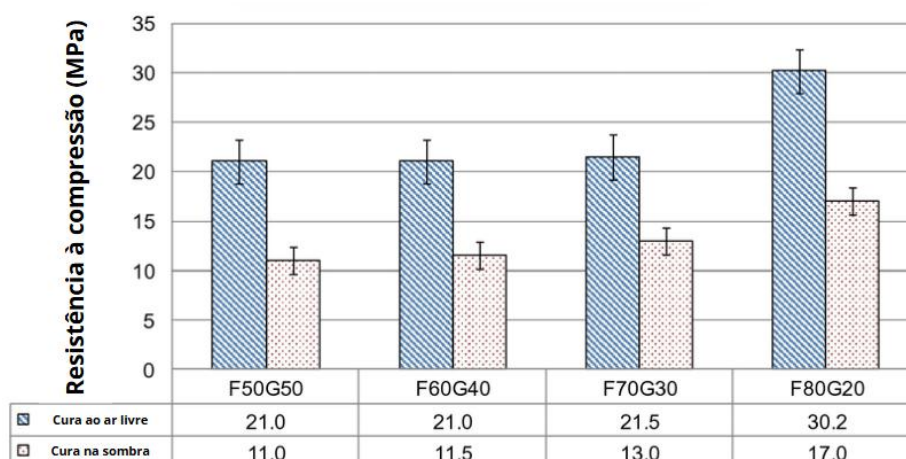


Figura 18 - Resistência a compressão para distintas condições de cura



Fonte: Mishra *et al.* (2022).

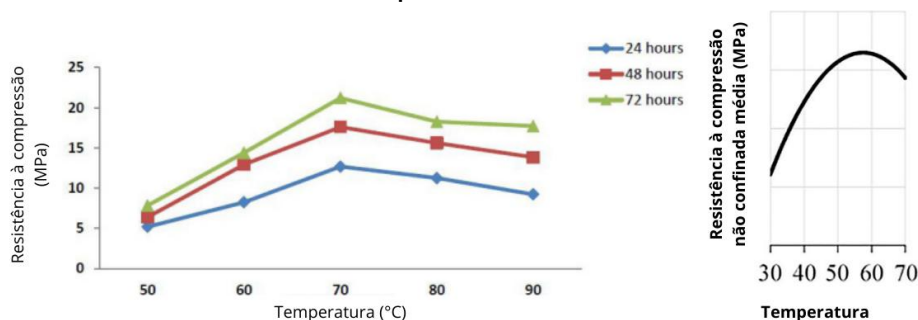
Quanto a cura acelerada, este procedimento consiste em curar nas primeiras horas, geralmente 24h, as amostras em temperaturas elevadas e em seguida curá-las a temperatura ambiente até a idade de teste. É relatado que tanto a dissolução quanto a policondensação dos geopolímeros são aceleradas quando são curados em altas temperaturas. Estudos mostram que misturas de geopolímeros com cura térmica acelerada possuem maior resistência à medida que ocorre o incremento da temperatura (Mahmoodi *et al.*, 2020, Maroto *et al.*, 2022; Idrees *et al.*, 2023). Maroto *et al.* (2022) ainda relatou que os materiais geopoliméricos tratados termicamente à 90 °C por 24h e 48h apresentaram minimização na eflorescência quando comparados com as amostras curadas a 60 °C.

No entanto, Abdelmawla *et al.* (2019) sintetizou geopolímeros a base de lodo de tratamento de água e caulim desaluminado e obteve efeitos distintos quando os geopolímeros foram curados por 24h, 48h e 72h em faixas de temperaturas de 50 °C a 90 °C. Nota-se pela Figura 19 que a resistência à compressão aos 28 dias de cura aumentou até uma temperatura limite de 70 °C, indicando um estímulo à reação de geopolimerização até este ponto. No entanto, em temperaturas maiores que 70 °C houve uma redução da resistência à compressão em razão da perda de água, resultando no aparecimento de pequenas fissuras. É possível perceber também que um aumento no tempo de cura acelerada em altas temperaturas pode resultar em melhores desempenhos mecânicos. Ferreira *et al.* (2023) observou que há um aumento na resistência a compressão não confinada quando a temperatura de cura se aproxima de 60 °C e após esse limite foi observado um efeito deletério. Os autores também atribuíram esse fenômeno à perda de água pelo ligante, que reduziu o meio necessário para que as reações ocorressem e consequentemente houve redução no desempenho mecânico.

O estudo de Si *et al.* (2020) investigou o efeito da temperatura de cura sobre os poros de geopolímeros feitos de metacaulim e resíduo de vidro. Descobriu-se que as amostras curadas a 60 °C por 24 horas apresentavam poros maiores e uma maior perda de massa por evaporação de água dos macroporos, em comparação com as amostras curadas a 23 °C. Isso sugere que a cura a temperaturas mais baixas permite que os produtos da reação preencham os poros mais eficientemente, resultando em uma estrutura menos porosa e mais tenaz. Porém, apesar da cura, temperaturas mais altas aceleram as reações, esse processo leva a uma estrutura mais porosa e desordenada, com produtos de reação de qualidade inferior, o que pode reduzir a resistência à compressão do material. Os autores também relatam as amostras curadas em altas temperaturas apresentaram menor retração por secagem, pois a quantidade de metacaulim não reagido em idades precoces foi reduzida devido a cura em altas temperaturas.

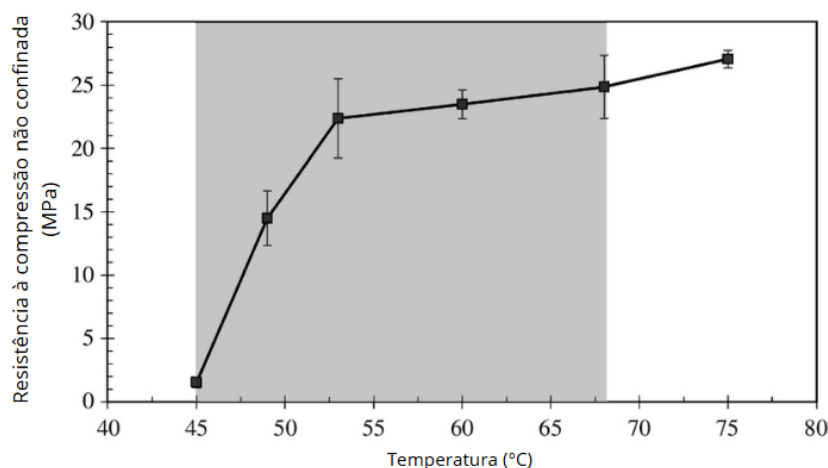
A abordagem em temperaturas elevadas por períodos maiores, geralmente até a idade de teste aos 7 e 28 dias é utilizada visando melhores desempenhos ou aplicações específicas. Geopolímeros a base de rejeitos de minas de cobre e escória com baixo teor de cálcio curados por 7 dias apresentou tendência de aumento da resistência mecânica com incremento da temperatura (Figura 20) (Manjarrez *et al.*, 2019).

Figura 19 - Efeito da cura acelerada no desempenho mecânico



Fonte: Abdelmawla *et al.* (2019) e Ferreira *et al.* (2023).

Figura 20 - Comportamento da resistência de amostras curados em temperaturas elevadas



Fonte: Manjarrez *et al.* (2019).

Segundo os autores este tipo de material curado a temperaturas altas pode ser usado como material de construção externa, como é o caso de pavimentos de concreto, em determinadas regiões como no Sudoeste dos Estados unidos em que temperaturas de até 70 °C podem ser atingidas na superfície do pavimento durante um dia normal de verão. No entanto, outros estudos com curas em altas temperaturas demonstram a existência de uma temperatura ideal que confere melhor desempenho aos materiais geopoliméricos, conforme relatado na seção anterior. É relatado que a diminuição da resistência à compressão ao ultrapassar a temperatura ótima de cura está associada à pega muito rápida das misturas que limita a dissolução adicional de fases amorfas e evita a transformação de uma estrutura difluente, ou seja, menos consolidada, para uma estrutura dura e mais compacta. Além disso, a cura em altas temperaturas pode levar a uma diminuição da resistência à compressão devido à formação de microfissuras e retração do gel geopolimérico, que ocorrem devido ao encolhimento e desidratação excessivos (Ulugol *et al.*, 2021).

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo investigar na literatura dos últimos cinco anos o uso de resíduos na produção de materiais geopoliméricos aplicáveis à construção civil. Constatou-se que:

- resíduos de várias fontes possuem potencial para serem usados como precursores. Os de origem industrial foram os mais observados nos estudos, principalmente a escória granulada de alto forno e cinzas volantes que são amplamente utilizados em conjunto com outros tipos de resíduos visando a descoberta de outras fontes de matérias primas. Outro destaque vai para o setor urbano com o uso de resíduos de construção e demolição;
- na composição química dos resíduos de diferentes fontes, os óxidos SiO_2 – Al_2O_3 – CaO desempenham papel essencial no desenvolvimento da matriz geopolimérica e consequentemente suas propriedades adquiridas. Os óxidos SiO_2 e Al_2O_3 são os mais importantes pois desempenham papel crucial na

- estruturação da rede tridimensional que se forma durante a ativação do geopolímero. Para ajuste da composição química, autores usam a estratégia de combinar resíduos de diferentes tipos;
- (c) o tamanho de partícula dos resíduos também possui papel relevante pois partículas menores são mais reativas e formam microestruturas mais uniformes e menos porosas afetando diretamente na resistência mecânica e durabilidade dos geopolímeros. Resíduos com $D_{50} = < 15 \mu\text{m}$ foi o mais observado nos estudos analisados;
 - (d) na escolha do ativador alcalino, diferentes tipos e combinações foram usadas, sendo que 79% dos estudos analisados optaram pela solução ativadora composta por NaOH e Na_2SiO_3 . Essa combinação é a mais utilizada porque o NaOH atua como meio alcalino, promovendo a ativação da reação de geopolimerização, enquanto o Na_2SiO_3 é geralmente empregado como fonte extra de sílica. Essa adição permite o ajuste das proporções essenciais dos geopolímeros, favorecendo a formação de uma estrutura mais resistente e estável;
 - (e) a maior alcalinidade da solução de NaOH pode aumentar a dissolução de Si e Al na reação de geopolimerização, no entanto se houver um excesso de NaOH pode resultar em propriedades indesejáveis. As concentrações mais observadas nos estudos foram de 8, 10 e 12 molar;
 - (f) a proporção entre $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ possui influência em propriedades como fluidez, consistência, tempo de pega, resistência à compressão, retração por secagem e eflorescência. A proporção em massa $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,5$ foi a mais observada nos estudos;
 - (g) três variações de métodos de cura foram identificadas: à temperatura ambiente, cura à temperatura elevada nas primeiras horas (cura acelerada) e cura somente em temperaturas elevadas. 70% dos estudos utilizaram a cura em temperatura ambiente visando igualar as propriedades de cura de geopolímeros à dos cimentos tradicionais, com variação de temperatura de 18 °C a 40 °C; e
 - (h) cerca de 94% dos trabalhos analisados utilizaram o método de síntese “two-part” (duas partes) na produção de geopolímeros. Embora o método de uma parte seja considerado mais seguro e tenha uma operação semelhante à do cimento convencional, ele apresenta desafios relacionados ao controle das propriedades dos geopolímeros, além de questões de sustentabilidade e custos na produção dos ativadores sólidos.

Referências

- ABADEL, A. *et al.* Investigation of alkali-activated slag-based composite incorporating dehydrated cement powder and red mud. **Materials**, v. 16, n. 4, p. 1551–1551, fev. 2023.
- ABDELMAWLA, M. *et al.* Compressive strength of geopolymeric cubes produced from solid wastes of Alum Industry and Drinking Water Treatment Plants. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 62, n. 12, p. 2331–2340, jun. 2019.
- ABDOLLAHNEJAD, Z. *et al.* Microstructural analysis and strength development of one-part alkali-activated slag/ceramic binders under different curing regimes. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 6, p. 3081–3096, fev. 2019.
- ABRÃO, P. C. R. A.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Efficiency of Portland-pozzolana cements: water demand, chemical reactivity and environmental impact. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118546, jun. 2020.
- ALMALKAWI, A.; BALCHANDRA, A.; SOROUSHIAN, P. Potential of using industrial wastes for production of geopolymer binder as green construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 516–524, set. 2019.
- ALMUTAIRI, A. L. *et al.* Potential applications of geopolymer concrete in construction: a review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00733, dez. 2021.
- ÁLVAREZ, R. I. *et al.* Alkali-activated and hybrid materials: alternative to Portland cement as a storage media for solar thermal energy. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, nov. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Vendas de cimento crescem 11% em 2020**. PORTAL ABCP. Disponível em: <https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-crescem-11-em-2020/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil** 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 25 set. 2024.

ÁVILA, Y.; SILVA, R.; BRITO, J. Alkali-activated materials with pre-treated municipal solid waste incinerator bottom ash. **Applied Sciences**, v. 12, n. 7, p. 3535–3535, mar. 2022.

AZAD, N. M.; SAMARAKOON, S. M. S. M. K. Utilization of industrial by-products/waste to manufacture geopolimer cement/concrete. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 873, jan. 2021.

BLOIS, L.; LAY-EKUAKILLE, A. Environmental impacts from atmospheric emission of heavy metals: A case study of a cement plant. **Measurement: Sensors**, v. 18, p. 100313, dez. 2021.

BRITO, W. da S. *et al.* Avaliação do comportamento reológica e mecânico de geopolímero sintetizado com reaproveitamento de resíduo. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, out. 2018.

BRITO, S. *et al.* Influência da concentração de naoh na síntese de geopolímero com reaproveitamento de resíduo industrial. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 16, n. 1, p. 45–50, jan. 2019.

BRITO, S.; RACANELLI, L.; SOUZA, J. Geopolimerização de lama vermelha: influência da concentração de naoh na síntese à temperatura ambiente. **Materia**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, jan. 2020.

CARDOZA, A.; COLORADO, H. A. Alkali-activated cement manufactured by the alkaline activation of demolition and construction waste using brick and concrete wastes. **Open Ceramics**, v. 16, p. 100438, 2023.

CARVALHO, T. *et al.* Evaluation of the potential of metakaolin, electric arc furnace slag, and biomass fly ash for geopolimer cement compositions. **Materials Proceedings**, v. 8, n. 61, mar. 2023.

CHUEWANGKAM, N. *et al.* Mechanical and dielectric properties of fly ash geopolimer/sugarcane bagasse ash composites. **Polymers**, v. 14, n. 6, p. 1140–1140, mar. 2022.

CORRALES, G. *et al.* Synthesis of an alternative hydraulic binder by alkali activation of a slag from lead and zinc processing. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 1, p. 375–388, jun. 2018.

DAS, S. *et al.* Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission: a review. **Materials Today: Proceedings**, dez. 2021.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. **Journal Thermal Analysis**, Saint Quetin, v. 37, n. 8, p. 1633–1656, ago. 1991.

FERREIRA, F. A. *et al.* Evaluation of mechanical and microstructural properties of eggshell lime/rice husk ash alkali-activated cement. **Construction and Building Materials**, v. 364, p. 129931–129931, jan. 2023.

FIGIELA, B. *et al.* Investigation of mechanical properties and microstructure of construction- and demolition-waste-based geopolymers. **Journal of Composites Science**, v. 6, n. 7, p. 191–191, jul. 2022.

HOSSAIN, S. S.; ROY, P. K.; BAE, C.-J. Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolimer: a review. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125218, dez. 2021.

HUSEIEN, G. *et al.* Effects of ceramic tile powder waste on properties of self-compacted alkali-activated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117574–117574, mar. 2020.

HUSEIEN, G.; SHAH, K. Performance evaluation of alkali-activated mortars containing industrial wastes as surface repair materials. **Journal of Building Engineering**, v. 30, p. 101234–101234, jul. 2020.

IDREES, M. *et al.* Preparation and performance optimization of eco-friendly geopolymers prepared from coarser lignite-based waste fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 391, p. 131804–131804, ago. 2023.

JAYANTHI, V. *et al.* Innovative use of micronized biomass silica-GGBS as agro-industrial by-products for the production of a sustainable high-strength geopolimer concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e01782–e01782, jul. 2023.

KRISHNA, R. S. *et al.* Industrial solid waste management through sustainable green technology: case study insights from steel and mining industry in Keonjhar, India. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 5243–5249, 2020.

KOMNITSAS, K. *et al.* Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. **Advanced Powder Technology**, v. 26, n. 2, p. 368–376, 2015.

- KUMAR DAS, S.; SHRIVASTAVA, S. A comparative study on the mechanical and acid resistance characteristics of ambient temperature-cured glass waste and fly ash-based geopolymeric masonry mortars. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, n. 11, p. 13399–13427, set. 2022b.
- KUMAR DAS, S.; SHRIVASTAVA, S. Influence of molarity and alkali mixture ratio on ambient temperature cured waste cement concrete based geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124380–124380, set. 2021.
- KUMAR DAS, S.; SHRIVASTAVA, S. Durability analysis and optimization of a binary system of waste cement concrete and glass-based geopolymer mortar. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 24, n. 4, p. 1281–1294, abr. 2022a.
- KWEK, S.; AWANG, H.; CHEAH, C. Influence of liquid-to-solid and alkaline activator (Sodium Silicate to Sodium Hydroxide) ratios on fresh and hardened properties of alkali-activated palm oil fuel ash geopolymer. **Materials**, v. 14, n. 15, p. 4253–4253, jul. 2021.
- LAN, T. *et al.* Use fly ash for the production of lightweight building materials. **Vietnam Journal of Earth Sciences**, v. 43, n. 3, jun. 2021.
- LIU, H. *et al.* Thermal stability of geopolymer modified by different silicon source materials prepared from solid wastes. **Construction and Building Materials**, v. 315, p. 125709–125709, jan. 2022.
- LIU, J. *et al.* Synthesis of geopolymer using municipal solid waste incineration fly ash and steel slag: Hydration properties and immobilization of heavy metals. **Journal of Environmental Management**, v. 341, p. 118053–118053, set. 2023.
- LIU, M. *et al.* Effect of ground concrete waste as green binder on the micro-macro properties of eco-friendly metakaolin-based geopolymer mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 68, p. 106191–106191, jun. 2023.
- LIU, M. *et al.* Reusing recycled powder as eco-friendly binder for sustainable GGBS-based geopolymer considering the effects of recycled powder type and replacement rate. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, p. 132656–132656, set. 2022.
- LIU, X.; LIU, E.; FU, Y. Reduction in drying shrinkage and efflorescence of recycled brick and concrete fine powder-slag-based geopolymer. **Applied Sciences**, v. 13, n. 5, p. 2997–2997, fev. 2023.
- LU, M. *et al.* Worldwide scaling of waste generation in urban systems. **Nature Cities**, v. 1, n. 2, p. 126–135, 2024.
- LUO, L. *et al.* Workability, autogenous shrinkage and microstructure of alkali-activated slag/fly ash slurries: Effect of precursor composition and sodium silicate modulus. **Journal of Building Engineering**, v. 73, p. 106712–106712, ago. 2023.
- LUUKKONEN, T. *et al.* One-part alkali-activated materials: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 21–34, jan. 2018.
- MADIRISHA, M. M.; DADA, O. R.; IKOTUN, B. D. Chemical fundamentals of geopolymers in sustainable construction. **Materials Today Sustainability**, v. 27, p. 100842, set. 2024.
- MAHMOODI, O. *et al.* Optimization of brick waste-based geopolymer binders at ambient temperature and pre-targeted chemical parameters. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122285–122285, set. 2020.
- MANJARREZ, L. *et al.* experimental study of geopolymer binder synthesized with copper mine tailings and low-calcium copper slag. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 8, ago. 2019.
- MAROTO *et al.* Alkaline activation of high-crystalline low-Al₂O₃ Construction and Demolition Wastes to obtain geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, p. 129770–129770, jan. 2022.
- MERCADO, Y. *et al.* Effect of the class c fly ash on low-reactive gold mine tailing geopolymers. **Polymers**, v. 14, n. 14, p. 2809–2809, jul. 2022.
- MIGUNTHANNA, J.; RAJEEV, P.; SANJAYAN, J. Investigation of waste clay brick as partial replacement of geopolymer binders for rigid pavement application. **Construction and Building Materials**, v. 305, p. 124787–124787, out. 2021.
- MISHRA, J. *et al.* Strength and microstructural characterization of ferrochrome ash- and ground granulated blast furnace slag-based geopolymer concrete. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 8, n. 1, p. 156–169, jan. 2022.

- MOHAMAD, N. *et al.* Environmental impact of cement production and Solutions: a review. **Materials Today: Proceedings**, mar. 2021.
- NAWAZ, M.; HEITOR, A.; SIVAKUMAR, M. Development and evaluation of a novel geopolymer based on basalt rock waste and ground granulated blast furnace slag. **Australian Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 2, p. 424-443, jul 2022.
- NAWAZ, M.; HEITOR, A.; SIVAKUMAR, M. Triaxial stress-strain behavior of a novel basalt rock waste and ground granulated blast furnace slag geopolymer. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 5, maio 2023.
- NUERNBERG, N.; NIERO, D.; BERNARDIN, A. Valorization of rice husk ash and aluminum anodizing sludge as precursors for the synthesis of geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126770–126770, maio 2021.
- OKOYE, F. N. Geopolymer binder: a veritable alternative to Portland cement. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 4, p. 5599–5604, 2017.
- OLIVEIRA, L. B. de *et al.* Durability of geopolymers with industrial waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00839, jun. 2021.
- OYEBISI, S. *et al.* Assessment of activity moduli and acidic resistance of slag-based geopolymer concrete incorporating pozzolan. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00394–e00394, dez. 2020.
- OZCELIKCI, E. *et al.* A comprehensive study on the compressive strength, durability-related parameters and microstructure of geopolymer mortars based on mixed construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 396, p. 136522–136522, abr. 2023.
- RACANELLI, L. *et al.* Uso de Rejeito de Lavagem de Bauxita para a Fabricação de Ligantes Geopoliméricos. **Materia**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, jan. 2020.
- RAUT, A. *et al.* Effects of agro-industrial by-products as alumina-silicate source on the mechanical and thermal properties of fly ash based-alkali activated binder. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e02070–e02070, jul. 2023.
- REN, B. *et al.* Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: a critical review. **Chemosphere**, v. 267, p. 128900, mar. 2021.
- SEGURA, I. *et al.* Comparison of one-part and two-part alkali-activated metakaolin and blast furnace slag. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 8, n. 4, p. 1816–1830, out. 2022.
- SEVIM, O. *et al.* Experimental evaluation of new geopolymer composite with inclusion of slag and construction waste firebrick at elevated temperatures. **Polymers**, v. 15, n. 9, p. 2127–2127, abr. 2023.
- SI, R. *et al.* Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118502–118502, jan. 2020.
- SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117455, mar. 2020.
- TAMBARA JÚNIOR, L. *et al.* Effect of bottom ash waste on the rheology and durability of alkali activation pastes. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00790–e00790, jun. 2022.
- TAN, J.; CAI, J.; LI, J. Recycling of unseparated construction and demolition waste (UCDW) through geopolymer technology. **Construction and Building Materials**, v. 341, p. 127771–127771, jul. 2022.
- TASHIMA, M. M. *et al.* New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC). **Materials Letters**, v. 80, p. 50–52, ago. 2012.
- THOMAS, B. S. *et al.* Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: a comprehensive review. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102332, ago. 2021.
- ULUGOL, H. *et al.* Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124358–124358, jan. 2021.
- VAFAEI, M.; ALLAHVERDI, A. High strength geopolymer binder based on wasteglass powder. **Advanced Powder Technology**, v. 28, n. 1, p. 215–222, jan. 2017.

VAF AEI, M.; ALLAHVERDI, A. Strength development and acid resistance of geopolymer based on waste clay brick powder and phosphorous slag. **Structural Concrete**, v. 20, n. 5, p. 1596–1606, maio 2019.

WANG, J. *et al.* Assessment of recycling use of GFRP powder as replacement of fly ash in geopolymer paste and concrete at ambient and high temperatures. **Ceramics International**, v. 48, n. 10, p. 14076–14090, maio 2022.

WILLSON-LEVY, R. *et al.* Development of One-part geopolymers based on industrial carbonate waste. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130009–130009, fev. 2023.

XU, F. *et al.* Characterization and performance evaluation of geopolymer prepared with thermal-mechanical activated aluminum sulfate residue. **Construction and Building Materials**, v. 384, p. 131454–131454, jun. 2023.

ZAKIRA, U. *et al.* Development of high-strength geopolymers from red mud and blast furnace slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 383, p. 135439–135439, jan. 2023.

ZAREECHIAN, M. *et al.* Advancements in cleaner production of one-part geopolymers: a comprehensive review of mechanical properties, durability, and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 409, p. 133876–133876, dez. 2023.

ZHANG, N. *et al.* Including class f fly ash to improve the geopolymerization effects and the compressive strength of mine tailings-based geopolymer. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 11, nov. 2022.

ZHENG, C. *et al.* Characteristics and microstructures of the GFRP waste powder/GGBS-based geopolymer paste and concrete. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 61, n. 1, p. 117–137, jan. 2022.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento da bolsa de Iniciação Científica (Processo 2023/05899-3).

Izabelly Thaynara Miranda Lage

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Ciências do Mar | Universidade Federal de São Paulo | Rua Carvalho de Mendonça, 144, Vila Belmiro | Santos - SP - Brasil | CEP 11070-100 | E-mail: izabelly.thaynara@unifesp.br

Juliana Petermann Moretti

Conceitualização, Análise de dados, Metodologia, Supervisão, Validação de dados, Redação - revisão e edição.

Departamento de Ciências do Mar | Universidade Federal de São Paulo | E-mail: juliana.moretti@unifesp.br

Editor: Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.