

CAPÍTULO 7

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

Vitor Fonseca Costa

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

Rafael Dors Sakata

DACOC-CT/UTFPR
rafaelSakata@gmail.com

Douglas Queiroz Francisco

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

Alisson Passos Lopes

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

Danieli Martins do Carmo

DEQ/IT/UFRRJ
danielimcarmo@hotmail.com

Antonieta Middea

CETEM/UFRJ
amiddea@cetem.gov.br

Everton Rangel Bispo

UNISUAM
prof.evertonrangel@gmail.com

Renata Nunes Oliveira

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

Antonio Renato Bigansolli

DEQ/IT/UFRRJ
bigansolli@ufrj.br

RESUMO

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

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

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

INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

METODOLOGIA

Tipo e abordagem da pesquisa

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

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

Estratégia de busca e critérios de inclusão/exclusão

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

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

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

Análise e classificação em eixos temáticos

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

Estruturação da comparação entre concretos geopoliméricos e concretos de cimento Portland

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

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

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

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

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

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

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

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

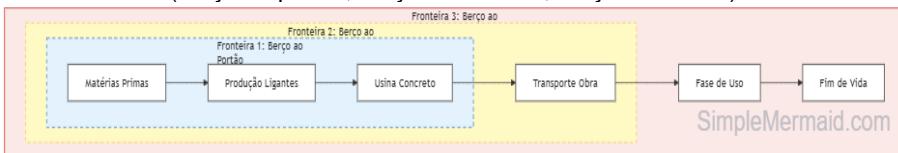
Fonte: adaptado de Tang; Pignatta; Sepasgozar (2021).

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

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

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

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



Fonte: Elaborado pelo Autor

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

Tabela 3 – Métodos e categorias de impacto consideradas

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

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

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

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

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

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

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

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

Tratamento dos dados e análise

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

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

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

Limitações metodológicas

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

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Síntese dos resultados de desempenho mecânico

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

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

Faixas observadas de resistência à compressão

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

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

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

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

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

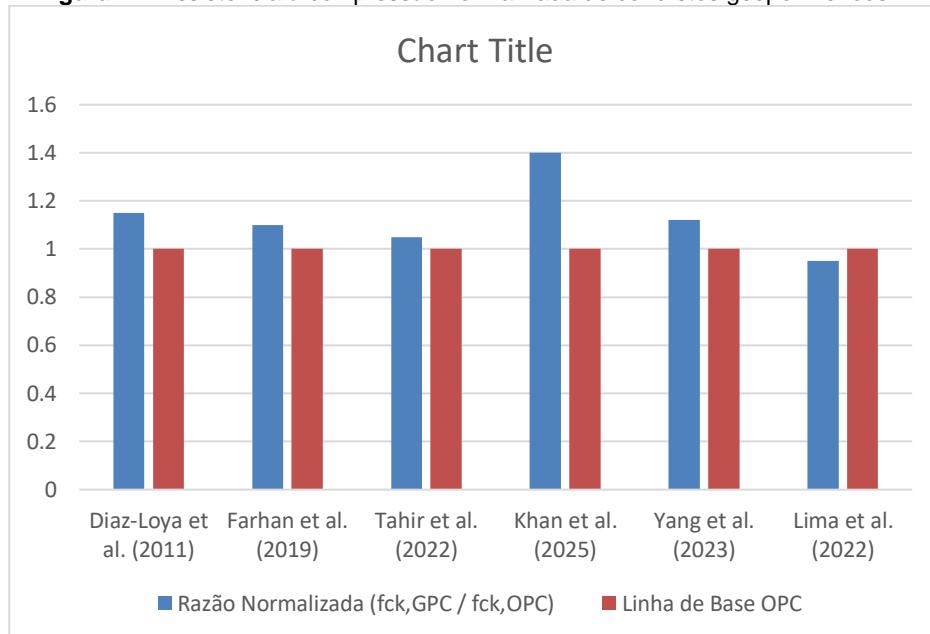
Tabela 5 – Resistência à compressão de concretos geopoliméricos de cinza volante em estudos internacionais selecionados

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

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

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 2 – Resistência à compressão normalizada de concretos geopoliméricos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Comparação com concretos de cimento Portland em níveis equivalentes

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

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

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

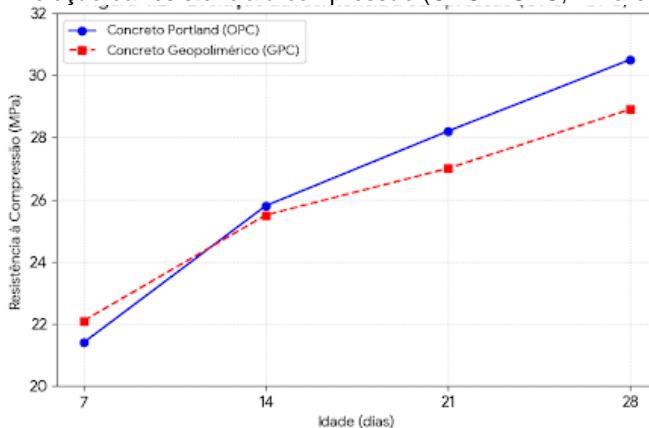
A Tabela 6 organiza, a partir dos dados de Lima *et al.* (2022), a comparação direta entre a evolução da resistência de concretos Portland e geopoliméricos em diferentes idades, enquanto a Figura 1.2 representa graficamente essa evolução, permitindo visualizar a diferença de cinética entre os dois sistemas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

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

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

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

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



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

Módulo de elasticidade e deformabilidade

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

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

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

Implicações estruturais para dimensionamento

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

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

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

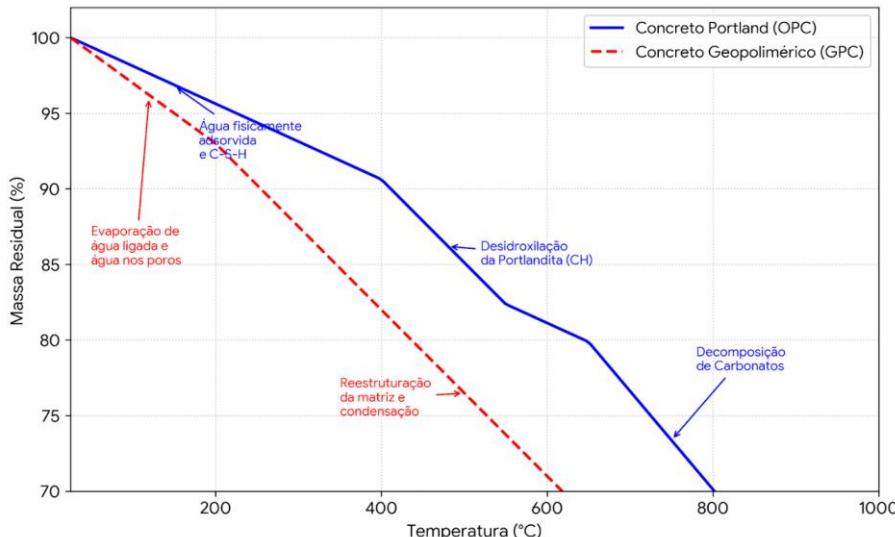
Durabilidade e resistência ao fogo

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

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

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

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



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

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

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

Fonte: elaboração própria.

Durabilidade em ambientes agressivos

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

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

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

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

Resistência residual após exposição a altas temperaturas

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

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

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

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

Comparação com requisitos normativos de resistência ao fogo

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

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

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

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

Emissões de CO₂ e indicadores de ACV

Resultados de ACV para concreto Portland

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

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

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

Resultados de ACV para concreto geopolimérico de cinza volante

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

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

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

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

Intervalos típicos de redução de CO₂ e variáveis chave

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

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

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

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

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

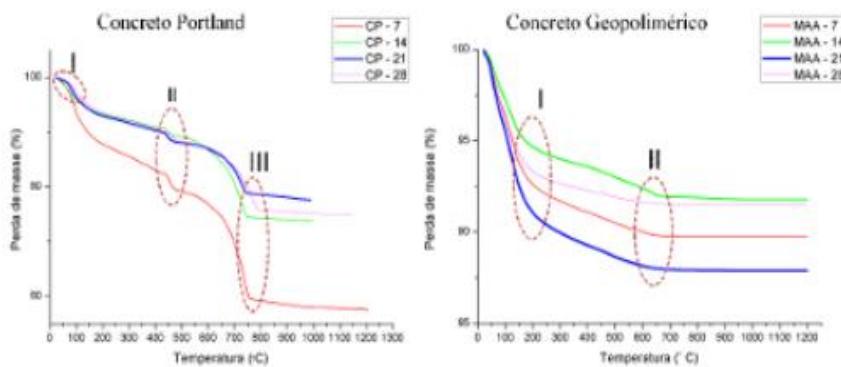
Embora as emissões de CO₂ constituam o indicador mais visível da discussão sobre concretos de baixo carbono, os estudos de ACV que tratam de geopolímeros de cinza volante raramente se limitam ao aquecimento global. Trabalhos que aplicam métodos midpoint e endpoint, como ReCiPe, e que incluem categorias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

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

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

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

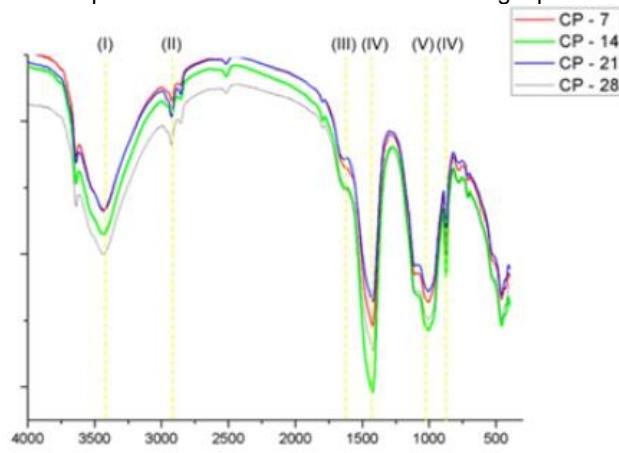
Figura 3– Difratogramas de DRX de concretos Portland e geopoliméricos



Fonte: Lima, 2022

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

Figura 4 – Espectros FTIR de concretos Portland e geopoliméricos



Fonte: Lima, 2022

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

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

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

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

Fonte: adaptado de Lima (2022).

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

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

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

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

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

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

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

Trade-offs entre durabilidade, resistência ao fogo e emissões

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

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

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

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

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

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

Comparação global dos cenários: quando o concreto geopolimérico é vantajoso

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

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

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

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

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

Potencial de adoção em larga escala no contexto brasileiro

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

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

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

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

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

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

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

Síntese crítica e proposição de agenda futura

Principais achados da revisão

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

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

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

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

Lacunas que permanecem

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

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

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

plenamente consistente para orientar decisões de investimento em larga escala.

Linhos de pesquisa futuras

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

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

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

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

Respostas à questão de pesquisa

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

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

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

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

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

Fonte: Elaborado pelo Autor

Avaliação da hipótese à luz dos resultados

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

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

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

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

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

Considerações sobre viabilidade técnica, ambiental e normativa

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

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

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

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

Recomendações para a prática profissional e para políticas públicas

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

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

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

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

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

Fonte: Elaborado pelo Autor

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

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

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

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

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

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, R. C. C. **Elaboração e análise de viabilidade de projeto arquitetônico unifamiliar com conceitos sustentáveis integrados.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

ABRANTES, R. C. C. et al. **Pegada de carbono como ferramenta para alcançar a sustentabilidade na construção: estudo de caso em uma fundação de uma residência unifamiliar.** In: II Congresso Luso-brasileiro de Materiais de Construção Sustentável, 2016, João Pessoa. Anais [...]. João Pessoa: UFPB, 2016.

AGUILAR, M. T. P.; GUMIERI, A. G.; VASSALO, E. A. S. **Caracterização microestrutural do geopolímero obtido de metacaulim rico em ferro.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS (CBECIMAT), 21., 2014, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá, MT, 2014. p. 598-605.

AMRAN, M.; DEBBARMA, S.; OZBAKKALOGLU, T. **Fly ash-based eco-friendly geopolymers concrete: a critical review of the long-term durability properties.** Construction and Building Materials, v. 270, p. 121857, 2021.

ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto.** Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2002.

ARNAUD, B. K. L. **Avaliação de desempenho de blocos pré-moldados de material alcalinamente ativado aplicado ao telhado verde.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

ASSI, L. N. et al. **Sustainable concrete: building a greener future.** Journal of Cleaner Production, v. 198, p. 1641-1651, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** São Paulo, 2002. Disponível em: http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf. Acesso em: 25 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: concreto de cimento Portland – preparo, controle e recebimento – procedimento.** Rio de Janeiro, 2006.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- NEUPANE, K. **Evaluation of environmental sustainability of one-part geopolymers binder concrete**. Cleaner Materials, v. 6, p. 100138, 2022.
- ÖZBAYRAK, A.; KUCUKGONCU, H. **Equivalent stress block parameters for fly ash-based geopolymers concrete structural elements**. Structural Concrete, v. 26, n. 2, p. 1988-2016, 2025.
- PALOMO, A. et al. **Alkali-activated fly ashes: a cement for the future**. Cement and Concrete Research, v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.
- PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. **Geopolymers and related alkali-activated materials**. Annual Review of Materials Research, v. 44, p. 299-327, 2014.
- PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (ed.). **Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM**. Dordrecht: Springer, 2014.
- PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (ed.). **Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications**. Oxford: Woodhead Publishing; Boca Raton: CRC Press, 2009.
- QAIDI, S. et al. **Fly ash-based geopolymers composites: a review of the compressive strength and microstructure analysis**. Materials, v. 15, n. 20, p. 7098, 2022.
- ROMANO, R. C. O. et al. **Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita**. Cerâmica, v. 62, n. 363, p. 215-223, 2016.
- SBAHIEH, S.; MCKAY, G.; AL-GHAMDI, S. G. **Comprehensive analysis of geopolymers materials: properties, environmental impacts, and applications**. Materials, v. 16, n. 23, p. 7363, 2023.
- SCHNEIDER, M. et al. **Sustainable cement production: present and future**. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 7, p. 642-650, 2011.
- SHI, X. et al. **Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymers concrete**. Materials, v. 14, n. 23, p. 7375, 2021.
- SIDDIQ, M. U. et al. **AI-driven optimization of fly ash-based geopolymers concrete for sustainable high strength and CO₂ reduction: an application of hybrid Taguchi-Grey-ANN approach**. Buildings, v. 15, n. 12, p. 2081, 2025.
- SIMAPRO. **Life cycle assessment software**. 2020. Disponível em: <https://network.simapro.com/pre/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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