



Avaliação de geopolímero de alta resistência com base vítrea

Evaluation of high-strength glass-based geopolymer

Thiago Carlos Campos Ferreira Santos¹, Isabelle Aparecida Costa²,
Ricardo Schneider³

RESUMO

O setor da construção civil depende fortemente de cimento e areia. A extração global de areia, e produção de cimento, levantam preocupações sobre o esgotamento das reservas naturais. O estudo em questão teve como objetivo desenvolver e caracterizar um novo geopolímero. Ademais busca a superação dos desafios relacionados ao descarte e reciclagem de resíduos vítreos. Como precursor, o pó de vidro foi obtido através da reserva de pesquisa mantida na UTFPR - Toledo. Para formulação do ativador alcalino, como fonte de dióxido de silício foi utilizado o produto cristais de sílica para higienização de pets, comprado no comércio regular da cidade de Toledo-PR, e o hidróxido de sódio obtido na reserva citada anteriormente. Através de ensaios de bancada, foi determinado a solução alcalina, gerada pela diluição do dióxido de silício e do hidróxido de sódio, a mistura entre a solução alcalina e o pó de vidro foram balizados pelas normas brasileiras e sua razão também foi determinado a partir de ensaios de bancada, resultando em corpos de prova com resistência à compressão com média acima de 30 MPa. Demonstrando assim um campo vasto para pesquisa de novos materiais para fomentar um ciclo econômico baseado em resíduos sólidos urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Geopolímero; Materiais da construção civil; Resíduo vítreo em pó; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The construction sector heavily relies on cement and sand. Global sand extraction and cement production raise concerns about the depletion of natural reserves. The aim of this study was to develop and characterize a novel geopolymer, addressing challenges related to glass waste disposal and recycling. Glass powder precursor was sourced from the research repository at UTFPR - Toledo. For the alkali activator formulation, pet hygiene silica crystals, commercially acquired in Toledo-PR, were used as a source of silicon dioxide, along with sodium hydroxide obtained from the previously mentioned repository. Through bench-scale tests, the alkaline solution generated by diluting silicon dioxide and sodium hydroxide was determined. The mixture of the alkaline solution with the glass powder was guided by Brazilian standards, and the ratio was also determined through bench-scale tests, resulting in compression strength test specimens with an average exceeding 30 MPa. This demonstrates a wide research scope for the development of new materials to foster an economic cycle based on urban solid waste.

KEYWORDS: Geopolymer; Construction materials; Waste glass powder; Sustainability.

¹ Bolsista da Fundação Araucária - Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil. E-mail: thiago.2017@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2204958153452178>.

² Discente do Programa de Pós-Graduação em Processos Químicos e Biotecnológicos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil. E-mail: isabellecosta.iac@gmail.com. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8830272036270453>.

³ Docente no Curso de Tecnologia em Processos Químicos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil. E-mail: rschneider@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0680583757403350>.



INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é fortemente dependente da combinação de cimento e areia. No entanto, essa demanda crescente tem levado a uma extração maciça, no caso da areia estima-se em cerca de 50 bilhões de toneladas globalmente (BENDIXEN et al., 2019), o que suscita preocupações de que as reservas naturais possam se esgotar já no próximo século. Já o relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do cimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2021), aponta para uma produção em 2021 de mais de 65 mil toneladas de cimento em território nacional, além de se utilizar de fontes finitas, a produção do cimento emite mais de 8 % do CO₂ presente na atmosfera (HUNTZINGER; EATMON, 2009).

O vidro é amplamente utilizado, mas seu descarte inadequado gera impacto ambiental devido à sua longa durabilidade no ambiente. Estudos científicos mostram que sua degradação pode levar centenas a milhares de anos. A reciclagem e gestão eficiente são cruciais para reduzir acumulação em aterros e minimizar seu impacto negativo.

Segundo o Relatório Anual de 2022 - Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, gerado pela ABRELPE (ABRELPE, 2022), a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil foi de mais de 76 milhões de toneladas no ano de 2022, com pouco mais de 46 milhões de toneladas desses resíduos tendo uma disposição adequada. O documento ainda traz os números e metas progressivas com relação à logística reversa, onde, pouco mais de 34 mil toneladas de embalagens de vidros foram recuperadas. A ecologia Industrial, mais conhecida como economia circular que busca aprender com os sistemas naturais e propõe a reestruturação dos processos produtivos e o design de produtos de forma a minimizar o uso de recursos naturais e promover a reciclagem de resíduos e subprodutos. A simbiose industrial é um conceito relacionado que envolve a integração de indústrias distintas para otimizar o consumo de matéria e energia, reduzir a geração de resíduos e diminuir o impacto ambiental (FOSTER; ROBERTO; IGARI, 2016). A Economia Circular tem como objetivo transformar o sistema econômico linear (ou seja, um sistema que tem começo, meio e fim) em um sistema circular, em que os recursos naturais são reciclados nas cadeias de valor, diminuindo a extração de recursos e a produção de resíduos.

A Economia Circular visa eliminar a sociedade do descarte e promover a utilização sustentável dos recursos. Com o objetivo de reduzir as emissões de CO₂, têm surgido esforços científicos para desenvolver ligantes alternativos ao Cimento Portland, que é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂ provenientes de atividades humanas (SANTANA-CARRILLO; BURCIAGA-DÍAZ; ESCALANTE-GARCIA, 2022). Essas pesquisas visam encontrar soluções que ofereçam opções de ligantes com menor impacto ambiental.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar um novo geopolímero buscando substituir compostos cimentícios, visando contribuir para a compreensão da viabilidade e potencial aplicação desse material na construção civil, abrindo caminho para futuros estudos e aprimoramentos. Ademais busca a superação dos desafios relacionados ao descarte e reciclagem de resíduos de vidro.



MATERIAIS E MÉTODOS

PÓ DE VIDRO

O Pó de vidro foi obtido através da reserva de pesquisa mantida na UTFPR - Toledo, que provêm da moagem de vidros de garrafa de cerveja da coloração âmbar, provenientes de resíduos vítreos recolhidos pela Associação dos Catadores de Materiais Recicláveis de Toledo, que funciona em estrutura cedida pelo governo municipal, anexa ao Aterro Sanitário. Para realização dos ensaios, selecionou-se a faixa granulométrica retida na peneira de abertura de $75 \mu\text{m}$, essa escolha é justificada por estudos da produção de geopolímeros, devido à maior área de superfície específica dessas partículas, o que facilita a interação com a solução alcalina e promove uma maior eficiência na formação do aglomerante (LIU et al., 2019; JIANG et al., 2019). Além disso, essas partículas são compostas por aluminossilicatos reativos, responsáveis pela matriz sólida do geopolímero.

A metodologia adotada para aferir a granulometria do Pó de Vidro neste estudo baseia-se na técnica de caracterização *Static Laser Scattering* para determinação da distribuição de tamanho das partículas. A determinação da massa específica foi levantada pelo ensaio do frasco de Chapman.

ATIVADOR ALCALINO

Como fonte de Dióxido de silício, foi comprado em um comércio regular na cidade de TOLEDO-PR cristais em sílica para higienização de pets, e a fonte de hidróxido de sódio, foi obtido através da reserva de materiais do campus. Foram realizados testes de bancada avaliando a trabalhabilidade para se fixar a razão entre os cristais de sílica (SiO_2) e NaOH, fixando a razão Si/Na em 2. A produção do ativador foi realizada através de um agitador mecânico, até formar uma película leve na superfície do silicato.

PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O preparo do geopolímero foi normatizado pela NBR 16541 (ABNT, 2016), após a modelagem dos corpos de prova, foram mantidos em temperatura ambiente durante 20 horas, e então, levados à estufa para uma cura térmica de 48 horas em uma temperatura de 50°C juntos ao molde ainda. Assim, desmoldados e mantidos em temperatura ambiente por mais 48 horas. A cura térmica facilita o endurecimento e formação do aglutinante de aluminossilicato alcalino (REDDEN; NEITHALATH, 2014). O traço do geopolímero se deu pela Tabela 1. Com a sobra do geopolímero, foi moldado um corpo de prova menor, para aferir sua densidade aparente após a cura térmica, calculando sua massa pelo volume apresentado.

Tabela 1 – Traço do geopolímero.

NaOH	SiO_2	H_2O	Ativador produzido	Pó de vidro utilizado	Si/Na	Líquido/Sólido
212,5	425	850,5	1419,58	2500	2	0,57



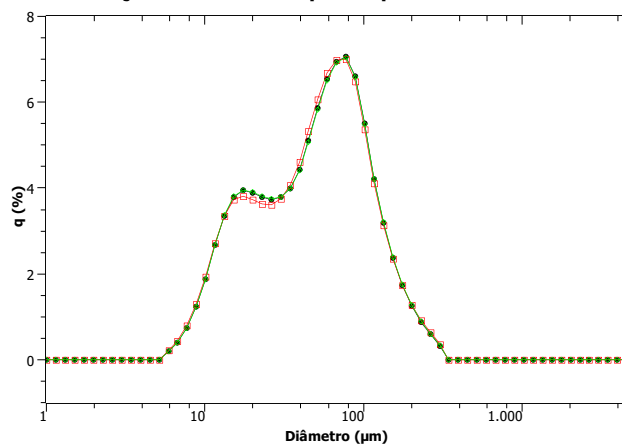
ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os corpos de prova foram moldados seguindo as normativas da NBR 7215 (ABNT, 1996). O estudo de rompimento dos mesmos foi realizado pela Máquina Universal de Ensaio (EMIC / Linha DL-30000) do laboratório de materiais, recolhido material para o ensaio de Difração de Raio-X (DRX) e os corpos de provas rompidos, foram levados à marmoraria, para retirada de lâminas que foram utilizadas na Microscopia óptica por Reflectância.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de distribuição do tamanho de partícula por dispersão à laser demonstrada na Figura 1, aponta para um tamanho médio de partícula de $48 \mu\text{m}$, com uma distribuição granulométrica muito próxima do que é a do Cimento Portland Comum, demonstrando uma reatividade semelhante entre os dois. A massa específica do cimento que é um valor de $3,14 \text{ g/cm}^3$ (ILLSTON; DOMONE, 2001), enquanto o pó de vidro apresentou uma massa específica de $2,46 \text{ g/cm}^3$. Outro índice observado foi a densidade aparente do corpo de prova gerado, o volume foi de $119,88 \text{ cm}^3$ e a massa de $223,28$ gramas, chegando em uma densidade aparente de $1,86 \text{ g/cm}^3$ enquanto comumente se usa $2,5 \text{ g/cm}^3$ para o cálculo do Concreto armado, demonstrando uma natureza muito menos densa que a do concreto armado.

Figura 1 – Análise de distribuição de tamanho por espalhamento à laser do pó de vidro residual

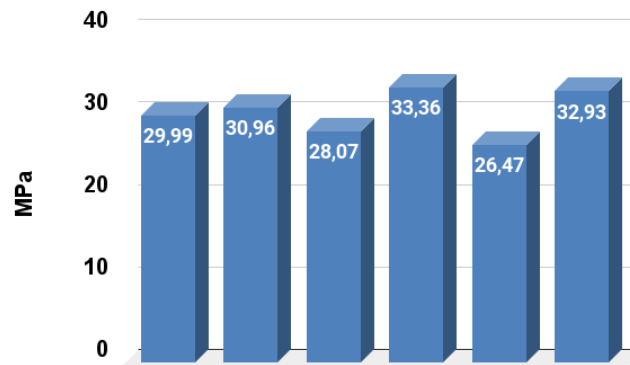


Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados do ensaio à compressão (Figura 2) para seis corpos de provas apresentam uma média de $30,30 \text{ MPa}$ aos 5 dias, demonstrando um período de cura rápido e podendo ser comparado com o Cimento ARI, de alta resistência as idades iniciais, e apresentando uma resistência superior as resistências comumente adotadas para estruturas, como FCK 25 que se refere à uma resistência de 25 MPa aos 28 dias. Os resultados demonstram um grande potencial para futuros estudos para caracterização dessa pasta (vidro+geopolímero), e aplicação em nichos estruturais como contravergas por exemplo.

O resultado obtido através o DRX na Figura 3 demonstra uma estrutura amorfa, ou seja, sem formação de fases cristalinas do produtos de reação pela falta de picos aguçados. Em 5 dias, as

Figura 2 – Resistência à compressão aferida pela NBR 7215, do geopolímero



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3 – Ensaio de Difratoimetria de Raio x de pó para o geopolímero-vítro após 5 dias.

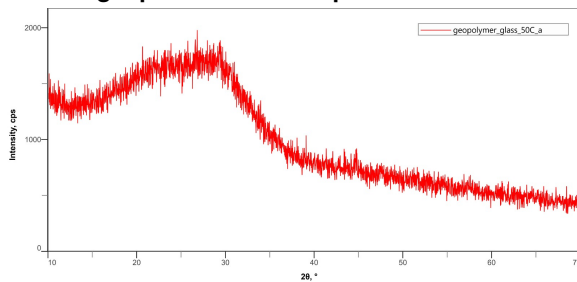
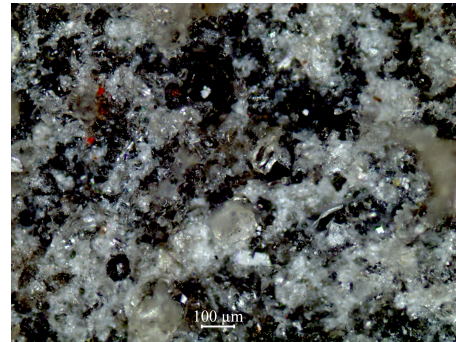


Figura 4 – Microscopia óptica por Reflectância, apresentando uma morfologia vítrea



Fonte: Autoria própria (2023).

reações necessárias para se apresentar picos podem não terem sido completadas, abrindo espaço para estudos que apresentem uma gama maior de idades para possível observação de fases.

A Figura 4 reforça ainda mais esse cenário, demonstrando uma estrutura muito parecida com um vidro, uma estrutura amorfa, demonstrando poros com 100 μm de espessura, lembrando uma rocha.

CONCLUSÕES

Em suma, foi possível desenvolver um material aglutinante para o vidro, proveniente de resíduos. O material proposto permite a obtenção de corpos de prova com características mecânicas satisfatórias com um tempo de cura curto. O resíduo vítreo pode ser aplicado em condições simples e apresentando características tradicionais como uma densidade aparente $2,46 \text{ g/cm}^3$. Além disso, os corpos de prova foram obtidos com uma granulometria semelhante a do cimento portland com um tamanho médio da partícula de $48 \mu\text{m}$ e sem a necessidade de qualquer tratamento especial para obtenção dos corpos de prova. A granulometria empregada pode ser obtida com processos clássicos sem equipamentos sofisticados para redução do tamanho de partícula. O geopolímero formado com densidade $1,86 \text{ g/cm}^3$ conferindo uma resistência à compressão de $30,30 \text{ MPa}$ aos 5 dias e uma estrutura amorfa.



REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 16541 – ARGAMASSA PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS - PREPARO DA MISTURA PARA A REALIZAÇÃO DE ENSAIOS**. Rio de Janeiro, set. 2016. P. 2.
- ABNT. **NBR 7215 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996. P. 8.
- ABRELPE. **Relatório Anual de 2022 - Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, jan. 2022. Disponível em: [🔗](#).
- BENDIXEN, Mette et al. Time is running out for sand. **Nature**, Springer Science e Business Media LLC, v. 571, n. 7763, p. 29–31, jul. 2019. DOI: [10.1038/d41586-019-02042-4](#). Disponível em: [🔗](#).
- FOSTER, Allan; ROBERTO, Samanta Souza; IGARI, Alexandre Toshiro. **ECONOMIA CIRCULAR E RESÍDUOS SÓLIDOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A EFICIÊNCIA AMBIENTAL E ECONÔMICA**. [S.l.: s.n.], 2016. Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. Disponível em: [🔗](#).
- HUNTZINGER, Deborah N.; EATMON, Thomas D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 17, n. 7, p. 668–675, mai. 2009. DOI: [10.1016/j.jclepro.2008.04.007](#). Disponível em: [🔗](#).
- ILLSTON, J. M.; DOMONE, P. L. J. **Construction Materials: Their nature and behaviour**. USA: Spon Press, 2001. v. 13, cap. 13, p. 96.
- JIANG, Yi et al. A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. **Journal of Environmental Management**, Elsevier BV, v. 242, p. 440–449, jul. 2019. DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.04.098](#). Disponível em: [🔗](#).
- LIU, Yiwei et al. An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier BV, v. 144, p. 297–309, mai. 2019. DOI: [10.1016/j.resconrec.2019.02.007](#). Disponível em: [🔗](#).
- REDDEN, Rachel; NEITHALATH, Narayanan. Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier BV, v. 45, p. 46–56, jan. 2014. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2013.09.011](#). Disponível em: [🔗](#).
- SANTANA-CARRILLO, J.L.; BURCIAGA-DÍAZ, O.; ESCALANTE-GARCIA, J.I. Blended limestone-Portland cement binders enhanced by waste glass based and commercial sodium silicate - Effect on properties and CO2 emissions. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier BV, v. 126, p. 104364, fev. 2022. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2021.104364](#). Disponível em: [🔗](#).
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual de 2021**. São Paulo, jan. 2021. Disponível em: [🔗](#).