

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/427

Uso de Resíduos de Pó de Vidro em Estabilização de Solo Argiloso – Revisão

Claudia Regina Bernardi Baldin

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Curitiba, Brasil, claudiabaldin@utfpr.edu.br

Weiner Gustavo Silva Costa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Curitiba, Brasil, weiner.ufrb@gmail.com

Vitor Baldin

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (Departamento de Engenharia Mecânica), Pato Branco, Brasil, vbaldin@utfpr.edu.br

Ronaldo Luis dos Santos Izzo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

RESUMO: A estabilização do solo melhora as características mecânicas e a durabilidade da estrutura, no entanto, pode ter um impacto ambiental prejudicial e aumentar o consumo de energia. Um dos métodos mais utilizados atualmente na estabilização de solos é o uso de cimento Portland. A indústria cimenteira causa efeitos ambientais destrutivos mediante o consumo excessivo de combustíveis fósseis e alta emissão de gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono (CO₂). Recentemente, muitos pesquisadores usaram diferentes tipos de resíduos industriais para estabilizar solos de granulação fina, sendo o pó de vidro reciclado uma das alternativas promissoras para o setor da engenharia geotécnica. Dessa forma, o uso de pó de vidro reciclado foi revisto na estabilização de solos de granulação fina neste artigo de revisão. O documento mostra que o pó de vidro é ideal para uso como material adicional ao solo, apresentando melhora nos valores de massa específica aparente seca máxima, resistência ao cisalhamento, limites de Atterberg, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e resistência à compressão não confinada (RCC).

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de Solos, Solos de granulação fina, pó de vidro, propriedades mecânicas.

ABSTRACT: Soil stabilization improves the mechanical characteristics and durability of the structure; however, it can have a harmful environmental impact and increase energy consumption. Portland cement is one of the most widely used methods currently in soil stabilization. The cement industry causes destructive environmental effects through excessive consumption of fossil fuels and high emissions of greenhouse gases, especially carbon dioxide (CO₂). Recently, many researchers have used different types of industrial waste to stabilize fine-grain soils, and recycled glass powder is one of the promising alternatives for the geotechnical engineering sector. Thus, recycled glass powder has been reviewed in this article for fine-grained soil stabilization. The document shows that glass powder is ideal for use as an additional material to the soil, showing improvement in apparent maximum dry specific mass values, shear strength, Atterberg limits, California Bearing Ratio (CBR), and unconfined compressive strength (UCS).

KEYWORDS: Soils Stabilization, fine-grained soils, Glass Powder, Mechanical Properties.

1 INTRODUÇÃO

A estabilização do solo tem como definição para a engenharia, melhorar as propriedades geotécnicas e de engenharia dos solos, como resistência mecânica, permeabilidade, compressibilidade, durabilidade e

plasticidade (Behnood, 2018). Embora o uso de cimento seja uma forma eficaz de melhorar o desempenho do solo, ele causa sérios problemas ambientais, como a produção de gases de efeito estufa (Gregory et al., 2021). Bilondi et al. (2018) citam que a indústria de fabricação de cimento produz aproximadamente 5% - 8% da poluição global, causada pela emissão de CO₂. Além disso, grande quantidade de minerais naturais é utilizada durante o processo de fabricação do cimento (Li et al., 2019).

Portanto, os pesquisadores estão sempre em busca de métodos mais ecológicos e adequados para substituir o cimento Portland comum como estabilizador de solo. Uma das alternativas para a substituição do cimento é a utilização de pó de vidro. A produção de vidro no mundo é de cerca de 180 milhões de toneladas/ano e cresce a uma taxa de 2 a 4% ao ano (Bilgen, 2020a). Para Consoli et al. (2019), o pó de vidro reciclado é uma solução sustentável para a estabilização de solos. As estabilizações de solos finos com adição de pó de vidro podem não apenas reduzir o custo de construção e reduzir os problemas ambientais, mas também melhorar as propriedades mecânicas dos solos (Ramezani et al., 2023). A ductilidade e resistência de um solo argiloso foram aumentadas usando geopolímeros de pó de vidro reciclado (Bilondi et al., 2018). Resíduos de vidro são estabilizadores adequados para solos argilosos (Bilondi et al., 2018; Ojotisa e Balkis, 2023).

O uso benéfico desse resíduo não apenas reduzirá o espaço que ele ocupa em aterros, mas também auxiliará na proteção do meio ambiente. Muitas questões surgem com o crescimento das indústrias, uma delas é o descarte adequado e eficiente de seus resíduos, bem como o reaproveitamento eficaz dos mesmos.

O processo de estabilização pode ser realizado de duas maneiras, primeiro por estabilização mecânica, na qual os materiais são adicionados ao solo e segundo por estabilização química, na qual ocorrem reações químicas entre as partículas do solo e os aditivos. Este artigo revisa as propriedades mecânicas e físico-químicas do resíduo de pó de vidro em misturas de solo. O artigo enfoca nas descobertas relativas aos ensaios: incluindo compactação, RCC, ISC, módulo resiliente, deformação permanente, cisalhamento direto/triaxial.

2 METODOLOGIA

O presente estudo tem como objetivo realizar a revisão do estado da arte sobre o uso de pó de vidro reciclado na estabilização de solos finos para aplicação em base e sub-base de pavimentos. Uma pesquisa abrangente na literatura foi realizada por meio do uso de palavras-chave adequadas como: pó de vidro estabilização de solos, solos argilosos, pavimentos, dentre outras. A literatura foi obtida de vários bancos de dados bem estabelecidos, incluindo Scopus, Springer, Elsevier e Taylor & Francis Group. Nesta revisão, apenas os artigos publicados nos últimos cinco anos foram considerados.

3 REVISAO DE LITERATURA

Bilondi et al. (2018) investigaram a viabilidade de usar um geopolímero à base de pó de vidro reciclado para melhorar o comportamento mecânico de solos argilosos. Os corpos de prova de solo foram preparados com diferentes percentuais de pó de vidro, sendo: 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 20% e 25% em peso. O ativador alcalino foi preparado com uma concentração diferente de NaOH, variando de 1 a 8 mol, e então adicionado à mistura solo-pó de vidro. Amostras de solo puro e tratadas com 5% de cimento Portland foram utilizadas para comparação. O estudo de imagens de microscopia eletrônica de varredura e a análise da difração de raios-x, confirmaram qualitativamente a formação de um gel de geopolímero nas amostras estabilizadas. Os resultados revelaram que a RCC dos espécimes estabilizados com geopolímero foram maiores em comparação com os espécimes não estabilizados.

Bilgen (2020a) avaliou o potencial de resíduos de pó de vidro como aditivo em três tipos de solo argiloso de acordo com a norma ASTM D4609. Os ensaios de laboratório incluíram limites de Atterberg, compactação, ISC e resistência à compressão não confinada. Os resultados deste estudo demonstraram que o pó de vidro tem potencial para uso como aditivo em solos argilosos, apresentando aumento nas propriedades de resistência mecânica (RCC e ISC). Além disso, o aumento das porcentagens de pó de vidro diminuiu o teor ótimo de água e aumentou a massa específica aparente seca máxima do solo argiloso.

Bilgen (2020b) investigou o uso de resíduos de pó de vidro em três tipos de solos argilosos estabilizados com cal e água do mar. Os corpos de prova foram preparados com teor ótimo de água usando 5% de cal e 10%, 20% e 25% de pó de vidro, separadamente e com diferentes combinações. Uma série de estudos experimentais foram realizados para determinar o efeito dos aditivos nas propriedades geotécnicas do solo argiloso, como relações de umidade-massa específica aparente, resistência e consistência. Os resultados apresentaram que os

aditivos melhoram as propriedades geotécnicas dos solos argilosos de forma a diminuir o índice de plasticidade e aumentar a trabalhabilidade. Além disso, as amostras apresentaram aumento no ISC e na RCC de solos argilosos em até dez vezes, dependendo dos índices de uso.

Javed e Chakraborty (2020) estudaram a estabilização do solo com resíduos de pó de vidro com o objetivo de investigar as propriedades geotécnicas do solo. O pó de vidro foi misturado às amostras de solo em 2%, 4%, 6%, 8% e 10% do peso seco do solo para realizar os testes e determinar a porcentagem ótima de pó de vidro. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento aumentaram com o aumento do pó de vidro e os valores de RCC também tiveram aumento até um percentual ideal de pó de vidro. O estudo concluiu que a porcentagem ideal de resíduos de pó de vidro no solo é de até 8%.

Blayi et al. (2020) utilizaram o pó de vidro residual triturado em porcentagens de 2,5%, 5%, 10%, 15% e 25% pelo peso seco de solo para melhorar as propriedades de um solo argiloso expansivo. De acordo com os resultados, adicionar pó de vidro residual triturado aos solos expansivos tem um impacto significativo na consistência e resistência ao cisalhamento das amostras de solo. Além disso, os valores de RCC nas amostras testadas aumentaram cerca de 75,6%, com aumento das porcentagens de pó de vidro até 15%.

A utilização do pó de vidro moído como um aglomerante sustentável para a estabilização do solo foi tema de algumas pesquisas realizadas por (Baldovino et al., 2020a). As proporções de pó de vidro utilizadas foram de 5%, 15% e 30%, enquanto as de cimento Portland de alta resistência inicial foram de 3%, 6% e 9%. Os pesquisadores desenvolveram uma equação para regular a durabilidade e a resistência das combinações de solo, pó de vidro e cimento. O índice porosidade/cimento foi o fator determinante para o RCC dos geomateriais. Os resultados apontaram que a proporção ideal de pó de vidro para aplicações de pavimentação é de 5%. A resistência à compressão e a durabilidade de um solo siltoso com resíduo de pó de vidro e cimento foi aumentada, apresentando resistências maiores que 1,2 MPa e perdas de massa menores que 8% com 3% de cimento e 15% de pó de vidro nas misturas. Dessa forma, os autores puderam concluir que as misturas são adequadas para uso em sub-base.

Em um estudo recente foi analisada a resistência à tração e a durabilidade de misturas compactadas de solo-cimento submetidas a ciclos de umidade e secagem. O índice de porosidade/cimento foi reduzido de 0,45 para 0,22, o que mostra que a quantidade de cimento pode ser diminuída em até 50% para alcançar a mesma resistência à tração, bastando adicionar pó de vidro na mistura. O pó de vidro aprimora a microestrutura das misturas de solo-cimento-pó de vidro, criando uma matriz compacta entre os materiais, produzindo geomateriais mais resistentes e diminuindo a porosidade. Os resultados indicaram que o pó de vidro é um aglomerante ecológico que aperfeiçoa as características de engenharia de solos fracos e os torna aptos para uso potencial em camadas de pavimentos (Baldovino et al., 2020b).

Além disso, (Baldovino et al., 2021) empregaram resíduos de pó de vidro na produção de geopolímeros para uma mistura de solo-cal compactada. A proporção de cal foi mantida em 5%, enquanto a de vidro variou entre 5%, 15% e 30%, todos em termos de peso seco de solo. Os autores concluíram que o pó de vidro é uma opção sustentável, pois atende aos critérios mínimos para uso em sub-bases de estradas, apresentando um valor de RCC superior a 1,2 MPa.

Ibrahim et al. (2021) estudaram resíduos de vidro triturados e peneirados na peneira número 200 (0,075 mm), misturado a um solo expansivo em diferentes porcentagens: 6%, 12%, 18%, 27% e 36% de peso seco do solo. De acordo com os resultados, os limites de Atterberg, massa específica aparente seca máxima, teor de umidade ótima, resistência à compressão não confinada, adensamento e características de expansão são melhorados pela adição de pó de vidro como estabilizador. A RCC da amostra de solo puro foi de 282 kPa e adicionando até 27% de pó de vidro residual a RCC passou para 560 kPa, depois reduziu para 517 kPa a 36%.

Uma série de investigações mecânicas e microestruturais foram conduzidas por Perera et al. (2022) para avaliar os efeitos do vidro triturado (dimensões < 5 mm) em um solo argiloso para aplicação em subleito de pavimento. Os resultados mostraram que a inclusão de vidro triturado em argila expansiva, como material de subleito do pavimento, melhorou significativamente as propriedades mecânicas (ou seja, resistência à compressão não confinada, ISC e módulo resiliente), reduziu os potenciais de expansão e retração, e melhorou as propriedades de retenção de água da argila. De acordo com os resultados dos testes, as adições de 10% a 15% de vidro, com dimensões inferiores a 5 mm, foram consideradas os teores ideais.

Bilgen (2022) investigou os efeitos de curto e longo prazo da água do mar, cal, resíduos de vidro e suas misturas em diferentes proporções usadas como aditivos em solos argilosos. Testes de limites de Atterberg, Proctor e RCC foram realizados em amostras argilosas de diferentes plasticidades preparadas com 5% de cal, diferentes porcentagens de pó de vidro como 0%, 10%, 20% e 25%, água do mar e água potável em estudos

de referência. Os testes RCC foram realizados nas amostras curadas por 90, 365 e 1500 dias para determinar os efeitos a longo prazo dos aditivos. Os resultados obtidos demonstraram que todos os aditivos utilizados aumentaram a resistência a longo prazo dos solos argilosos.

Niyomukiza et al. (2023) avaliaram a eficácia da utilização de resíduos de vidro triturado, (passante pela peneira nº 200) para alterar as propriedades de engenharia do solo. Os objetivos do estudo foram alcançados por meio da realização de experimentos em solo não estabilizado e solo estabilizado com pó de vidro nas porcentagens de 3%, 5%, 7% e 9% do peso seco do solo. Os resultados mostraram que a adição de pó de vidro ao subleito do pavimento, fortalece e reduz sua suscetibilidade à mudança de volume. A maior resistência à compressão foi obtida após a mistura de solo e 7% de pó de vidro residual. Para valores maiores que 7%, a resistência diminuiu.

Tajaddini et al. (2023) estudaram o reaproveitamento de pó de vidro e da escória de cobre para estabilizar solos argilosos. Diferentes combinações de pó de vidro e escória de cobre foram usadas para avaliar o comportamento mecânico e microestrutural do solo argiloso estabilizado utilizando ativador alcalino de hidróxido de sódio. Os resultados de resistência à compressão simples de todas as amostras estabilizadas com geopolímero melhoraram em comparação com o solo não tratado. Além disso, as amostras incorporando resíduo de pó de vidro forneceram maior resistência do que aquelas contendo escória de cobre. As análises microestruturais confirmaram os efeitos dos aditivos na formação de uma estrutura geopolimerizada de silicato de alumina bem estruturada com excelentes ligações entre as partículas do solo.

A durabilidade e a resistência de um solo argiloso utilizando um geopolímero produzido com pó de vidro reciclado foram investigadas. Amostras de solo tratadas com 10% de cimento Portland foram utilizadas para comparação. Ao comparar os espécimes modificados com geopolímero aos modificados com cimento Portland, as medições de RCC revelaram melhoria de quatro vezes na resistência à compressão. Os testes de durabilidade indicaram que os geopolímeros podem suportar temperaturas de congelamento e descongelamento melhor do que amostras com cimento Portland (Mohammadzadeh et al., 2023).

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a revisão de estudos sobre a adição de pó de vidro em solos finos, realizados nos últimos 5 anos. O percentual de adição de pó de vidro na estabilização de solos finos varia de 1% à 36%. Os resultados experimentais indicam que a estabilização pode alterar química e mecanicamente a maioria dos solos argilosos, resultando em aumento significativo na resistência à compressão não confinada. Além disso, utilizar resíduo de vidro moído finamente (pó de vidro) para estabilização de solo é significativo para minimizar o impacto ambiental.

Os estudos apresentam melhora no comportamento dos solos em relação aos valores de massa específica aparente seca máxima, resistência ao cisalhamento, limites de Atterberg e ISC.

Embora vários pesquisadores tenham relatado sobre o uso de pó de vidro na estabilização de solos, pouco se discute sobre sua aplicabilidade na construção de estradas, particularmente em camadas de base, sub-base e subleito. Além disso, pesquisas precisam ser realizadas em relação aos requisitos de estabilização do solo, avaliando as propriedades relacionadas a deformação permanente e módulo de resiliência para aplicação em obra de pavimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International (2008). ASTM D4609: *Standard guide for evaluating effectiveness of admixtures for soil stabilization*.
- Baldovino, J.A., Izzo, R.L.S., Silva, E.R., Rose, J.L. (2020a). Sustainable Use of Recycled-Glass Powder in Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), p. 04020080.
- Baldovino, J.A., Izzo, R.L.S., Rose, J.L., Avanci, M.A. (2020b). Geopolymers Based on Recycled Glass Powder for Soil Stabilization. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(4), p. 4013–4031.
- Baldovino, J.A., Izzo, R.L.S., Rose, J.L., Domingos, M.D.I. (2021). Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 271, p. 121874.

- Behnood, A. (2018). Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, p. 14–32.
- Bilgen, G. (2020a). Utilization of Powdered Glass as an Additive in Clayey Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), p. 3163–3173.
- Bilgen, G. (2020b). Utilization of powdered glass in lime-stabilized clayey soil with sea water. *Environmental Earth Sciences*, 79(437).
- Bilgen, G. (2022). Long-term compressive strength and microstructural appraisal of seawater, lime, and waste glass powder-treated clay soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), p. 1–18.
- Bilondi, P.M., Toufigh, M.M., Toufigh, V. (2018). Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. *Construction and Building Materials*, 170, p. 302–313.
- Blayi, R.A., Sherwani, A.F.H., Ibrahim, H.H., Faraj, R.H., Daraei, A. (2020). Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*, 13, p. e00427.
- Consoli, N.C., Marin, E.J.B., Samaniego, R.A.Q., Heineck, K.S., Johann, A.D.R. (2019). Use of Sustainable Binders in Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), p. 1–7.
- Gregory, J., AzariJafari, H., Vahidi, E., Guo, F., Ulm, F. J., Kirchain, R. (2021). The role of concrete in life cycle greenhouse gas emissions of US buildings and pavements. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(37), p. 1–9.
- Ibrahim, H. H., Mawlood, Y. I., Alshkane, Y. M. (2021). Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), p. 496–503.
- Javed, S., Chakraborty, S. (2020). Effects of Waste Glass Powder on Subgrade Soil Improvement. *World Scientific News, An International Scientific Journal*, 144, p. 30–42.
- Li, J., Zhang, W., Li, C., Monteiro, P. J. M. (2019). Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 223, p. 662–679.
- Mohammadzadeh, M. A., Toufigh, M. M., Toufigh, V. (2023). Durability and Strength of Geopolymer with Recycled Glass Powder Base for Clay Stabilization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(1), p. 156–168.
- Niyomukiza, J. B. Eisazadeh, A., Akamumpa, J., Kiwanuka, M., Lukwago, A., Tiboti, P. (2023). Use of waste glass powder in improving the properties of expansive clay soils. *Global NEST Journal*, 25(3), p. 139–145.
- Ojotisa, V., Balkis, A.P. (2023). Improvement of Shear Strength of Fine-Grained Soils by Waste Glass. *5th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 305.
- Perera, S. T. A. M., Saberian, M., Zhu, J., Roychand, R., Li, J. (2022). Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade. *Case Studies in Construction Materials*, 17, p. e01244.
- Ramezani, S. J., Toufigh, M. M., Toufigh, V. (2023). Utilization of Glass Powder and Silica Fume in Sugarcane Bagasse Ash-Based Geopolymer for Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), p. 1–20.
- Tajaddini, A. Saberian, M., Sirchi, V. K., Li, J., Maqsood, T. (2023). Improvement of mechanical strength of low-plasticity clay soil using geopolymer-based materials synthesized from glass powder and copper slag. *Case Studies in Construction Materials*, 18, p. e01820.