

PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE RESÍDUO DE VIDRO COM SOLO ARGILOSO

Aluno: Wander Rauan Alves Santos

Orientadora: Profa. Giovana Bizão Georgetti

RESUMO

O solo tem diversas utilidades na engenharia civil, mas nem sempre é encontrado em estado apropriado para utilização imediata, sendo necessário interferência humana para melhoria de suas propriedades. Somado a isso, na tentativa de conciliar a necessidade de diminuição de poluentes produzidos pela ação humana e em grande parte pela construção civil, a melhoria de solos com materiais reciclados adquire relevância científica. Especificamente, as propriedades hidráulicas de misturas de solos e resíduos são pouco abordadas na literatura. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a permeabilidade de misturas entre um solo característico da região do Triângulo Mineiro e resíduos provenientes da indústria de vidraçaria, considerando como variáveis: a porcentagem de adição do resíduo e a granulometria do resíduo. A permeabilidade foi avaliada a partir de ensaios de carga variável para seis condições distintas, que incluíram o solo sem resíduo, solo com adição de resíduo em duas porcentagens distintas e solo com adição de resíduo em três faixas granulométricas distintas. Verificou-se que as diferenças entre os coeficientes de condutividade hidráulica obtidos foram pouco significativas e resultaram, em sua maioria, em valores da ordem de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s. Assim, conclui-se que a alteração na permeabilidade devido à presença do resíduo de vidro pode ser desconsiderada para as condições testadas nesta pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: Melhoria de solos; Resíduo de vidro; Permeabilidade.

ABSTRACT

The soil has various applications in civil engineering, however, it is not always found in a condition suitable for immediate use, often requiring human intervention to improve its

properties. In addition, efforts to reconcile the need to reduce pollutants generated by human activity, particularly from the construction industry, have brought scientific relevance to soils improvement using recycled materials. Specifically, the hydraulic properties of soil and waste mixtures remain underexplored in the literature. Within this context, this study aims to analyze the permeability of mixtures composed of a soil typical of the Triângulo Mineiro region and waste from the glass industry, considering two variables: the percentage of waste added and the particle size distribution of the waste. Permeability was evaluated through variable head tests in specimens prepared under six different conditions: the soil without any waste, soil with the addition of waste at two different percentages, and soil with the addition of waste in three distinct particle size ranges. It was observed that the hydraulic conductivity coefficient of the specimens were within the same order of magnitude, of 10^{-6} to 10^{-7} cm/s, with insignificant differences. Thus, it is concluded that the changes in permeability due to the presence of glass waste can be considered negligible under the conditions tested in this research.

KEYWORDS: Soil improvement; Glass waste; Permeability.

1. INTRODUÇÃO

O solo é um importante material na engenharia civil, tendo diversas utilidades desde material de construção até base de assentamento de fundações. Porém, nem sempre apresenta características apropriadas para construções no seu estado natural, fazendo necessário optar-se por métodos que vençam o déficit apresentado. Entre as opções, há o tratamento do solo com aditivos, que em proporções adequadas, contribuem para o desempenho da mistura.

Juntamente com a necessidade de desenvolver métodos de melhoria de solo, cresce também a preocupação ambiental sobre o setor de construção civil, que é um dos maiores vetores de produção de poluição urbana, de acordo com Rosa e Santos (2016). Angulo (2005) afirma que cerca de metade da produção de resíduos sólidos urbanos vem do setor da construção civil, estimando um montante de 68,5 milhões de toneladas por ano. Surge então um incentivo para pesquisas científicas sobre o aproveitamento de resíduos da indústria da construção e demolição para a engenharia civil, como é o caso da aplicação

de resíduos em solo para melhoria ou estabilização de características mecânicas e hidráulicas.

Há estudos que já demonstraram a capacidade de reaproveitamento de resíduos de forma vantajosa ao serem misturados a determinados solos. Segundo Silva *et al.* (2019), a adição de agregados miúdos reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) em solo areno-argiloso influencia no coeficiente de condutividade hidráulica, chegando a aumentá-lo em até 13 vezes, sem interferir significativamente nas demais características do solo. Esse aumento é explicado pela microestrutura resultante do conjunto, e pode trazer benefício nas aplicações da mistura em obras de drenagem, por exemplo. Já Rosa e Santos (2016), estudaram as características geotécnicas do RCD em si, constatando a semelhança das propriedades do material com as das areias, o que viabilizariam sua utilização em obras geotécnicas substituindo matérias granulares, com comportamento hidráulico típico.

O resíduo de vidro também mostra um potencial inovador para utilização na engenharia geotécnica, ainda que sejam incipientes os estudos voltados às alterações causadas nas propriedades dos solos quando empregado como aditivo. Um estudo dirigido por Bilgen (2020), mostra que o vidro em pó tem potencial para interferir em características como: limite de liquidez, índice de plasticidade, umidade ótima e a máxima específica seca máxima, o que sugere a possibilidade de melhoria em outras propriedades do solo.

Uma dessas propriedades é a hidráulica, área essa que possui poucos registros científicos de comportamento de solos quando modificado com aditivos. Estudos sobre a permeabilidade e o comportamento do solo mediante a percolação de água é de grande importância, já que estão relacionados à absorção de águas superficiais e manutenção dos ciclos hídricos naturais. Além disso, os mais graves problemas de engenharia estão relacionados a presença de água no solo, como os recalques e a instabilidade de obras de terra.

A permeabilidade do solo depende, dentre outros fatores, da quantidade, da continuidade e do tamanho de poros, sendo a compactação e a descontinuidade dos poros responsáveis pela redução significativa da permeabilidade do solo à água (BEUTLER *et al.*, 2001). Assim, o uso de aditivos no solo tende a afetar sua permeabilidade.

Neste sentido, essa pesquisa investigou o comportamento hidráulico, mais precisamente a condutividade hidráulica saturada, em casos de aplicação de resíduo de vidro, provindo da indústria de vidraçaria, como agregado reciclado a um solo argiloso, para avaliação da aplicabilidade da mistura em atividades da construção civil, e assim oferecer um destino sustentável para o material. Para isso, foram testadas as variáveis de (a) porcentagem de adição do resíduo e (b) granulometria do resíduo adicionado.

2. O RESÍDUO DE VIDRO

A indústria de vidro mundial cresce de 2 a 4% ao ano (UGW, 2012 *apud* BILGEN, 2020), produzindo cerca de 180 milhões de toneladas do material (SISECAM, 2012; GIR, 2012 *apud* BILGEN, 2020), o que torna relevante o estudo sobre a aplicação do resíduo desta indústria como alternativa à reciclagem, já que segundo Bilgen (2020), os custos do tritramento do vidro são notavelmente menores que os do processo de reciclagem. No Brasil, o mercado de vidraçaria produz mais de 8,6 milhões de unidades por ano, o que equivale a 1,3 milhões de toneladas do material, e sua reciclagem movimentava cerca de 120 milhões de reais por ano, de acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO, 2019), sendo que 55% do total de vidro produzido no país é destinado a construção civil (AD NORMAS, 2018).

Tendo isso em vista, o estudo sobre a aplicação de resíduo industrial de vidraçaria em solo é útil para analisar a viabilidade de sua aplicação prática na geotecnia, podendo atribuir um ganho econômico, tanto para o setor produtor do resíduo quanto para o setor que irá utilizá-lo, e ecológico, dando uma destinação adequada a um resíduo industrial. Assim, se faz relevante uma maior quantidade de informações e estudos para poder apontar essa proposta como uma solução viável para o uso em obras de engenharia civil.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Coleta de amostras

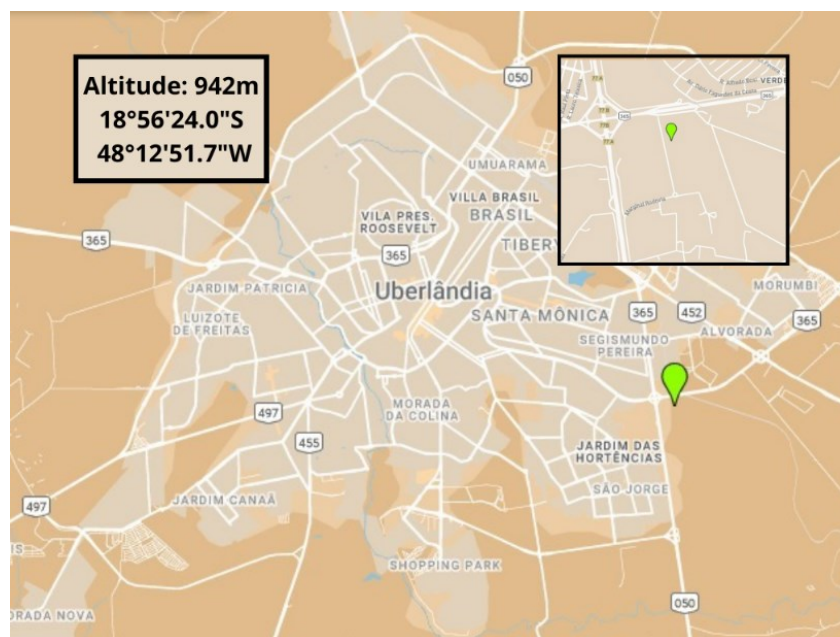
Os materiais usados, solo e resíduo, foram coletados individualmente e preparados em laboratório. Uma amostra deformada de solo foi coletada no Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia, com auxílio de um trator agrícola com um trado de rosca para retirada de cerca de 80 kg de material (Figura 1). Na Figura 2 é mostrada a localização do ponto de coleta (em verde) no mapa da cidade de Uberlândia-MG.

Figura 1 - Extração da amostra de solo.



Fonte: autor.

Figura 2 - Localização do ponto de coleta da amostra de solo.



Fonte: autor.

A amostra de resíduo de vidro foi coletada da empresa Vitral, localizada no Distrito Industrial de Uberlândia. Para alguns dos usos do vidro na construção civil é necessário que sejam polidas as extremidades cortantes das placas de vidro geradas na fábrica. Do polimento das peças de vidro é gerado o resíduo (ou pó) de vidro, que foi utilizado nesta pesquisa. A empresa é responsável pelo fornecimento de vidros planos para as vidraçarias

da região, produzindo vidros normais, temperados, laminado, serigrafado e insulado. Foram coletados cerca de 10 kg de material dos tanques de secagem do resíduo, vindos do sistema de tratamento próprio da empresa, que separa o resíduo da água por método de floculação.

3.2. Preparação e caracterização geotécnica dos materiais e misturas

Após a coleta da amostra deformada do solo, foi realizado os ensaios para caracterização e compactação na energia normal, seguindo as orientações normativas: curva granulométrica com as proporções de cada fração obtida em concordância com ABNT NBR 7181:2016, massa específica dos sólidos de acordo com ABNT NBR 6458:2016, limite de liquidez seguindo a ABNT NBR 6459:2016, limite de plasticidade normalizada pela ABNT NBR 7180:2016 além da umidade ótima e a massa específica seca oriundas da curva de compactação em conformidade com a ABNT NBR 7182:2016. Os resultados serviram de base para comparação com o resíduo e com as misturas. O mesmo processo foi feito com o resíduo de vidro, seco a temperatura ambiente por cerca de duas semanas e posteriormente destorroado, para assim passar pelos ensaios de caracterização. No destorroamento, de ambos os materiais, o diâmetro equivalente máximo foi restringido a 2 mm.

Em seguida, foram preparadas as misturas de solo e resíduo de vidro, sendo a proporção do aditivo medida em relação à massa seca. Todas as misturas foram preparadas em umidade higroscópica pela facilidade de homogeneização e posteriormente umedecidas, de acordo com a necessidade específica de cada ensaio.

Para uma análise do efeito da quantidade de resíduo nas características da mistura, foram consideradas as porcentagens de 5% e 10%, definidas com base no trabalho de Afonso (2019), realizado com os mesmos materiais. Já para uma análise do efeito da granulometria do resíduo, este foi peneirado e separado nas granulometrias de areia fina (entre 0,06 mm e 0,2 mm de diâmetro), areia média (entre 0,2 mm e 0,6 mm) e areia grossa (0,6 mm e 2,0 mm) para ser adicionado ao solo. Nesta análise considerou-se somente a porcentagem de 10% de adição.

A relação de ensaios de caracterização e compactação realizados com cada material e mistura são apresentados na Tabela 1. Todos os ensaios seguiram as normas brasileiras vigentes.

Tabela 1 – Ensaios de caracterização e compactação realizados.

Ensaio	Solo	Resíduo de vidro	Misturas com diferentes porcentagens	Misturas em diferentes frações granulométricas
Granulometria	X	X	--	--
Massa específica dos grãos	X	X	--	--
Limites de consistência	X	--	X	--
Compactação	X	--	X	X

Fonte: autor.

3.3. Ensaios de permeabilidade com carga variável

Tanto o solo quanto as misturas foram submetidos a ensaios de permeabilidade sob carga variável para determinação do coeficiente de condutividade hidráulica. Foram testadas seis configurações distintas, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaios permeabilidade com carga variável.

Designação	Percentual de resíduo	Granulometria do resíduo
Solo sem resíduo	0%	--
Solo + 5% de resíduo	5%	$D^* < 2 \text{ mm}$
Solo + 10% de resíduo	10%	$D < 2 \text{ mm}$
Solo + resíduo fino	10%	$0,06 \text{ mm} < D < 0,2 \text{ mm}$
Solo + resíduo médio	10%	$0,2 \text{ mm} < D < 0,6 \text{ mm}$
Solo + resíduo grosso	10%	$0,6 \text{ mm} < D < 2,0 \text{ mm}$

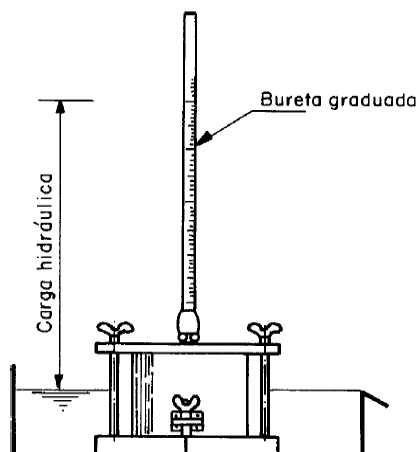
* D é o diâmetro equivalente dos grãos.

Fonte: autor.

O ensaio de permeabilidade com carga variável tem por objetivo medir o coeficiente de condutividade hidráulica de um solo quando há variação da carga, com a água percolando em regime de escoamento laminar, a partir de um corpo de prova solos cuja permeabilidade seja baixa, menores que 10^{-5} m/s (ou seja, 10^{-3} cm/s). O ensaio é normatizado pela ABNT NBR 14545:2021, que contempla dois métodos de execução do ensaio, o método A e o método B. Neste trabalho, foi usado o procedimento do método B.

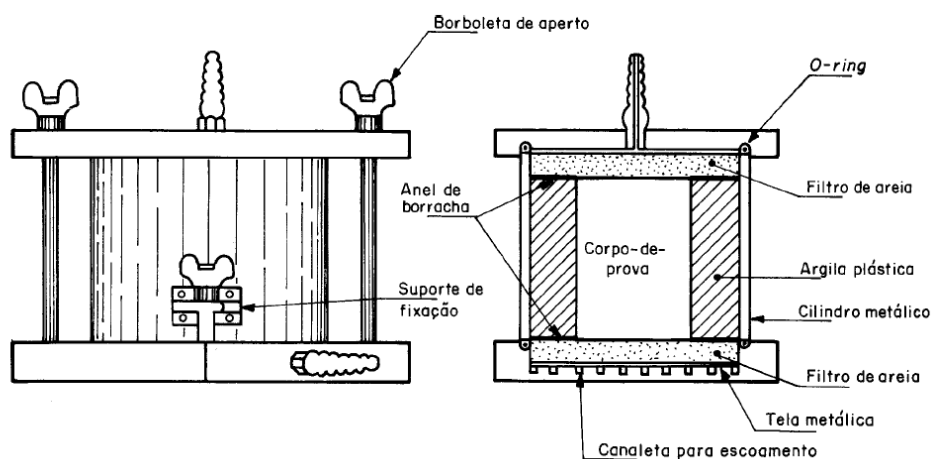
O ensaio foi realizado com a instalação do corpo de prova em um permeâmetro de parede rígida, um sistema de aplicação e medição de cargas hidráulicas, vedação do corpo de prova e filtro para o topo e base da câmara, como mostrado nas Figuras 3 a 5.

Figura 3- Esquema de montagem do ensaio B.



Fonte: ABNT NBR 14545:2021.

Figura 4- Vista e corte esquematizado do permeâmetro no Método B.



Fonte: ABNT NBR 14545:2021.

O permeâmetro usado (Figura 5) é constituído por um cilindro metálico com aproximadamente 15 cm de diâmetro interno e 13 cm de altura, acoplado a duas tampas. O sistema para aplicação e medição das cargas hidráulicas é constituído por uma bureta de vidro graduada em décimos de centímetro (Figura 6). Para a vedação e filtragem foi usada argila plástica (intercalada com uma camada de parafina) e areia grossa respectivamente.

Os corpos de prova foram cilíndricos e preparados com dimensões nominais de aproximadamente 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, compactados no ponto ótimo da curva de compactação para a energia normal.

Figura 5 – Permeâmetro e buretas usadas nos ensaios.



Fonte: Autor.

Depois de posicionados no equipamento e montados os ensaios, procedeu-se com a saturação por meio de percolação no sentido ascendente. O processo foi considerado satisfatório quando ocorreu o surgimento de água no orifício localizado na tampa superior e a percolação se processava sem a presença de bolhas de ar e com vazão constante, e processo esse que ocorreu em um período aproximado de uma semana (185 a 200 horas). Logo após saturação concluída, o sentido de fluxo foi invertido e efetuaram-se medidas das cargas hidráulicas e dos tempos decorridos. Os ensaios prosseguiram até a obtenção de pelo menos quatro determinações do coeficiente de permeabilidade relativamente próximos, os quais não apresentem tendências evidentes, quer de crescimento, quer de diminuição.

Foram tomadas as cargas hidráulicas em cm (h) e seus correspondentes instantes de medição (t), assim com o valor da área interna da bureta de vidro (a), da altura do corpo de prova (H) e da área inicial do corpo de prova (A), achava-se o coeficiente de permeabilidade de acordo com:

$$k = \frac{a \times H}{A \times \Delta t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (Eq 1)$$

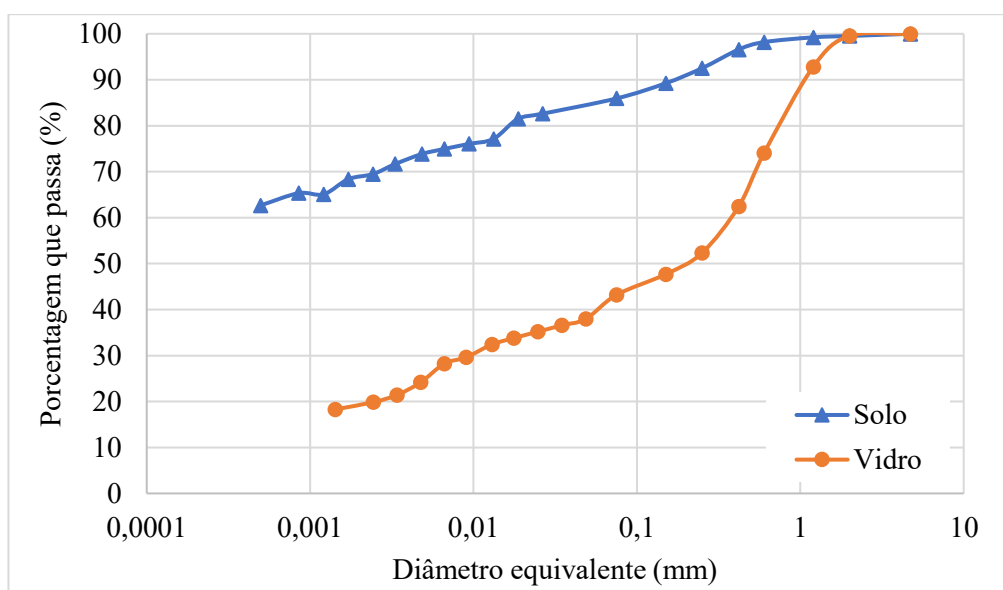
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização e compactação

Da caracterização, o primeiro parâmetro de comparação obtido entre o solo e o resíduo de vidro foi a massa específica dos grãos. Para o solo obteve-se 2,67 g/cm³, enquanto para o resíduo de vidro obteve-se 2,49 g/cm³. O valor encontrado para o resíduo de vidro é semelhante ao encontrado por Khan (2018), de 2,56 g/cm³, embora o autor tenha usado um material mais fino, passante na peneira 200.

O ensaio de granulometria foi realizado tanto para o solo como para o resíduo de vidro, sendo as curvas granulométricas apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Curvas granulométricas.



Fonte: Autor.

Percebe-se, comparando as curvas granulométricas com a escala granulométrica ABNT NBR 6502:1995, que o pó de vidro apresenta tamanhos de grãos semelhantes aos da areia, já que contém uma maior fração de areia média e fina, diferentemente da amostra do solo que apresenta uma predominância de argila e silte. Tem-se com isso que, a adição do resíduo ao solo nas proporções de 5% e 10% aumentam suavemente a proporção de areia e reduzem a proporção da fração argila nas misturas. As composições granulométricas do solo e do resíduo de vidro estão na Tabela 3, sendo que as composições das misturas foram obtidas por cálculo e não experimentalmente.

Tabela 3 – Composições granulométricas.

Fração granulométrica equivalente aos tamanhos de	Solo (%)	Resíduo de vidro (%)
Argila	66	18
Silte	16	20
Areia fina	8	28
Areia média	6	32
Areia grossa	4	22

Fonte: Autor.

Nos ensaios de limites de consistência, o resíduo não foi testado isoladamente por ser um material não plástico. Os resultados dos ensaios em solo e misturas estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites de consistência.

Misturas	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade
Solo sem resíduo	56%	35%	21%
Solo + 5% de resíduo	38%	31%	7%
Solo + 10% de resíduo	37%	31%	6%

Fonte: Autor.

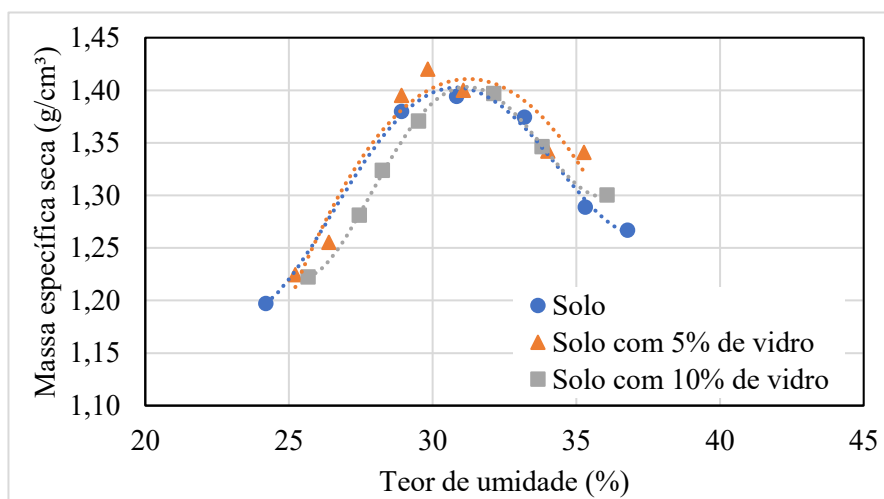
Com base nesses resultados, verifica-se que o solo foi classificado como altamente plástico. Quanto às misturas, assim como Bilgen (2020), nesta pesquisa, o aumento da proporção de resíduo de vidro resultou na diminuição do limite de liquidez. Já os limites de plasticidade sofreram alterações menos significativas.

Com base na ASTM D2487:2017, o solo foi classificado como MH (solo siltoso de alta compressibilidade), enquanto as misturas de solo com 5% e 10% de resíduo de vidro

classificam-se como ML (solo siltoso de baixa compressibilidade), e o resíduo de vidro como SM (areia siltosa).

As curvas de compactação do solo e das misturas com 5% e 10% de resíduo estão apresentadas na Figura 7. O solo apresentou massa específica seca de $1,39 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 31%, valores que estão em conformidade com os resultados encontrados por Almeida (2017) para o mesmo solo. Nas misturas, não foi verificada alteração significativa dos parâmetros de compactação, embora Bilgen (2020) tenha identificado uma tendência de redução da umidade ótima para teores de resíduo de até 25%. Com isso, entende-se que o comportamento observado nesta pesquisa pode estar associado a um percentual relativamente baixo de adição de resíduo na mistura.

Figura 7 – Curvas de compactação.

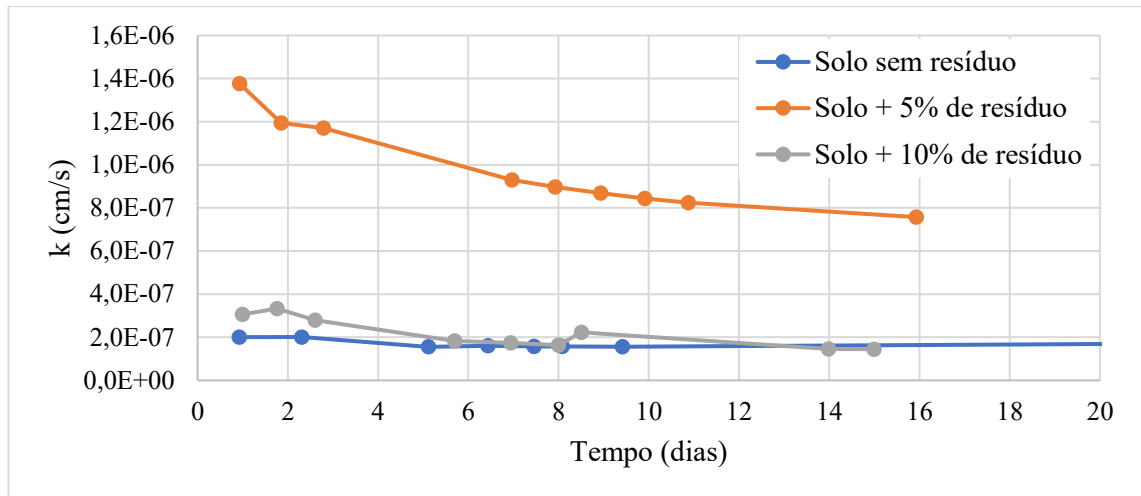


Fonte: Autor.

4.2 Permeabilidade

Para as análises de permeabilidade, considerando as seis configurações apresentadas na Tabela 2, foram ensaiados sete corpos de prova, sendo que a condição de solo sem resíduo foi ensaiada em duplicata e as demais condições foram testadas com um único corpo de prova para cada, em virtude da complexidade do ensaio e do tempo necessário. A condição de solo sem resíduo foi tomada como referência para as considerações posteriores em relação às modificações causadas pela adição de resíduo. Por isso, seus resultados são mostrados junto com a série de ensaios variando a porcentagem de resíduo, na Figura 8 e Tabela 5, e com a série de variação de granulometria, na Figura 9 e Tabela 6.

Figura 8 – Variação da condutividade hidráulica com o tempo para diferentes percentagens de resíduo adicionado.



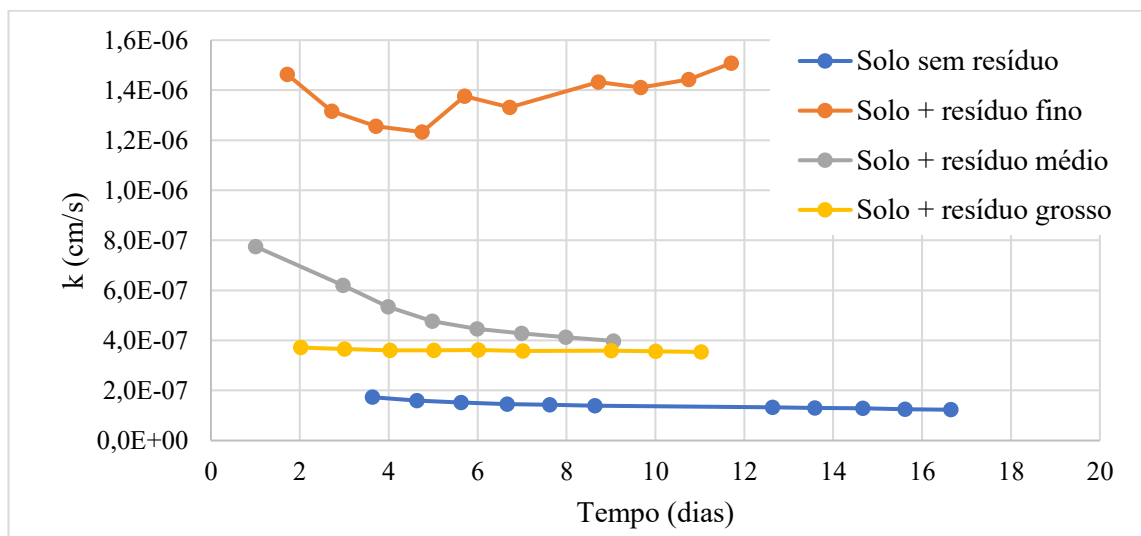
Fonte: Autor.

Tabela 5 – Dados dos corpos de prova para diferentes percentagens de resíduo adicionado.

Corpo de prova	k médio (cm/s)	Desvio padrão	Umidade de compactação (%)	Umidade final (%)	Massa esp. seca (g/cm ³)
Solo sem resíduo	$1,58 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-8}$	30,73	32,23	1,396
Solo + 5% de resíduo	$8,97 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-7}$	30,47	32,03	1,379
Solo + 10% de resíduo	$1,83 \times 10^{-7}$	$6,78 \times 10^{-8}$	30,71	32,27	1,387

Fonte: Autor.

Figura 9 – Variação da condutividade hidráulica com o tempo para diferentes percentagens de resíduo adicionado.



Fonte: Autor.

Tabela 6 - Dados dos corpos de prova para diferentes granulometrias de resíduo adicionado.

Corpo de prova	k médio (cm/s)	Desvio padrão	Umidade de compactação (%)	Umidade final (%)	Massa esp. seca (g/cm³)
Solo sem resíduo	$1,55 \times 10^{-7}$	$1,50 \times 10^{-8}$	32,30	32,82	1,396
Solo + resíduo fino	$1,32 \times 10^{-6}$	$8,62 \times 10^{-8}$	30,72	32,23	1,371
Solo + resíduo médio	$4,09 \times 10^{-7}$	$1,21 \times 10^{-7}$	30,42	32,11	1,393
Solo + resíduo grosso	$3,25 \times 10^{-7}$	$4,97 \times 10^{-9}$	30,73	32,01	1,368

Fonte: Autor.

Nota-se nas Figuras 8 e 9 que as medidas de condutividade hidráulica foram tomadas por um período mínimo de 9 dias, buscando-se verificar a estabilização das medidas e coletando uma quantidade de dados que fosse considerada suficientemente representativa. Para dois dos corpos de prova (solo + 5% de resíduo e solo + resíduo médio), as medidas apresentaram padrão decrescente com tendência à estabilização. Nos demais casos, a estabilização foi mais rápida.

Ao comparar as diferentes curvas, não se nota uma tendência evidente de variação da permeabilidade com o aumento da porcentagem de resíduo (Figura 8) ou com o aumento do tamanho de grãos do resíduo adicionado na porcentagem de 10% (Figura 9). Ainda, todos os valores de condutividade hidráulica se situam na faixa de 10^{-6} e 10^{-7} cm/s.

Considerando que um dos fatores que reconhecidamente interferem na permeabilidade dos solos é o índice de vazios e sendo os corpos de prova preparados com parâmetros de compactação bastante uniformes (Tabelas 5 e 6), os resultados sugerem que a uniformidade nos índices físicos foi mais relevante para a permeabilidade do solo e das misturas do que as variações de porcentagens e granulometrias de resíduo de vidro testadas nesta pesquisa.

Cabe observar que os dados obtidos nesta pesquisa estão sujeitos a possíveis erros, sejam eles de origem operacional, relacionados aos equipamentos utilizados ou influências ambientais. Uma das fontes de variação nos valores de condutividade hidráulica obtidos é, por exemplo, a temperatura, que não foi monitorada devido à longa duração dos ensaios.

Para todos os corpos de prova, a condutividade hidráulica média foi calculada com base nos valores apresentados graficamente, e as médias e desvios padrões podem ser

verificados nas Tabelas 4 e 5. Além disso, apresentam-se nessas tabelas alguns dos índices físicos dos corpos de prova, pelos quais é possível verificar a padronização da moldagem dos mesmos e o ganho de umidade com a inundação durante a execução dos ensaios (umidade final).

Ao se observar os valores médios de condutividade hidráulica, percebe-se pouca variação entre eles e nenhuma tendência clara de variação com o aumento do teor de resíduo na mistura ou com o aumento do tamanho dos grãos. Isso sugere que a granulometria da mistura foi menos relevante para a permeabilidade que os parâmetros de compactação, que foram os mesmos para todos os corpos de prova. Assim, para as condições testadas, tem-se que a influência do resíduo na permeabilidade foi irrelevante, embora outras pesquisas tenham constatado alterações nas propriedades mecânicas de misturas entre os mesmos materiais (AFONSO, 2019; ANDRADE, 2022).

5. CONCLUSÃO

A variação do coeficiente de permeabilidade do solo após a adição de resíduos é influenciada por múltiplos fatores, incluindo o tipo de solo, o tipo de resíduo, a proporção de adição e as características dos resíduos. Nesta pesquisa, constatou-se que, para as combinações testadas de resíduo de vidro e solo argiloso, as condutividades hidráulicas não diferem de modo significativo do valor de referência obtido para o solo. Isso sugere que as variações de permeabilidade são irrelevantes no contexto técnico do material. Todavia é necessária uma quantidade maior de ensaios, inclusive com repetibilidade, para confirmar tal tendência de comportamento.

Os resultados não indicam que haja vantagens no uso desse resíduo para alterar a permeabilidade do solo argiloso. Por outro lado, há uma provável vantagem no aspecto ambiental, considerando que a mistura se apresenta como uma alternativa para redução do impacto ambiental provocado pela disposição do resíduo industrial.

6. REFERÊNCIAS

ABIVIDRO. **Vidro:** O resíduo infinitamente reciclável. São Paulo, ABIVIDRO, 2019. Disponível em: <https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/>. Acesso em: 20 mai. 2020.

AD NORMAS (Brasil). **Especificando os vidros para a construção civil conforme a norma técnica**. 2018. Disponível em: <https://revistaadnormas.com.br/2018/05/29/especificando-os-vidros-para-a-construcao-civil-conforme-a-norma-tecnica>. Acesso em: 11 nov. 2024.

AFONSO, A. C. **Análise do desempenho mecânico de uma mistura de solo argiloso e resíduo de vidro**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação (Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24189>. Acesso em: 11 nov. 2024.

ALMEIDA, F. M. **Energias para compactação de solos destinados a estruturas de pavimentos asfálticos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19813>. Acesso em: 11 nov. 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – **ASTM D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. In: Annual Book of ASTM Standards, 2017.

ANDRADE, L. F. **Resistência à compressão de misturas de solo argiloso laterítico e resíduo de vidro**. 2022. Relatório de Iniciação Científica – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2021.

BENNY, J. R., JOSEPH J. K., JUNY M. S., MARIYA T. Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 6, n. 5, p. 228-231, 2017. DOI: 10.17577/IJERTV6IS050024.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100018>.

BILGEN, G. Utilization of powdered glass as an additive in clayey soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, v.38, p.3163–3173, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01215-7>.

KHAN, M. S.; TUFAIL, M.; MATEEULLAH. Effects of waste glass powder on the geotechnical properties of loose subsoils. **Civil Engineering Journal**, p. 1-8, 2018. DOI: <https://www.civilejournal.org/index.php/cej>.

_____. **- NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **- NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

_____ - **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

_____ - **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

_____ - **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

ROSA, I. L.; SANTOS, E. C. Fatores de influência na permeabilidade de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R). *In: CONGRESSO BRASILEIRO D MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]** ABMS, 2016.

SILVA, A. C.; FUCALÉ, S.; FERREIRA, S. R. M. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. **Revista Matéria**, v. 24 n. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0670>.